CAPÍTULO 3

Bioimpedância elétrica como ferramenta para predição da mastite em vacas leiteiras

Gabrielle Nunes Trindade[1], Francine Basso Facco[1], Estefani Capucho[1], Gilmar Roberto Meinerz[2], Tiago Antonio Del Valle[1], Julio Viégas[1]

https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-50-3.c3

Resumo

A mastite bovina é uma das principais enfermidades da bovinocultura leiteira, comprometendo a saúde da glândula mamária, a qualidade do leite e a rentabilidade dos sistemas de produção. Nesse contexto, a bioimpedância elétrica (BIA) apresenta potencial como ferramenta complementar para o monitoramento da saúde mamária, por permitir a avaliação não invasiva das propriedades elétricas dos tecidos. Este capítulo aborda os fundamentos fisiológicos da aplicação da BIA na detecção da mastite e apresenta um projeto que será desenvolvido no Laboratório de Bovinocultura de Leite da Universidade Federal de Santa Maria (LABLEITE-UFSM), com 10 vacas da raça Holandesa em lactação. Serão avaliados os parâmetros elétricos da glândula mamária antes e após a ordenha, relacionando-os à contagem de células somáticas (CCS), à produção de leite e às características morfológicas do úbere e dos tetos. Espera-se identificar condições adequadas de mensuração e investigar o potencial da BIA como ferramenta complementar para o monitoramento da saúde mamária e a detecção precoce da mastite bovina.

Palavras-chave: bioimpedância elétrica, contagem de células somáticas, inflamação mamária, vaca leiteira.

[1]Departamento de Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil
[2]Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, Brasil

© 2024 Mérida Publishers CC-BY 4.0

1. Introdução

A bovinocultura brasileira apresenta expressiva relevância no cenário mundial, destacando-se pela contribuição à produção de leite e pela importância econômica para o setor agropecuário nacional. Em 2025, a produção alcançou 36,7 bilhões de litros de leite, representando um crescimento de 2,6% em relação ao ano anterior (IBGE, 2026). Além da expressiva produção, destacam-se diferenças na produtividade entre as regiões, com o Sul apresentando a maior produtividade média, de 4.051 litros de leite/vaca/ano (IBGE, 2024). Apesar do avanço tecnológico e da melhoria nas práticas de manejo, doenças como a mastite continuam a representar um dos principais desafios sanitários enfrentados pelos produtores de leite.

A mastite, processo inflamatório que afeta a glândula mamária, é responsável por grande parte de perdas econômicas, incluindo queda expressiva na produção de leite (7 a 64%), desconto de preço decorrentes de alta contagem de células somáticas (CCS), descarte obrigatório de leite e custos de tratamento e descarte precoce dos animais (Fesseha *et al.,* 2021; Santos e Ribeiro, 2026). Além disso, estima-se que a incidência de mastite subclínica afete até 50% do rebanho, provocando redução da síntese de leite sem apresentar sintomas visíveis (Santos e Ribeiro, 2026).

Diante da relevância sanitária e econômica da mastite,diferentes métodos são utilizados para auxiliar no seu diagnóstico, como o *California Mastitis Test* (CMT), a contagem de células somáticas (CCS), o teste da caneca telada, e o cultivo microbiológico (Fonseca *et al*., 2021; Ramuada *et al*., 2024). Embora amplamente utilizados, esses métodos apresentam limitações, como subjetividade na interpretação, dificuldades de detecção precoce, especialmente em casos de mastite subclínica (Fonseca *et al*., 2021; Ramuada *et al*., 2024; Santos e Ribeiro, 2026). Métodos como a CCS e o cultivo microbiológico, apresentam custo elevado e necessidade de infraestrutura laboratorial (Ramuada *et al*., 2024).

Nesse contexto, a busca por ferramentas complementares que possibilitem uma avaliação objetiva e precoce da saúde do úbere tem despertado interesse. Entre elas, a bioimpedância elétrica (BIA) é uma técnica não invasiva

que avalia a resposta dos tecidos à passagem de uma corrente elétrica de baixa intensidade, permitindo a obtenção de parâmetros como resistência, reactância, impedância, ângulo de fase e condutância (Eickemberg *et al*., 2011). Alterações na estrutura e no estado do tecido decorrentes de processos inflamatórios podem modificar suas propriedades elétricas, indicando potencial da técnica para auxiliar na identificação precoce de mudanças na glândula mamária associadas à mastite (Ramos *et al*., 2018).

2. Métodos de diagnóstico da mastite

Os métodos de monitoramento da saúde mamária podem ser divididos em testes de triagem a campo, métodos laboratoriais automatizados e técnicas microbiológicas. Entre os testes de campo, destaca-se a caneca telada, indicada para a detecção da mastite clínica durante o manejo pré-ordenha. Esse método permite a visualização direta de alterações físicas no leite, como grumos, filamentos, pus ou presença de sangue (Massote *et al*., 2019; Fonseca *et al*., 2021). Apesar de rápido e de baixo custo, é incapaz de identificar casos subclínicos.

O *California Mastitis Test* (CMT) é o método indireto de campo mais utilizado para a detecção da mastite subclínica. Seu princípio baseia-se na reação entre um detergente aniônico e o DNA liberado pelas células somáticas rompidas, formando um gel cuja viscosidade é proporcional à celularidade da amostra (Damasceno, 2025). Embora seja prático, de baixo custo e permita estimar escores ao pé da vaca, apresenta limitações importantes, como a subjetividade na interpretação visual pelo operador, a influência do estágio de lactação e a variabilidade de sensibilidade e especificidade quando comparado ao isolamento microbiológico (Tommasoni *et al.*, 2023). O *Wisconsin Mastitis Test* (WMT) foi desenvolvido como uma variação do CMT, utilizando tubos graduados para quantificar a viscosidade por meio do escoamento, com o objetivo de reduzir a subjetividade do avaliador (Fonseca *et al*., 2024; Ramuada *et al.*, 2024).

Entre os métodos laboratoriais, a contagem de células somáticas (CCS) realizada por citometria de fluxo é considerada referência para avaliar a magnitude da resposta inflamatória e a qualidade do leite (Damasceno, 2025). Equipamentos automatizados oferecem alta precisão, repetibilidade e capacidade de processamento. No entanto, a CCS é um parâmetro quantitativo, de modo que um mesmo valor pode representar tanto uma infecção aguda inicial quanto uma condição crônica persistente. Além disso, exige amostragem periódica, transporte adequado das amostras e elevado investimento em equipamentos e manutenção (Zuffo, 2021).

A cultura microbiológica é amplamente descrita como ferramenta para o diagnóstico da infecção intramamária. Enquanto exames como o CMT ou a CCS apenas mensuram a intensidade da resposta inflamatória, o cultivo isola e identifica o microrganismo causador (Fonseca *et al*., 2021). O diagnóstico microbiológico possibilita diferenciar infecções contagiosas de ambiente , orientando decisões estratégicas na propriedade, como linha de ordenha e descarte de animais crônicos (Dias *et al*., 2020). Apesar de ser um método de referência, o cultivo exige um período de incubação de 24 a 48 horas, o que impede decisões imediatas na linha de ordenha (Tommasoni *et al*., 2021), além disso, exige laboratórios equipados e profissionais treinados para a leitura das placas (Ramuada *et al*.,2024).

A análise da composição do leite por espectroscopia de infravermelho consiste em uma técnica instrumental que utiliza a absorção da radiação infravermelha pelas moléculas da amostra para determinar sua composição química. A energia absorvida provoca vibrações nas ligações moleculares, gerando um espectro característico que é interpretado pelo equipamento para estimar os teores de gordura, proteína, lactose e sólidos totais (Kucevic *et al*., 2017; Damasceno, 2025). Essa técnica permite analisar um grande número de amostras em pouco tempo, com rapidez, precisão e pouca necessidade de preparo prévio (Kucevic *et al*., 2017). Além disso, possibilita estimar outros componentes, como nitrogênio ureico, caseína e ácidos graxos, sendo amplamente utilizada em laboratórios e indústrias de laticínios para o controle da qualidade do leite (Damasceno, 2025).

A bioimpedância elétrica (BIA) baseia-se na oposição de um meio biológico à passagem da corrente elétrica alternada de baixa intensidade. Essa oposição fundamenta-se em dois vetores principais: a resistência, associada ao fluxo e à concentração de íons livres nos meios intra e extracelulares, e a reactância capacitiva, decorrente da capacitância e integridade das membranas celulares em suspensão (Eickemberg *et al*., 2011; Schumacher *et al*., 2019). Aplicada ao monitoramento da sanidade da glândula mamária, a BIA destaca-se como uma metodologia portátil e rápida (Zuffo, 2021; Oliveira *et al*., 2024) demonstrando potencial para detecção de alterações físico-químicas em tempo real.

3. Mecanismos fisiológicos e da mastite e detecção pela BIA

O processo inflamatório da glândula mamária é desencadeado pela invasão de patógenos e consequentemente resposta imune do hospedeiro (Santos e Fonseca, 2007). Esse evento acarreta duas alterações fisiológicas centrais no tecido e na secreção láctea, que fundamentam as mudanças observadas nos parâmetros de BIA.

A primeira alteração fisiológica refere-se à ruptura da barreira hemato-mamária e desequilíbrio iônico. A inflamação induz a lesão do epitélio secretor e o rompimento das junções entre as células alveolares (Damasceno, 2025). A perda de integridade dessa barreira possibilita o extravasamento de componentes sanguíneos para o lúmen mamário (Damasceno, 2025). Como consequência, ocorre um influxo massivo de íons sódio (Na+) e cloreto (Cl-) do plasma para o leite. Paralelamente, o dano às células secretoras e o estresse metabólico reduzem a síntese de lactose e a concentração de íons potássio (K+) (Schumacher *et al*., 2019; Damasceno, 2025).

A segunda alteração fisiológica consiste no recrutamento e influxo celular, que se reflete na elevação da contagem de CCS. A resposta imune inata promove a migração de leucócitos do sangue periférico para o interior do úbere, dominada pelo recrutamento de neutrófilos polimorfonucleares, além de

macrófagos e linfócitos (Pegolo *et al*., 2023; Damasceno, 2025). Esse fenômeno eleva a CCS e altera a composição celular em suspensão no leite.

Essas alterações fisiopatológicas conectam-se aos parâmetros de BIA, a mesma quantifica a oposição total que um tecido ou fluido oferece à passagem de uma corrente elétrica de baixa intensidade (Schumacher *et al*. 2019; 2021). Ela é composta por dois elementos principais, a resistência e a reactância capacitiva, além dos parâmetros derivados como condutância e ângulo de fase (Schumacher e*t al*., 2021).

A resistência e a condutância respondem principalmente ao equilíbrio iônico do meio. A resistência representa a oposição direta ao fluxo de corrente através dos meios intra e extra celulares, sendo regida pela mobilidade e quantidade de íons livres que atuam como carreadores de carga elétrica (Schumacher *et al*., 2021). Na mastite, a maior permeabilidade vascular eleva a concentração de eletrólitos solúveis (Na^+ e Cl^-) no leite e reduz a concentração de lactose, composto não-iônico que oferece pouca condutividade (Safak e Risvanli, 2022; Tommasoni *et al*., 2023). Esse aumento na força iônica do fluido diminui a resistência elétrica, e resulta em um aumento proporcional da condutância e queda da magnitude da impedância (Safak e Risvanli, 2022).

A reactância capacitiva e o ângulo de fase, por sua vez, respondem a densidade da integridade celular. A reactância surge da propriedade capacitiva das células biológicas (Schumacher *et al*., 2019). A dupla camada lipídica isolante da membrana celular, posicionada entre os fluidos condutores intra e extracelulares, atua como um capacitor elétrico, acumulando cargas e provocando um atraso de fase na corrente elétrica aplicada, sendo refletido pelo ângulo de fase (Schumacher *et al*., 2021). Na mastite, a migração de milhões de células de defesa (neutrófilos, macrófagos) para a secreção láctea altera a densidade total de membranas celulares intactas (Zuffo, 2021). Essa variação na quantidade de capacitores em suspensão e o grau de integridade funcional das membranas modificam diretamente os valores de reactância e do ângulo de fase, permitindo correlacionar as medidas de bioimpedância com a elevação da CCS e a alteração do perfil leucocitário (Schumacher *et al*., 2019, Zuffo, 2021).

Na mastite, em frequências baixas (< 100 kHz), a corrente elétrica não possui energia suficiente para ultrapassar a barreira capacitiva das membranas celulares, circulando predominantemente pelo meio extracelular, o que reflete o influxo iônico de Na^+ e Cl^- e a queda da resistência (Zuffo, 2021). Em frequências mais elevadas (> 100 kHz a MHz), a corrente é capaz de atravessar a bicamada lipídica das membranas e percorrer o espaço intracelular, fornecendo informações sobre o conteúdo interno celular, integridade de membrana e densidade de células somáticas (Zuffo, 2021).

4. Atividades desenvolvidas no LABLEITE-UFSM

O laboratório de Bovinocultura de Leite (LABLEITE), vinculado ao Departamento de Zootecnia do Centro de Ciências Rurais da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), desenvolve pesquisas voltadas à produção e à saúde de bovinos leiteiros. Dentre as iniciativas, destaca-se o projeto intitulado “Bioimpedância elétrica como ferramenta para predição da mastite em vacas leiteiras”, conduzido sob a coordenação do Prof. Dr. Julio Viégas e do Prof. Dr. Tiago Antonio Del Valle, com a colaboração da Ms. Francine Basso Facco e da zootecnista e pós-graduanda Gabrielle Nunes Trindade.

O objetivo central da pesquisa consiste em avaliar o potencial da bioimpedância elétrica (BIA) como um método complementar, portátil, rápido e não invasivo para o monitoramento da sanidade da glândula mamária e o diagnóstico precoce da mastite, com ênfase na forma subclínica. O estudo investigará o comportamento de parâmetros elétricos teciduais como: resistência, reactância, impedância e ângulo de fase e serão utilizadas vacas da raça Holandesa em fase de lactação. Será correlacionado as variações elétricas com a Contagem de Células Somáticas (CCS), a produção diária de leite e aspectos morfológicos da glândula mamária.

4.1 Material e métodos

O experimento será conduzido no Laboratório de Bovinocultura de Leite da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), no Rio Grande do Sul, entre os meses de abril e junho de 2027. Serão utilizadas 10 vacas da raça Holandesa em lactação, em um delineamento experimental de medidas repetidas no tempo, no qual os animais serão monitorados duas vezes por semana, nos períodos da manhã e da tarde, ao longo de todo o período experimental.

As mensurações da bioimpedância elétrica serão realizadas por meio do analisador tetrapolar *Bioelectrical Body Composition Analyzer* (Quantum II, RJL Systems®), o qual dispersa uma corrente elétrica alternada de baixa intensidade (800 µA) e frequência de 50kHz, imperceptível ao animal. Para evitar a dispersão da corrente elétrica pelo fato de ser de baixa intensidade e evitar interferências na leitura, as estruturas metálicas das contenções na sala de ordenha serão revestidas com placas de etileno-acetato de vinila (EVA) de 6 mm.

Nas semanas iniciais, será realizada a padronização técnica para definir a disposição dos eletrodos na glândula mamária que proporciona maior estabilidade e confiabilidade nas medições. A rotina em cada sessão de avaliação seguirá um protocolo padronizado, iniciando com o descarte dos três primeiros jatos de leite na caneca telada para identificação de mastite clínica, seguido da aplicação de pré-dipping (com 30 segundos de contato) e secagem individual dos tetos com papel toalha. Na sequência, será realizada a mensuração da BIA em duplicata em cada quarto mamário antes da ordenha. Após a ordenha convencional, realizada com coletores acoplados para amostragem individual de leite destinada à determinação da Contagem de Células Somáticas (CCS) em laboratório, será feita uma nova leitura da BIA e a aplicação do pós-dipping. Além dos parâmetros elétricos e da CCS, serão registrados o volume de leite produzido, o peso corporal dos animais e as características morfológicas do úbere e dos tetos (altura, profundidade, circunferência do úbere, bem como comprimento e circunferência dos tetos).

Os dados obtidos serão analisados no software estatístico SAS (versão 9.4, Cary, NC, USA), por intermédio do procedimento PROC MIXED, de acordo com o seguinte modelo matemático:

$$Y_{ijkl} = \mu + M_i + P_j + (M \times P)_{ij} + A_k + e_{ijkl}$$

onde: Y_{ijkl} = variável resposta BIA (resistência, reactância, impedância ou ângulo de fase); μ = média geral; M_i = efeito do momento da avaliação (antes e depois da ordenha); P_j = efeito da posição dos eletrodos; $(M \times P)_{ij}$ = interação entre momento de avaliação e posição dos eletrodos; A_k = efeito aleatório do animal; e_{ijkl} = erro residual.

Os valores de resistência (Rs) e reactância (Xc, em ohms), fornecidos diretamente pelo aparelho, serão utilizados para calcular a impedância (Z) através da equação $Z = (Rs^2 + Xc^2)$, além das variáveis como o ângulo de fase (AF, em graus) e a condutância (C), utilizando a média das duplicatas como valor final de cada avaliação. A produção diária de leite e o peso corporal serão testados e incluídos como covariáveis no modelo quando aplicável. As associações entre a CCS (submetida à transformação logarítmica para normalização, se necessário) e os parâmetros da bioimpedância elétrica, serão avaliados por meio de análises de correlação e regressão, adotando-se nível de 5% de significância.

4.2 Resultados esperados

Espera-se demonstrar a viabilidade da bioimpedância elétrica como uma ferramenta complementar e não invasiva para o monitoramento da saúde da glândula mamária de vacas leiteiras. A metodologia deverá permitir a caracterização dos parâmetros elétricos teciduais: resistência, reactância, impedância e ângulo de fase, bem como a identificação do posicionamento ideal de eletrodos que garanta a repetibilidade e estabilidade das mensurações. Pretende-se investigar a associação entre os resultados da BIA e a Contagem

de Células Somáticas (CCS), buscando identificar possíveis relações entre as alterações elétricas do tecido mamário e a ocorrência de mastite. Os resultados poderão contribuir para o desenvolvimento de métodos auxiliares na detecção precoce da mastite em vacas leiteiras.

5. Referências

DAMASCENO, Helen G. Relação das diferentes abordagens diagnósticas da mastite subclínica com a composição e atributos físicos do leite. **Dissertação de Mestrado**. Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, SC, Brasil. 2025. https://repositorio-api.udesc.br/server/api/core/bitstreams/2e428d90-50b3-4dd0-a4c3-e91bbfe2dd71/content.

DIAS, Juliana; BRITO, Maria; DE SOUZA, Guilherme. Mastite: epidemiologia e controle. In: **Pecuária Leiteira na Amazônia**. Brasília, DF: Embrapa, 2020. p. 131–142. https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1126175/mastite-epidemiologia-e-controle.

EICKEMBERG, Michaela *et al.* Bioimpedância elétrica e sua aplicação em avaliação nutricional. **Revista de Nutrição.** 24:883–893. 2011. https://doi.org/10.1590/S1415-52732011000600009.

FESSEHA, Haben; MATHEWOS, Mesfin; ALIYE, Saliman; WOLDE, Amanuel. Study on prevalence of bovine mastitis and associated risk factors in dairy farms of Modjo town and suburbs, central Oromia, Ethiopia. **Veterinary Medicine**. Res. Rep. 12, 271–283. 2021. https://doi.org/10.2147/VMRR.S323460.

FONSECA, Maria. Mastite bovina: Revisão. **Pubvet** 15:a743. 2021. https://doi.org/10.31533/pubvet.v15n02a743.1-18.

IBGE. Anuário Estatístico do Brasil 2024. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2024. https://anuario.ibge.gov.br/2024/agropecuaria-e-extracao-vegetal/producao-animal.html?utm_source=chatgpt.com.

KUČEVIĆ, Denis. *et al.* Validation and application of FTIR spectroscopy in raw milk analysis. **Acta Period. Technol.** 48:167–175. 2017. https://doi.org/10.2298/APT1748167K

MASSOTE, Vitória. *et al.* DIAGNÓSTICO E CONTROLE DE MASTITE BOVINA: uma revisão de literatura. **Revista Agroveterinária do Sul de Minas** - ISSN: 2674-9661, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 41–54, 2019. Disponível em: https://ojs.periodicos.unis.edu.br/agrovetsulminas/article/view/265.

OLIVEIRA, Mauricio; ENGER Kellie; ENGER, Benjamin. Impact of Staphylococcus aureus intramammary infection on cellular proliferation and apoptosis on developing mammary glands of pregnant dairy heifers. **Journal of Dairy Science**. 109:7410–7418. 2026. https://doi.org/10.3168/jds.2025-27622.

OLIVEIRA, Wemerson. *et al.* Electrical bioimpedance in milk adulterated with water: Measurement methodology for quantification, influence of temperature, and mathematical modelling. **Applied Sciences.** 14:8026. 2024. https://doi.org/10.3390/app14178026.

PEGOLO, Sara. *et al.* Blood Biochemical Changes upon Subclinical Intramammary Infection and Inflammation in Holstein Cattle. **Journal of Dairy Science**. v. 106, n. 9, p. 6539–6550, 2023. https://doi.org/10.3168/jds.2022-23155.

RAMOS, Jean. *et al*. Physiological and pathological alterations of the mammary gland of Holstein cows in the transition period. 2018, Anais. Sapporo: **Convention Linkage**, Inc., 2018.

RAMUADA Mpho. *et al.* A practical guide to diagnosing bovine mastitis: a review. **Frontiers in Animal Science**. 5:1504873. 2024. https://doi.org/10.3389/fanim.2024.1504873.

ŞAFAK, Tarik; RIŞVANLI, Ali. Effect of somatic cell count on milk composition and some chemical properties of milk. ***Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia***, v. 74, n. 6, p. 1083–1088, 2022. https://doi.org/10.1590/1678-4162-12854.

SANTOS, Maria; RIBEIRO, Alessandra. Impactos das doenças infecciosas na produção leiteira: uma revisão narrativa de literatura. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, [S. l.], v. 9, n. 3, p. e89370, 2026. https://doi.org/10.34188/bjaerv9n3-294.

SANTOS, Marcos; FONSECA, Luís. Estratégias para controle de mastite e melhoria da qualidade do leite. Barueri, SP: **Manole**. p. 314. 2007. **ISBN:** 978-85-98416-22-9.

SCHUMACHER, Larissa. *et al.* Bioelectrical impedance analysis (BIA) in animal production: Review. **Revista Mexicana de Ciências Pecuarias**, v. 12, n. 2, p. 553–572, 2021. https://doi.org/10.22319/rmcp.v12i2.5821.

SCHUMACHER, Larissa. *et al.* Use of electrical bioimpedance analysis to evaluate the quality of bovine raw milk. **South African Journal of Animal Science**, v. 49, n. 3, p. 727–734, 2019. https://doi.org/10.4314/sajas.v49i4.14.

TOMMASONI, Chiara. *et al.* Mastitis in dairy cattle: on-farm diagnostics and future perspectives. **Animals**, v. 13, n. 15, art. 2538, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/ani13152538.

ZUFFO, Gian. *Espectroscopia por bioimpedância elétrica: análise em tempo real para a determinação da contagem de células somáticas no leite bovino*. 2021. 65. **Dissertação (Mestrado em Zootecnia)** – Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Centro de Educação Superior do Oeste (CEO), Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Chapecó, 2021. https://repositorio.udesc.br/entities/publication/5b505b03-ec98-4b3d-85aa-15761614d43e/full.