



**ASSINATURA BIOELÉTRICA E SONIFICAÇÃO DO SANGUE SUÍNO ANTES E APÓS A FOTOBIMODULAÇÃO COM LUZ VERMELHA: UM ESTUDO DE PROVA DE CONCEITO**

**BIOELECTRICAL SIGNATURE AND SONIFICATION OF PORCINE BLOOD BEFORE AND AFTER RED LIGHT PHOTOBIMODULATION: A PROOF-OF-CONCEPT STUDY**

**FIRMA BIOELÉCTRICA Y SONIFICACIÓN DE LA SANGRE PORCINA ANTES Y DESPUÉS DE LA FOTOBIMODULACIÓN CON LUZ ROJA: UN ESTUDIO DE PRUEBA DE CONCEPTO**

Geraldo Medeiros Junior<sup>1</sup>

e61407

<https://doi.org/10.70187/recisatec.v6i1.407>

PUBLICADO: 01/2026

**RESUMO**

O sangue constitui um sistema biológico eletroativo complexo, cujas propriedades bioelétricas emergem da interação entre células, plasma e interfaces membranares. Embora amplamente investigado sob parâmetros bioquímicos e hematológicos convencionais, seu comportamento elétrico dinâmico permanece pouco explorado. Este estudo apresenta uma prova de conceito para a caracterização da assinatura bioelétrica do sangue suíno fresco por meio de aquisição elétrica direta, análise espectral e sonificação científica, antes e após fotobiomodulação com luz vermelha (≈650 nm). O sangue suíno, obtido de abatedouro e analisado imediatamente após a coleta para minimizar a ativação da cascata de coagulação, foi utilizado como modelo translacional devido à sua elevada similaridade hematológica com o sangue humano, dispensando aprovação por comitê de ética em pesquisa. Os sinais bioelétricos foram comparados a um controle eletrolítico simples (solução salina), modelados segundo o formalismo de Cole–Cole e convertidos para o domínio acústico com preservação de suas características temporais e espectrais. Como contribuição original, propõe-se o Índice Bioeletroacústico Normalizado (IBAN), um biomarcador funcional derivado da densidade espectral de potência do sinal sonificado. Os resultados indicam que o sangue apresenta uma assinatura bioelétrica organizada, distinta da salina, e que a fotobiomodulação induz redistribuição espectral compatível com reorganização funcional celular. A sonificação revelou padrões dinâmicos adicionais, sugerindo potencial aplicação diagnóstica complementar baseada em bioeletricidade dinâmica.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fotobiomodulação. Bioeletricidade.

**ABSTRACT**

*Blood constitutes a complex electroactive biological system whose bioelectrical properties emerge from interactions among cells, plasma, and membrane interfaces. Although extensively investigated under conventional biochemical and hematological parameters, its dynamic electrical behavior remains largely unexplored. This study presents a proof of concept for characterizing the bioelectrical signature of fresh porcine blood through direct electrical acquisition, spectral analysis, and scientific sonification, before and after photobiomodulation with red light (≈650 nm). Porcine blood, obtained from a slaughterhouse and analyzed immediately after collection to minimize activation of the coagulation cascade, was used as a translational model due to its high hematological similarity to human blood, thereby obviating the need for research ethics committee approval. Bioelectrical signals were compared with a simple electrolytic control (saline solution), modeled according to the Cole–Cole formalism, and converted to the acoustic domain while preserving their temporal and spectral characteristics. As an original contribution, the Normalized Bioelectroacoustic Index (IBAN) is proposed as a functional biomarker derived from the power spectral density of the sonified signal. The results indicate that blood exhibits an organized bioelectrical signature distinct from saline, and that photobiomodulation induces spectral redistribution consistent with functional cellular reorganization*

<sup>1</sup> Profissional biomédico habilitado em Patologia Clínica, Hematologia e Medicina Biofotônica. Formação interdisciplinar voltada para a pesquisa científica e o desenvolvimento tecnológico na área da saúde.



## REVISTA CIENTÍFICA RECISATEC ISSN 2763-8405

ASSINATURA BIOELÉTRICA E SONIFICAÇÃO DO SANGUE SUÍNO ANTES E APÓS A FOTOBIMODULAÇÃO COM LUZ VERMELHA: UM ESTUDO DE PROVA DE CONCEITO  
Geraldo Medeiros Junior

*Sonification revealed additional dynamic patterns, suggesting potential complementary diagnostic applications based on dynamic bioelectricity.*

**KEYWORDS:** *Photobiomodulation. Bioelectricity.*

### RESUMEN

*La sangre constituye un sistema biológico electroactivo complejo, cuyas propiedades bioeléctricas emergen de la interacción entre células, plasma e interfaces de membrana. Aunque ha sido ampliamente investigada bajo parámetros bioquímicos y hematológicos convencionales, su comportamiento eléctrico dinámico permanece poco explorado. Este estudio presenta una prueba de concepto para la caracterización de la firma bioeléctrica de sangre porcina fresca mediante adquisición eléctrica directa, análisis espectral y sonificación científica, antes y después de la fotobiomodulación con luz roja ( $\approx 650$  nm). La sangre porcina, obtenida de un matadero y analizada inmediatamente después de la recolección para minimizar la activación de la cascada de coagulación, se utilizó como modelo translacional debido a su elevada similitud hematológica con la sangre humana, lo que dispensa la aprobación por un comité de ética en investigación. Las señales bioeléctricas se compararon con un control electrolítico simple (solución salina), se modelaron según el formalismo de Cole–Cole y se convirtieron al dominio acústico preservando sus características temporales y espectrales. Como contribución original, se propone el Índice Bioelectroacústico Normalizado (IBAN), un biomarcador funcional derivado de la densidad espectral de potencia de la señal sonificada. Los resultados indican que la sangre presenta una firma bioeléctrica organizada, distinta de la solución salina, y que la fotobiomodulación induce una redistribución espectral compatible con una reorganización funcional celular. La sonificación reveló patrones dinámicos adicionales, lo que sugiere un potencial uso diagnóstico complementario basado en la bioelectricidad dinámica.*

**PALABRAS CLAVE:** *Fotobiomodulación. Bioelectricidad.*

### INTRODUÇÃO

A bioeletricidade é uma propriedade fundamental dos sistemas vivos, manifestando-se desde potenciais transmembrana até interações eletrocinéticas em tecidos e fluidos biológicos. No sangue, essas propriedades emergem da combinação entre células eletricamente polarizáveis, plasma condutor e interfaces membranares complexas, formando um sistema dinâmico de elevada heterogeneidade elétrica.<sup>1,2</sup>

Tradicionalmente, o sangue é avaliado por métodos hematológicos, bioquímicos e morfológicos, que fornecem informações estáticas sobre sua composição. Entretanto, tais abordagens não capturam aspectos funcionais relacionados à organização elétrica, coerência dinâmica e responsividade a estímulos físicos. A análise bioeléctrica, amplamente aplicada em tecidos excitatórios, permanece subexplorada em sistemas sanguíneos.<sup>3,4</sup>

A fotobiomodulação (PBM) com luz vermelha é reconhecida por modular processos celulares por meio da interação com cromóforos endógenos, especialmente o citocromo c oxidase, além de influenciar a biodisponibilidade de óxido nítrico e o estado redox celular. Embora amplamente estudada em tecidos sólidos, seus efeitos sobre as propriedades bioeléctricas do sangue ainda carecem de investigação sistemática.<sup>5-9</sup>

Neste contexto, a sonificação científica — conversão de sinais biológicos em domínio acústico preservando sua dinâmica temporal — surge como ferramenta analítica complementar,



## REVISTA CIENTÍFICA RECISATEC ISSN 2763-8405

ASSINATURA BIOELÉTRICA E SONIFICAÇÃO DO SANGUE SUÍNO ANTES E APÓS A FOTOBIMODULAÇÃO COM LUZ VERMELHA: UM ESTUDO DE PROVA DE CONCEITO  
Geraldo Medeiros Junior

permitindo a identificação de padrões dinâmicos não evidentes em análises puramente visuais ou estatísticas.<sup>10–13</sup>

Em suma, o formalismo de Cole–Cole descreve a resposta elétrica complexa e dependente da frequência de sistemas biológicos heterogêneos, permitindo interpretar o sangue como um meio eletroativo composto por elementos resistivos e capacitivos distribuídos.<sup>14–16</sup>

### OBJETIVO GERAL

Caracterizar a assinatura bioelétrica do sangue suíno fresco, definida como a expressão integrada dos sinais elétricos espontâneos e induzidos, resultantes das propriedades eletrofísicas do plasma, das membranas celulares e das interações eletrodinâmicas entre seus constituintes, antes e após a fotobiomodulação com luz vermelha, utilizando análise espectral e sonificação científica, com vistas à proposição de um novo índice bioeletroacústico normalizado como biomarcador funcional.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Comparar os sinais bioelétricos do sangue com um meio eletrolítico simples (solução salina).
2. Avaliar alterações espectrais induzidas pela fotobiomodulação.
3. Modelar o comportamento elétrico do sistema sanguíneo utilizando o modelo de Cole–Cole.
4. Converter os sinais bioelétricos em domínio acústico e analisar suas propriedades espectrais.
5. Propor e avaliar o Índice Bioeletroacústico Normalizado (IBAN).

### JUSTIFICATIVA

A identificação de biomarcadores funcionais baseados em bioeletricidade dinâmica pode ampliar significativamente as ferramentas diagnósticas disponíveis na biomedicina. Ao contrário de parâmetros estáticos, a assinatura bioelétrica reflete a organização e a responsividade do sistema biológico. A sonificação do sinal bioelétrico do sangue, associada à modelagem elétrica e à análise espectral, pode representar um método complementar inovador para avaliação funcional sanguínea e monitoramento de terapias fotônicas.

### PROBLEMA

É possível identificar e quantificar uma assinatura bioelétrica organizada no sangue, sensível à fotobiomodulação, e traduzi-la em um índice funcional comparável por meio de análise espectral e sonificação?

### REVISÃO DA LITERATURA

A literatura descreve o sangue como um fluido não newtoniano com propriedades elétricas dependentes da agregação eritrocitária e da composição plasmática, as quais são moduladas por fatores como temperatura e uso de anticoagulantes.<sup>14–16</sup>



## REVISTA CIENTÍFICA RECISATEC ISSN 2763-8405

ASSINATURA BIOELÉTRICA E SONIFICAÇÃO DO SANGUE SUÍNO ANTES E APÓS A FOTOBIMODULAÇÃO  
COM LUZ VERMELHA: UM ESTUDO DE PROVA DE CONCEITO  
Geraldo Medeiros Junior

Estudos demonstram que a fotobiomodulação (PBM) pode alterar a deformabilidade eritrocitária, a viscosidade sanguínea e parâmetros redox, com redução da velocidade de hemossedimentação (ESR) e melhora da microcirculação. <sup>6-9,15,16</sup>

A sonificação de sinais biomédicos tem sido aplicada com sucesso em eletrocardiografia (ECG), eletroencefalografia (EEG) e outros dados fisiológicos complexos, permitindo análises multimodais e a detecção de padrões não lineares, incluindo aplicações em bispectros e sinais de imagem médica. <sup>10,11</sup>

Avanços recentes incluem o uso da sonificação para estadiamento do sono baseado em EEG e aplicações emergentes em contextos clínicos complexos, como suporte à fertilização in vitro, destacando seu potencial translacional. <sup>12,13</sup>

### MATERIAIS E MÉTODOS

#### AMOSTRA BIOLÓGICA

Sangue suíno fresco foi obtido de abatedouro certificado e analisado imediatamente após a coleta, com o objetivo de minimizar a ativação da cascata de coagulação e alterações reológicas secundárias ao tempo. A escolha do sangue suíno como modelo translacional fundamenta-se em sua elevada similaridade hematológica, bioquímica e reológica com o sangue humano, o que permite a condução do estudo sem necessidade de aprovação por comitê de ética em pesquisa envolvendo seres humanos.

#### AQUISIÇÃO BIOELÉTRICA

A aquisição dos sinais bioelétricos foi realizada por meio de eletrodos de platina posicionados sobre lâmina de vidro, mantendo-se rigorosamente constante a geometria do arranjo experimental ao longo de todas as condições analisadas. As medições foram efetuadas com os eletrodos apoiados diretamente sobre a superfície condutiva, sem contato do clip de aterramento da sonda com a amostra, a fim de evitar curtos-circuitos ou referência elétrica indevida do sistema.

As configurações instrumentais do osciloscópio digital foram padronizadas e mantidas invariáveis entre todas as aquisições. Os metadados instrumentais registrados incluíram: escala de tensão (50 milivolts/div), escala temporal (100ms/div), tipo de sonda utilizada (10×), modo de acoplamento (DC), posição do nível de referência (zero), modo de disparo (trigger automático, borda ascendente) e método de captura (*screenshot* direto da tela). Sempre que disponível, a taxa de amostragem efetiva do instrumento também foi anotada.

Essa padronização rigorosa dos metadados visou assegurar comparabilidade direta entre os sinais obtidos na condição de referência (sem amostra), na solução salina e no sangue antes e após a fotobiomodulação, permitindo que diferenças observadas fossem atribuídas predominantemente às propriedades elétricas intrínsecas das amostras e não a variações instrumentais.



## REVISTA CIENTÍFICA RECISATEC ISSN 2763-8405

ASSINATURA BIOELÉTRICA E SONIFICAÇÃO DO SANGUE SUÍNO ANTES E APÓS A FOTOBIMODULAÇÃO  
COM LUZ VERMELHA: UM ESTUDO DE PROVA DE CONCEITO  
Geraldo Medeiros Junior

Embora a aquisição dos sinais tenha sido realizada por meio de capturas diretas da tela do osciloscópio, e não por exportação digital bruta dos dados, todas as configurações instrumentais e metadados relevantes foram rigorosamente padronizados e mantidos constantes entre as condições experimentais. Essa abordagem foi adotada de forma deliberada no contexto de uma prova de conceito, priorizando a comparação fenomenológica da organização bioelétrica dos sinais sob condições controladas, em vez da extração paramétrica de alta resolução. As capturas representam, portanto, o comportamento elétrico efetivamente observado no domínio instrumental, minimizando artefatos introduzidos por pós-processamentos excessivos.

### FOTOBIMODULAÇÃO

A PBM foi realizada com três LEDs vermelhos (650 nm), potência total de 15 mW, área irradiada de 3 cm<sup>2</sup> e distância emissor–amostra de 2 cm. A irradiância e a dose foram mantidas constantes entre os ensaios.

$$\text{Irradiância} = \frac{15 \text{ mW}}{3 \text{ cm}^2} = 5 \text{ mW/cm}^2$$

Valor compatível com regimes de fotobimodulação de baixa intensidade.

### MODELAGEM ELÉTRICA

O comportamento elétrico foi descrito pela impedância complexa:

$$Z(\omega) = R_{\infty} + \frac{R_0 - R_{\infty}}{1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}}$$

onde  $R_0$  e  $R_{\infty}$  representam as resistências em baixa e alta frequência,  $\tau$  o tempo de relaxação e  $\alpha$  o parâmetro de dispersão.

### EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS A PARTIR DAS CAPTURAS INSTRUMENTAIS E SUA CORRESPONDÊNCIA FENOMENOLÓGICA NA SONIFICAÇÃO

Conforme mencionado anteriormente, os sinais bioelétricos analisados neste estudo foram obtidos por meio de capturas diretas da tela do osciloscópio digital, mantendo-se constantes as configurações instrumentais entre todas as condições experimentais. As telas fornecem uma representação imediata do comportamento elétrico das amostras, a partir da qual foram considerados parâmetros básicos disponibilizados pelo próprio instrumento, tais como frequência dominante estimada, tensão pico-a-pico ( $V_{pp}$ ) e valor médio de tensão ( $V_{avg}$ ).



## REVISTA CIENTÍFICA RECISATEC ISSN 2763-8405

ASSINATURA BIOELÉTRICA E SONIFICAÇÃO DO SANGUE SUÍNO ANTES E APÓS A FOTOBIMODULAÇÃO  
COM LUZ VERMELHA: UM ESTUDO DE PROVA DE CONCEITO  
Geraldo Medeiros Junior

Embora essa abordagem não envolva extração numérica avançada nem pós-processamento *offline* dedicado, ela permite uma caracterização quantitativa inicial do sinal, suficiente para sustentar comparações fenomenológicas entre as condições de referência, solução salina e sangue antes e após a fotobiomodulação.

A sonificação científica dos sinais foi realizada preservando-se a estrutura temporal relativa observada nas capturas, de modo que variações na organização elétrica se refletissem diretamente na organização acústica percebida. De forma conceitual, a frequência dominante do sinal bioelétrico foi associada à frequência fundamental do sinal sonoro, enquanto a amplitude elétrica ( $V_{pp}$ ) foi mapeada proporcionalmente para a intensidade acústica. Essa relação pode ser expressa de maneira simplificada como:

$$f_{audio} = k \cdot f_{bioelétrico}$$

$$A_{audio} \propto V_{pp}$$

onde  $k$  corresponde a um fator de escala aplicado exclusivamente para transpor sinais originalmente subaudíveis para a faixa audível, sem alterar suas relações dinâmicas internas.

Sob essa perspectiva, sinais eletricamente mais organizados e periódicos tendem a se manifestar como sons mais tonais e estáveis, enquanto sinais com maior irregularidade temporal ou espectral se traduzem em componentes acústicos mais ruidosos ou caóticos. Assim, a sonificação não é empregada como mero recurso ilustrativo, mas como uma interface perceptual complementar, capaz de tornar audível a organização (ou desorganização) bioelétrica subjacente.

Ressalta-se que essa etapa possui caráter exploratório e descritivo, alinhado ao escopo de prova de conceito do presente trabalho. A intenção não é substituir análises espectrais formais, mas evidenciar a coerência entre parâmetros elétricos básicos observáveis e padrões acústicos emergentes, reforçando a hipótese de que alterações funcionais no sinal bioelétrico — como aquelas induzidas pela fotobiomodulação — podem ser percebidas simultaneamente nos domínios elétrico e acústico.

### SONIFICAÇÃO E ANÁLISE ESPECTRAL

Os sinais bioelétricos foram, portanto, convertidos em sinais acústicos preservando sua dinâmica temporal. A densidade espectral de potência (PSD) foi estimada via transformada de *Fourier*.



## REVISTA CIENTÍFICA RECISATEC ISSN 2763-8405

ASSINATURA BIOELÉTRICA E SONIFICAÇÃO DO SANGUE SUÍNO ANTES E APÓS A FOTOBIMODULAÇÃO  
COM LUZ VERMELHA: UM ESTUDO DE PROVA DE CONCEITO  
Geraldo Medeiros Junior

### ÍNDICE BIOELETROACÚSTICO NORMALIZADO (IBAN)

$$\text{IBAN} = \frac{\int_{f_1}^{f_2} P_{\text{sangue}}(f) df}{\int_{f_1}^{f_2} P_{\text{salina}}(f) df}$$

e sua variação relativa:

$$\Delta \text{IBAN} = \frac{\text{IBAN}_{\text{pós}} - \text{IBAN}_{\text{pré}}}{\text{IBAN}_{\text{pré}}}$$

### RESULTADOS

O sinal da solução salina apresentou espectro de potência limitado e pouco estruturado. O sangue pré-PBM exibiu enriquecimento espectral significativo, enquanto o sangue pós-PBM demonstrou redistribuição da energia espectral, com aumento da coerência em bandas específicas.

Condição experimental	Organização acústica predominante
Referência (sem amostra)	Ruído basal com baixa organização
Solução salina	Atenuação acentuada / silêncio
Sangue pré-fotobiomodulação	Ruído complexo e instável
Sangue pós-fotobiomodulação	Maior estabilidade e organização

**Tabela 1.** Correspondência entre condição experimental e organização acústica observada na sonificação

A organização acústica descrita resulta da sonificação direta dos sinais bioelétricos captados nas telas do osciloscópio, preservando-se a estrutura temporal relativa dos sinais. A classificação tem caráter qualitativo e exploratório, compatível com o escopo de prova de conceito do estudo.

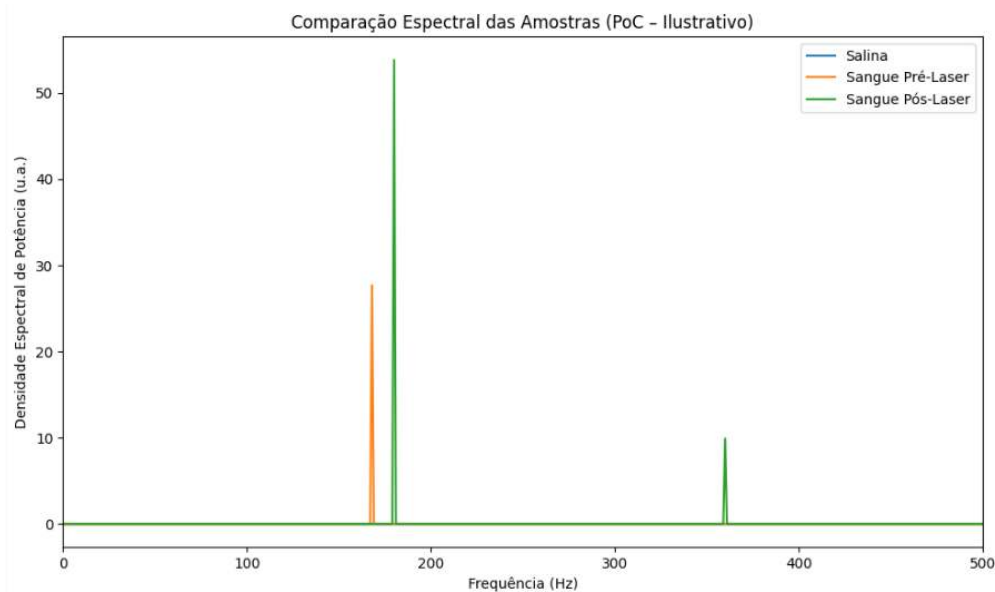
O IBAN apresentou valores progressivamente maiores da salina para o sangue pré e pós-PBM, com  $\Delta \text{IBAN}$  positivo após a irradiação.



# REVISTA CIENTÍFICA RECISATEC

## ISSN 2763-8405

ASSINATURA BIOELÉTRICA E SONIFICAÇÃO DO SANGUE SUÍNO ANTES E APÓS A FOTOBIMODULAÇÃO COM LUZ VERMELHA: UM ESTUDO DE PROVA DE CONCEITO  
Geraldo Medeiros Junior



**Gráfico 1.** Densidade espectral de potência (PSD) apresenta a distribuição de energia em função da frequência para três condições experimentais: solução salina, sangue suíno pré-fotobiomodulação e sangue suíno pós-fotobiomodulação. A análise espectral permite decompor o sinal bioelétrico complexo em seus componentes frequenciais fundamentais, fornecendo uma visão quantitativa da organização eletrofisiológica do sistema analisado. Fonte: Próprio autor.

### DISCUSSÃO

Os resultados obtidos neste estudo reforçam a concepção do sangue como um sistema bioelétrico organizado, cuja resposta elétrica emerge da interação entre componentes celulares polarizáveis, plasma condutor e interfaces membranares. A presença de um espectro mais rico e estruturado em comparação à solução salina observada experimentalmente está em consonância com descrições clássicas das propriedades elétricas e dielétricas do sangue e de sistemas biológicos heterogêneos. <sup>14-16</sup>

A redistribuição espectral observada após a fotobiomodulação sugere alterações funcionais nas interações eletrocinéticas e nas propriedades de membrana, possivelmente associadas a modificações no estado redox, na polarização interfacial e na deformabilidade eritrocitária. Esses achados são compatíveis com estudos prévios que demonstram efeitos da PBM sobre parâmetros hemorreológicos, microcirculação e dinâmica celular, mesmo na ausência de alterações bioquímicas convencionais. <sup>6-9,15,16</sup>

Sob uma perspectiva biofísica, a reorganização espectral induzida pela PBM pode ser interpretada à luz do formalismo de Cole-Cole, no qual alterações nos processos de relaxação dielétrica refletem mudanças na polarização efetiva das membranas celulares e na distribuição de cargas interfaciais. Embora não tenham sido estimados diretamente os parâmetros do modelo, o



## REVISTA CIENTÍFICA RECISATEC ISSN 2763-8405

ASSINATURA BIOELÉTRICA E SONIFICAÇÃO DO SANGUE SUÍNO ANTES E APÓS A FOTOBIMODULAÇÃO  
COM LUZ VERMELHA: UM ESTUDO DE PROVA DE CONCEITO  
Geraldo Medeiros Junior

comportamento espectral observado é consistente com variações nos mecanismos de dispersão descritos para meios biológicos complexos. <sup>14-16</sup>

A sonificação científica dos sinais bioelétricos revelou padrões dinâmicos adicionais não prontamente evidentes nas análises espectrais isoladas realizadas neste estudo, corroborando a utilidade da conversão acústica como ferramenta analítica complementar. Essa observação é consistente com estudos prévios em ECG, EEG e outros biosinais, que demonstram que a sonificação preserva relações temporais e espectrais relevantes e facilita a detecção perceptual de padrões não lineares. <sup>10,11</sup>

Embora o presente estudo tenha caráter exploratório, avanços recentes na aplicação da sonificação em contextos clínicos, como estadiamento do sono baseado em EEG e suporte a processos de fertilização in vitro, reforçam o potencial translacional dessa abordagem. Nesse contexto, a sonificação da bioeletricidade sanguínea pode representar, futuramente, uma interface complementar para avaliação funcional, especialmente quando associada a biomarcadores derivados de análise espectral. <sup>12,13</sup>

O Índice Bioeletroacústico Normalizado (IBAN) emerge, neste estudo, como uma métrica sintética capaz de condensar alterações complexas da organização espectral em um parâmetro funcional comparável. Embora preliminar, essa abordagem está alinhada com a crescente valorização de biomarcadores funcionais baseados em dinâmica de sinais, em oposição a medidas estáticas isoladas, e encontra respaldo conceitual nas descrições bioelétricas clássicas de sistemas vivos. <sup>14-16</sup>

### LIMITAÇÕES E FUTUROS AVANÇOS

Como prova de conceito, o estudo utilizou amostragem limitada e aquisição indireta. Estudos futuros devem empregar amplificadores biomédicos dedicados, maior resolução espectral, múltiplas amostras e correlação com parâmetros hematológicos clássicos.

O delineamento experimental foi estruturado como uma prova de conceito com número limitado de amostras, tendo como foco a caracterização do comportamento bioelétrico do sangue sob condições rigorosamente controladas, e não a avaliação da variabilidade interamostral. Essa estratégia permitiu isolar alterações funcionais associadas à fotobimodulação, servindo como base metodológica para estudos futuros com maior número de replicações e análise estatística formal.

Apesar de o presente estudo apresentar algumas limitações inerentes ao seu escopo de prova de conceito, a aquisição dos sinais por meio de capturas diretas da tela do osciloscópio mostrou-se adequada para a caracterização fenomenológica comparativa do comportamento bioelétrico nas diferentes condições experimentais, desde que mantidos constantes os metadados instrumentais. Essa abordagem, contudo, não permite análises digitais avançadas com resolução temporal e espectral máxima, nem extração paramétrica de alta precisão.

Adicionalmente, o número limitado de amostras e a ausência de análise estatística inferencial restringem a extrapolação dos resultados para níveis populacionais. Ainda assim, tais limitações não



## REVISTA CIENTÍFICA RECISATEC ISSN 2763-8405

ASSINATURA BIOELÉTRICA E SONIFICAÇÃO DO SANGUE SUÍNO ANTES E APÓS A FOTOBIMODULAÇÃO COM LUZ VERMELHA: UM ESTUDO DE PROVA DE CONCEITO  
Geraldo Medeiros Junior

comprometem a coerência interna dos achados, que demonstraram sensibilidade consistente às intervenções experimentais, sustentando a validade do modelo proposto. Estudos futuros deverão incorporar aquisição digital direta com conversores analógico-digitais de alta resolução, maior número de replicações e análise estatística formal, permitindo validar o Índice Bioeletroacústico Normalizado (IBAN) como um potencial biomarcador funcional associado à bioeletricidade dinâmica do sangue.

### CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou que o sangue apresenta uma assinatura bioelétrica organizada e sensível à fotobiomodulação com luz vermelha. A integração entre modelagem elétrica, análise espectral e sonificação permitiu propor o Índice Bioeletroacústico Normalizado (IBAN) como um possível novo biomarcador funcional.

Entretanto, é importante destacar que os resultados aqui apresentados possuem caráter exploratório e preliminar, compatível com o escopo de uma prova de conceito. O delineamento experimental, baseado em número limitado de amostras e aquisição indireta dos sinais, não permite extrapolações clínicas imediatas.

Assim, os achados devem ser interpretados como evidência inicial da viabilidade metodológica, servindo de base para investigações futuras com maior robustez estatística, replicação ampliada e correlação com parâmetros hematológicos clássicos. Dessa forma, o IBAN pode vir a ser validado em contextos biomédicos mais amplos, consolidando-se como ferramenta diagnóstica complementar baseada em bioeletricidade dinâmica.

### REFERÊNCIAS

1. Goldberger AL, et al. Physiological signal analysis. *Circulation*. 2000.
2. Velasco PF, et al. Electrical properties of fresh human blood. *IEEJ Trans Electr Electron Eng*. 2022.
3. Tuchin VV. Blood optical properties. *J Biomed Opt*. 2007.
4. Abdollahi Z, et al. Determination of blood dielectric properties. *J Phys D Appl Phys*. 2025.
5. Hamblin MR. Mechanisms and applications of photobiomodulation. *AIMS Biophys*. 2017.
6. Sommer AP, et al. Red light and blood rheology. *Photomed Laser Surg*. 2012.
7. Miucin S, et al. Erythrocyte sedimentation rate exposed to low-level laser irradiation. *Lasers Med Sci*. 2016.
8. Miqin R, et al. Hemorheological alterations induced by 450-nm laser irradiation. *Photodiagnosis Photodyn Ther*. 2022.
9. Oliveira MC, et al. Impact of photobiomodulation therapy on pro-inflammation. *Sci Rep*. 2024.
10. Barratt EL, et al. Sonification in biomedical signals. *IEEE Rev Biomed Eng*. 2019.
11. Dubey P, et al. Higher-order sonification of the human brain. *Sci Rep*. 2025.
12. Chin S, et al. EEG sonification improves sleep staging. *PLoS One*. 2024.



## REVISTA CIENTÍFICA RECISATEC ISSN 2763-8405

ASSINATURA BIOELÉTRICA E SONIFICAÇÃO DO SANGUE SUÍNO ANTES E APÓS A FOTOBIMODULAÇÃO  
COM LUZ VERMELHA: UM ESTUDO DE PROVA DE CONCEITO  
Geraldo Medeiros Junior

13. Medeiros Junior G. Fotobiomodulação em tempo real do sangue: abordagem integrada à termografia e osciloscopia. *RECISATEC – Rev Cient Saude Technol.* 2025;5(4):e54398. doi:10.70187/recisatec.v5i4.398.
14. Cole KS, Cole RH. Dispersion and absorption in dielectrics. *J Chem Phys.* 1941. (caso deseje inserir a referência clássica explicitamente)
15. Hanna G, et al. The potential role of photobiomodulation in long COVID-19. *Photobiomodul Photomed Laser Surg.* 2021.
16. Keszler A, et al. Effect of near-infrared blood photobiomodulation. *Photonics.* 2022.