

# EFEITO DO TRATAMENTO DE MICRO-ONDAS SOBRE OS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS E MICROBIOLÓGICOS DO LEITE DE VACA COMO ALTERNATIVA A PASTEURIZAÇÃO CONVENCIONAL

## EFFECT OF MICROWAVE TREATMENT ON THE PHYSICOCHEMICAL AND MICROBIOLOGICAL PARAMETERS OF COW'S MILK AS AN ALTERNATIVE TO CONVENTIONAL PASTEURIZATION

DOI: 10.65747/conali2025v3c09

Ana Beatriz Medeiros Araújo<sup>1</sup>; Julyana Cardoso Taveira<sup>2</sup>; Nayara Santos da Rocha<sup>3</sup>; Jordan Dias de Souza Silva<sup>4</sup>; Carolina Silva Santos<sup>5</sup>; Deyzi Santos Gouveia<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Estudante do Curso de Mestrado em Engenharia de Alimentos - CTRN – UFCG;

E-mail: anna.b15.abm@gmail.com

<sup>2</sup>Estudante do Curso de Mestrado em Engenharia de Alimentos - CTRN – UFCG;

E-mail: julyana.cardoso@estudante.ufcg.edu.br

<sup>3</sup>Estudante do Curso de Mestrado em Engenharia de Alimentos - CTRN – UFCG;

E-mail: nayarasntsrocha@gmail.com

<sup>4</sup>Estudante do Curso de Mestrado em Engenharia de Alimentos - CTRN – UFCG;

E-mail: jordandias@outlook.com

<sup>4</sup>Estudante do Curso de Mestrado em Engenharia de Alimentos - CTRN – UFCG;

E-mail: carolinasilvaxx@gmail.com

<sup>5</sup>Docente do Depto de Engenharia de Alimentos – CTRN – UFCG;

E-mail: deyzigouveia2012@gmail.com

**Resumo:** Este estudo avaliou os efeitos microbiológicos e físico-químicos do leite cru bovino submetido à pasteurização convencional lenta (65 °C/30 min) e tratamento por micro-ondas, aplicando diferentes combinações de tempo e potência, em delineamento fatorial 2<sup>2</sup> com três pontos centrais. As amostras foram analisadas quanto à contagem de microrganismos mesófilos totais e bactérias ácido-láticas, além de parâmetros como gordura, proteína, lactose, densidade, pH, condutividade elétrica e sais minerais. A pasteurização convencional foi a única capaz de eliminar totalmente a carga microbiana. Entre os tratamentos por micro-ondas, o T4 (420 W/120 s) destacou-se por promover expressiva redução microbiológica e preservar a integridade dos constituintes do leite, apresentando desempenho próximo ao tratamento convencional. Em contrapartida, o T2 (140 W/120 s) mostrou-se o menos eficaz, com perda significativa de sólidos e baixa redução da carga microbiana. As alterações observadas em condutividade elétrica e pH

indicam modificações estruturais nas biomoléculas. Conclui-se que a tecnologia de micro-ondas é promissora como alternativa à pasteurização convencional, desde que os parâmetros de tempo e potência sejam cuidadosamente ajustados.

**Palavras-chave:** bactérias lácticas; qualidade do leite; tecnologias emergentes

**Abstract:** This study evaluated the microbiological and physicochemical effects of slow conventional pasteurization (65 °C/30 min) and microwave treatment in raw cow's milk, using a 2<sup>2</sup> factorial design with three central points, varying time and power combinations. Samples were analyzed for total mesophilic microorganisms and lactic acid bacteria, as well as fat, protein, lactose, density, pH, electrical conductivity, and mineral content. Conventional pasteurization was the only method to fully eliminate microbial load. Among microwave treatments, T4 (420 W/120 s) was the most effective, significantly reducing microbial counts while preserving milk quality, showing performance similar to the conventional method. In contrast, T2 (140 W/120 s) was the least effective, with losses in nutritional components and limited microbial reduction. Variations in pH and conductivity indicated structural changes in biomolecules. Microwave-assisted pasteurization presents itself as a promising alternative, provided that time and power settings are properly optimized.

**Keywords:** lactic acid bacteria; milk quality; emerging technologies

## INTRODUÇÃO

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de leite de vaca(1). Atualmente, o país conta com mais de 1 milhão de propriedades produtoras de leite, no entanto, a Secretaria de Política Agrícola projeta que, para 2030, devam permanecer os produtores mais eficientes, que se adaptarem à nova realidade de adoção de tecnologia, melhorias na gestão e maior eficiência técnica e econômica (2).

Entende-se por leite, sem outra especificação, o produto oriundo da ordenha completa, e ininterrupta, em condições de higiene, de vacas sadias, bem alimentadas e descansadas (3). Assim sendo, o leite é uma combinação de inúmeros elementos sólidos diluídos em água, constituído de lipídios, carboidratos, proteínas, sais minerais e vitaminas. Esses elementos estão associados a vários fatores que alteram sua qualidade, como clima, manejo, condições higiênico-sanitárias, nutrição, temperatura de armazenagem e transporte do leite, bem-estar animal e presença de doenças no rebanho (4). A qualidade do leite é uma grande preocupação da indústria alimentícia, dado o cumprimento das norma-exigências nutricionais e especificações sanitárias (5).

O processamento térmico dos alimentos tem como objetivo fornecer produtos seguros e de alta qualidade, diante disso, essa técnica visa aquecer o alimento até a temperatura de processamento e manter por tempo suficiente para atingir a extensão desejada de inativação microbiana e/ou enzimática, antes de ser resfriado (6). Assim, o processamento térmico é caracterizado por binômio tempo-temperatura, o qual é determinado considerando um alvo biológico específico, que por sua vez, pode ser um

microrganismo (deteriorante ou patógeno) ou uma enzima indesejável no produto alimentício (7).

De acordo com o Art. 255 do RIISPOA, “entende-se por pasteurização o tratamento térmico aplicado ao leite com objetivo de evitar perigos à saúde pública decorrentes de micro-organismos patogênicos eventualmente presentes, e que promove mínimas modificações químicas, físicas, sensoriais e nutricionais” (8).

Dentre os sistemas de pasteurização, a lenta é a mais apropriada para este caso, pois é uma técnica simples e barata, e consiste no aquecimento do leite a 62 - 65°C por 30 minutos, seguido de resfriamento a 4°C e envase. Equipamentos alternativos de comprovada eficiência podem colaborar na viabilização do uso da pasteurização lenta, transformando pequenos produtores em microempresários e colaborando para a formalização do comércio de leite fluido, chegando a viabilizar a comercialização em feiras de produtores rurais (9).

Na última década, o aquecimento de alimentos líquidos em fluxo contínuo (pasteurização e esterilização comercial) assistido por micro-ondas tem se mostrado promissor em estudos por causa das vantagens da tecnologia em relação aos métodos convencionais, uma das principais é sob a ótica de inativação microbiana (10).

O micro-ondas é um método para a preservação da qualidade dos alimentos (11,12). Um forno de micro-ondas convencional passa radiação de micro-ondas ionizante a uma frequência de 2,45 GHz (122 mm) através de alimentos que causam aquecimento dielétrico do moléculas polares (água, açúcar, entre outras), o que favorece a absorção e dispersão de calor favorecendo a eliminação de microrganismos (13,14). Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a eficácia da pasteurização assistida por micro-ondas na redução da carga microbiana de leite cru de vaca, comparando-a com o método convencional de pasteurização e analisando os efeitos de ambos os tratamentos sobre as características físico-químicas e microbiológicas.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Engenharia de Alimentos (LEA), pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Campina Grande-PB.

### **Matéria-prima**

O leite de vaca cru foi obtido com um produtor rural da cidade de Lagoa Seca - PB, armazenado em temperatura  $\leq 4^{\circ}\text{C}$ , máximo 24 horas). As amostras foram submetidas ao processamento térmico no micro-ondas da marca Philco (PMO38E).

### **Planejamento Fatorial**

Para avaliar a influência do tratamento de micro-ondas nas propriedades microbiológicas e físico-químicas do leite, foi utilizado um planejamento fatorial  $2^2+3$ , onde os fatores investigados foram a potência e o tempo do tratamento. A amostra T0 serviu como controle negativo, sem aplicação de tratamento térmico, e a amostra T8 foi submetida à pasteurização convencional em fogão doméstico, a  $65^{\circ}\text{C}$  por 30 minutos. Os dados relacionados ao planejamento fatorial estão dispostos na Tabela 1.

**Tabela 1.** Planejamento Fatorial da pasteurização do leite.

Tratamento	Potência (W)	Tempo (s)	Nível codificado (Potência)	Nível codificado (Tempo)
T0	–	–	–	–
T1	140	40	-1	-1
T2	140	120	-1	+1
T3	420	40	+1	-1
T4	420	120	+1	+1
T5	280	80	0	0
T6	280	80	0	0
T7	280	80	0	0
T8	–	–	–	–

T0= controle negativo; T8= pasteurização convencional

### **Análises Microbiológicas**

As amostras foram analisadas quanto à contagem de microrganismos mesófilos aeróbios totais por meio da técnica de semeadura em superfície, utilizando o meio Plate Count Agar (PCA). Alíquotas de 0,1 mL das amostras e de suas diluições decimais foram inoculadas em placas de Petri contendo 15 a 20 mL de meio PCA. As placas foram incubadas invertidas a  $35 \pm 1^\circ\text{C}$  por 48 horas. Após o período de incubação, foram contadas as unidades formadoras de colônia (UFC) nas placas que apresentaram de 25 a 250 colônias, expressando-se os resultados em UFC/mL (15).

As amostras também foram submetidas à análise microbiológica para determinação de contagem de bactérias lácticas (BAL) que teve como objetivo quantificar a população de microrganismos benéficos presentes nas amostras tratadas a partir do tratamento térmico do micro-ondas, da pasteurização e das amostras sem tratamento, utilizando a técnica de contagem em placas. As amostras foram submetidas a diluições em série decimal, sendo utilizadas neste estudo as diluições de  $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$ , e  $10^{-3}$ , e semeadas em meio MSR Àgar para bactérias ácido-láticas, seguido de incubação a  $35^\circ\text{C}$  por 48 horas em condições anaeróbias. Após o período de incubação, as colônias características foram contadas e os resultados expressos em unidades formadoras de colônia por mililitro (UFC/mL) (16).

### **Análises Físico-químicas**

Para essas análises foi utilizado o equipamento EkoMilk, analisador de leite ultrassônico portátil, para análises precisas e rápidas (90 segundos) de gordura e outros parâmetros de qualidade. Abrange amostras de leite cru, pasteurizado, UHT, desnatado, homogeneizado, padronizado e integral. As análises também foram realizadas em triplicata, em que os parâmetros analisados foram Gordura (G), Sólidos (S), Densidade (D), Proteínas (P), Lactose (L), Sais (S1), Condutividade (C) e pH.

### **Análise Estatística**

Para os resultados das análises microbiológicas e físico-químicas foi utilizado o programa computacional Statistica 12.0, com delineamento fatorial casualizados com três repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e a comparação de médias se realizou pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 estão dispostos os dados obtidos a partir das contagens médias de microrganismos mesófilos aeróbios totais e de bactérias lácticas (BAL) no leite cru e submetido a diferentes tratamentos térmicos, expressas em  $\log_{10}$  UFC/mL

**Tabela 2.** Contagem microbiológica nos tratamentos obtidos.

TRATAMENTO	MESÓFILOS ( $\log_{10}$ UFC/mL)	BACTÉRIAS LÁCTICAS ( $\log_{10}$ UFC/mL)
0	4,49 $\pm$ 1,45 <sup>a</sup>	3,15 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup>
1	5,94 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup>	4,49 $\pm$ 1,45 <sup>a</sup>
2	3,11 $\pm$ 0,03 <sup>ab</sup>	3,30 $\pm$ 0,00 <sup>a</sup>
3	5,59 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup>	3,34 $\pm$ 0,3 <sup>a</sup>
4	2,47 $\pm$ 0,17 <sup>ab</sup>	3,16 $\pm$ 0,4 <sup>a</sup>
5	3,06 $\pm$ 0,00 <sup>ab</sup>	3,27 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup>
6	4,52 $\pm$ 1,45 <sup>a</sup>	3,26 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup>
7	3,47 $\pm$ 0,71 <sup>ab</sup>	3,26 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup>
8	< 1,0	< 1,0
DMS	4,08	2,87
Erro	0,73	0,51

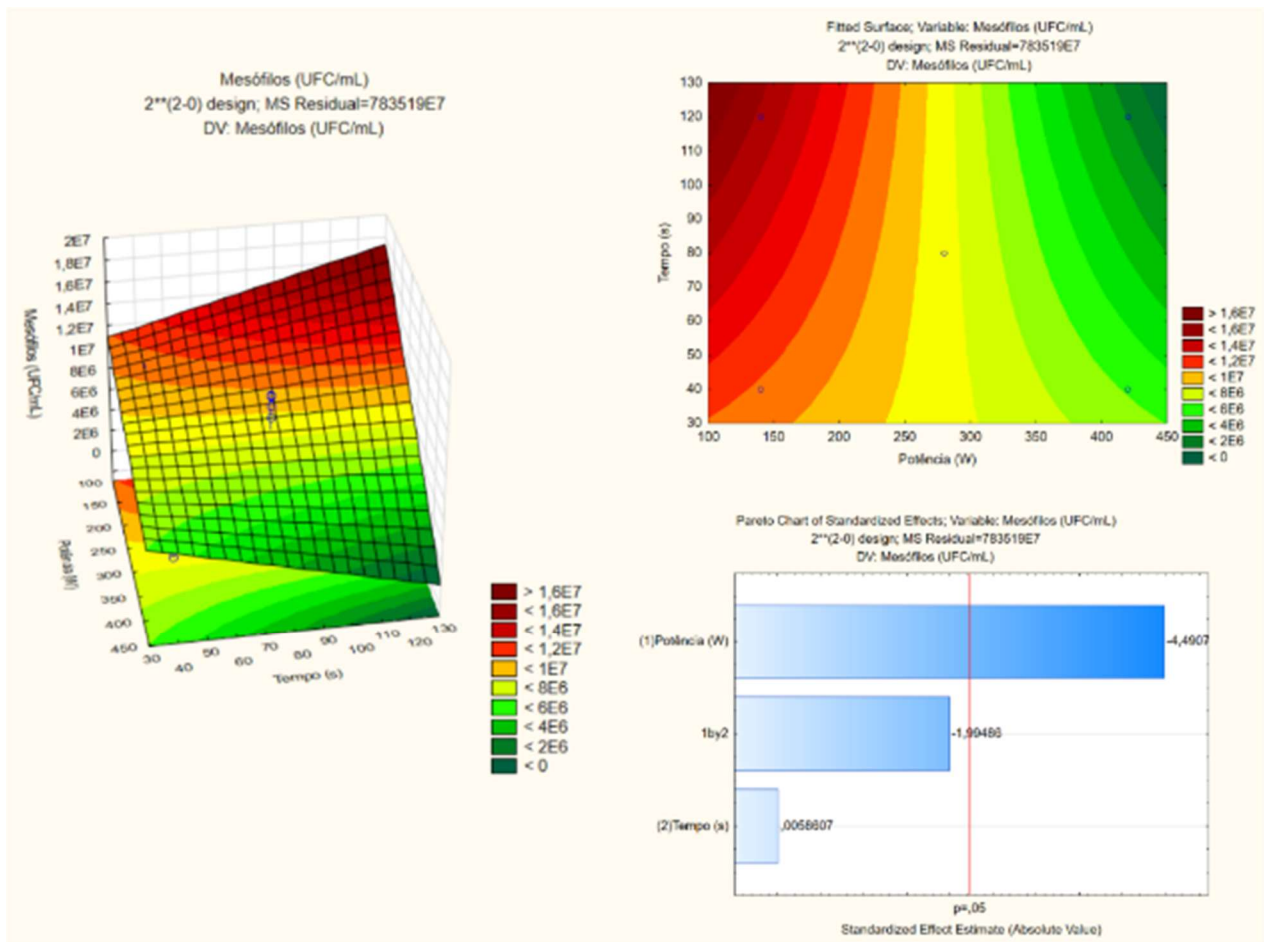
\*Valores expressos em  $\log_{10}$  (UFC/mL). Média  $\pm$  desvio padrão. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem significativamente, conforme teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

O leite cru (T0) apresentou uma carga microbiana elevada (4,49  $\pm$  1,45 log UFC/mL), valor compatível com a natureza perecível do leite e com a ausência de qualquer tratamento térmico. Essa contagem reforça a importância da higienização na ordenha e no manejo pós-colheita, uma vez que a flora mesófila é amplamente utilizada como indicador de qualidade microbiológica e higiene no processamento de alimentos lácteos (17).

O tratamento térmico mais eficaz na redução da carga microbiana foi a pasteurização do leite (T8), com valor abaixo do limite de detecção (1,0 log UFC/mL), demonstrando efetiva eliminação das populações mesófilas e de bactérias lácticas. Esse resultado era esperado, já que a pasteurização convencional promove aquecimento a 65°C, resultando em desnaturação irreversível de proteínas essenciais ao metabolismo bacteriano, além de destruição da membrana celular (18).

Na Figura 1 estão dispostos os gráficos de superfície de resposta, curvas de contorno e Pareto para a interação do micro-ondas e suas variáveis (potência e tempo) com a contagem de microrganismos mesófilos aeróbios.

Figura 1 – Efeito do tratamento de micro-ondas sobre a contagem de mesófilos (UFC/mL).



Fonte: Autores (2025).

A análise gráfica dos efeitos dos tratamentos por micro-ondas sobre a contagem de microrganismos mesófilos revelou comportamentos distintos conforme a combinação de tempo e potência aplicados. A superfície de resposta e o gráfico de contorno indicam uma clara tendência de redução da carga microbiana com o aumento da potência e do tempo de exposição, sendo os menores valores observados na região de maior potência (acima de 350 W) e tempo prolongado (acima de 100 s), evidenciada pelas áreas em verde no gráfico.

Por outro lado, os tratamentos localizados na faixa de baixa potência (140 W) e curto tempo (40 s), como T1 e T3, situam-se nas regiões com maior concentração de microrganismos, representadas pelas áreas em vermelho, sugerindo que essas condições não foram suficientes para inativar a microbiota, podendo inclusive ter favorecido seu crescimento. Isso reforça a hipótese de que o tempo insuficiente e a baixa intensidade térmica podem ter proporcionado condições inadequadas de tratamento, além de possíveis efeitos como ativação de microbiota subletal ou contaminação pós-processamento como observado em Zhao *et al.* (19), onde *Enterococcus faecium* resistiu a 50 °C por até 2 horas.

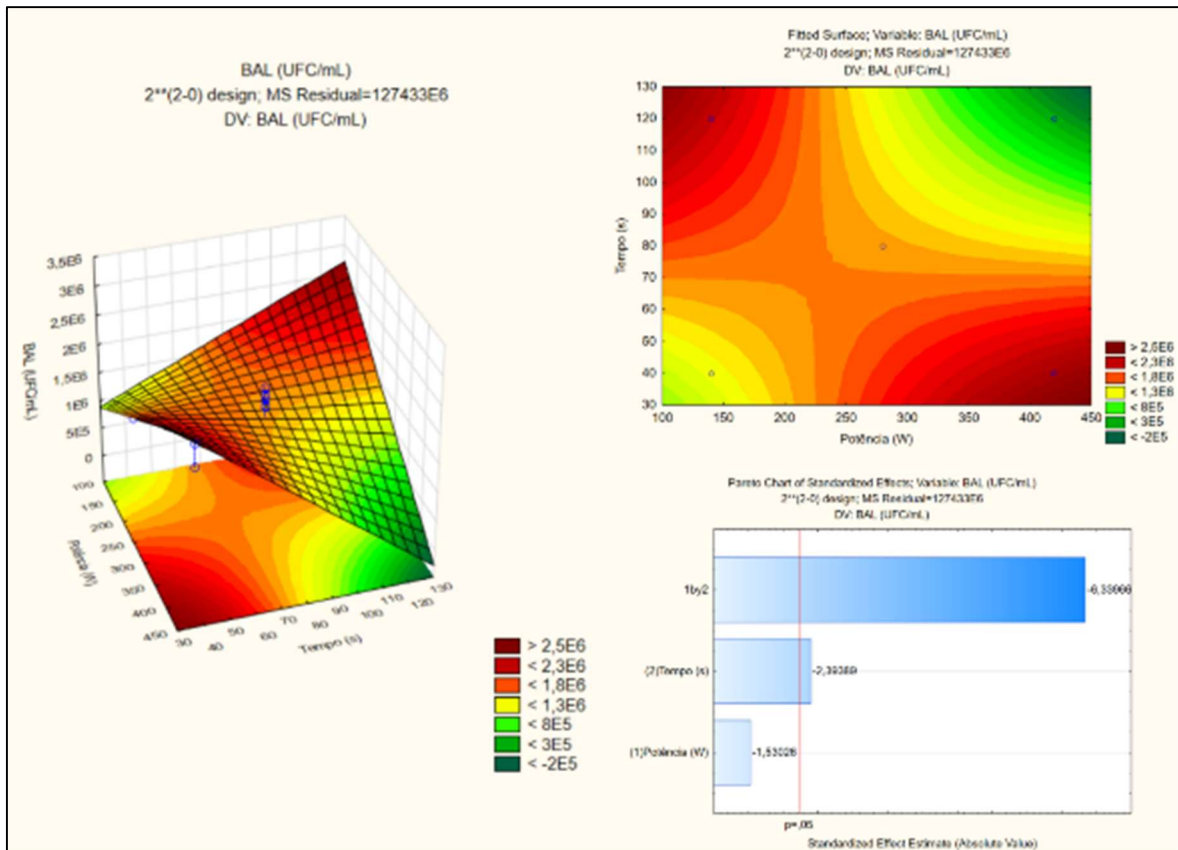
O gráfico de Pareto evidencia que a potência aplicada foi o fator mais significativo ( $p < 0,05$ ) na redução da contagem de mesófilos, seguido pela interação entre tempo e potência, enquanto o tempo isoladamente teve efeito desprezível. Esses achados demonstram que a eficácia do tratamento por micro-ondas depende principalmente da intensidade da energia aplicada, sendo a potência o parâmetro mais determinante para o controle microbiológico.

Esses resultados ressaltam a necessidade de otimização dos parâmetros técnicos de micro-ondas, como potência, tempo e tipo de recipiente, para garantir a eficácia do tratamento térmico e a segurança microbiológica do produto final. Essa limitação já é apontada por diversos autores como um dos principais desafios na aplicação do micro-ondas para alimentos líquidos. Wang *et al.* (20), ao avaliarem a dinâmica microbiana de leite pasteurizado durante o armazenamento, também evidenciaram que certas bactérias, sobretudo lácticas como *Weissella* e *Lactococcus*, persistem mesmo após o tratamento térmico, podendo inclusive se multiplicar durante o armazenamento sob refrigeração em que condições de recipiente.

Quanto às bactérias lácticas, a tendência observada foi semelhante: o tratamento com fervura foi o único com valor abaixo do limite de detecção (1,0 log UFC/mL). Nos demais tratamentos, inclusive no leite cru, as contagens mantiveram-se elevadas (de 3,15 a 4,49 log UFC/mL), com ausência de diferença estatística significativa entre eles ( $p > 0,05$ ). Isso indica que, apesar de submetidos ao aquecimento, os tratamentos por micro-ondas não foram suficientes para inativar as BAL de forma efetiva. A resistência de bactérias lácticas a processos térmicos moderados é amplamente relatada e pode ser atribuída à sua estrutura celular e ao fato de muitas estarem adaptadas ao ambiente lácteo. Zhao *et al.* (19) reportaram o isolamento de espécies como *Lactobacillus plantarum* e *Streptococcus thermophilus* em leite pasteurizado comercial, indicando que parte da microbiota benéfica pode resistir ao tratamento térmico, desde que não seja excessivamente severo.

Na Figura 2 estão dispostos os gráficos de superfície de resposta, curvas de contorno e Pareto para a interação do micro-ondas e suas variáveis (potência e tempo) com a contagem de bactérias ácido-lácticas.

Figura 2 – Efeito do tratamento de micro-ondas sobre a contagem de BAL (UFC/mL).



Fonte: Autores (2025).

A avaliação da contagem de bactérias ácido-láticas (BAL) em função do tratamento por micro-ondas, utilizando diferentes combinações de tempo e potência, revelou uma forte dependência da interação entre essas variáveis. A análise da superfície de resposta (gráfico 3D) indicou que as menores concentrações de BAL foram obtidas quando se aplicaram simultaneamente altos níveis de potência (acima de 400 W) e tempos prolongados de exposição (acima de 110 segundos). Nessa condição, observou-se uma significativa redução microbiana, evidenciada pela região verde da superfície, indicando eficácia do tratamento térmico na inativação das bactérias ácido-láticas. Por outro lado, quando a potência e o tempo foram aplicados de forma isolada ou desequilibrada, especialmente em níveis intermediários, a contagem de BAL foi elevada, como demonstrado pelas áreas em vermelho e laranja, sugerindo que essas condições podem ter sido insuficientes para promover a desnaturação térmica adequada das células microbianas.

O gráfico de contorno reforça essa tendência, destacando que a região de menor contagem de BAL concentra-se no canto superior direito do plano (alta potência e tempo), enquanto as maiores concentrações ocorrem em regiões com potência ou tempo insuficientes. Esse padrão sugere que a inativação efetiva das BAL exige não apenas um nível elevado de um dos fatores, mas a combinação simultânea de ambos para que a transferência de calor seja eficiente e uniforme. Tal comportamento pode estar relacionado ao modo de aquecimento característico do micro-ondas, no qual a geração de calor ocorre por fricção molecular, sendo altamente sensível à distribuição de energia e ao tempo de exposição.

Complementando essa análise, o gráfico de Pareto demonstrou que a interação entre tempo e potência foi o fator mais significativo ( $p < 0,05$ ), apresentando o maior efeito padronizado negativo sobre a contagem de BAL, evidenciando a importância de se otimizar a aplicação simultânea dos dois parâmetros. O tempo de exposição isoladamente também teve efeito significativo na redução microbiana, ao passo que a potência, de forma individual, não apresentou impacto estatisticamente relevante. Esses dados indicam que o tempo é um fator crítico no processo, e que seu efeito é potencializado quando combinado adequadamente com a intensidade da potência aplicada.

Ao comparar os resultados obtidos para a contagem de microrganismos mesófilos totais e bactérias ácido-láticas (BAL) frente aos diferentes tratamentos por micro-ondas, observa-se um comportamento microbiológico distinto entre os dois grupos. A superfície de resposta e o gráfico de contorno para os mesófilos evidenciaram uma redução mais pronunciada com o aumento da potência e do tempo de exposição, especialmente em regiões onde ambos os fatores foram aplicados em níveis elevados. Essa tendência também se manteve para as BALs; no entanto, a análise dos gráficos de Pareto revela uma diferença importante: enquanto a potência foi o principal fator responsável pela redução de mesófilos, a variável mais relevante na redução das BALs foi o tempo, além da interação entre tempo e potência, que apresentou efeito altamente significativo.

Essa diferença pode ser explicada pela maior termorresistência das BALs, característica comum entre os gêneros predominantes nesse grupo, como *Lactobacillus*, *Lactococcus* e *Enterococcus*, que possuem mecanismos adaptativos ao estresse térmico, incluindo a produção de proteínas de choque térmico e alterações na membrana celular, como é dito por Gao *et al.* (21). Dessa forma, as BALs exigem condições térmicas mais severas (ou mais prolongadas) para serem efetivamente inativadas, o que justifica o papel mais relevante do tempo como fator isolado no seu controle. Já os microrganismos mesófilos totais incluem uma variedade mais ampla de bactérias, muitas das quais são menos resistentes ao calor, sendo mais facilmente inativadas mesmo com exposições de menor duração, desde que a potência seja suficiente para gerar picos térmicos.

Do ponto de vista tecnológico e funcional, essa diferença de sensibilidade térmica entre os grupos microbianos pode ser considerada vantajosa, especialmente em produtos onde a preservação de microrganismos benéficos é desejada. A possibilidade de aplicar condições que inativem contaminantes mesófilos indesejáveis, ao mesmo tempo em que se preserva parte da microbiota láctica, é de particular interesse em sistemas fermentativos ou em alimentos minimamente processados com apelo funcional. O tratamento por micro-ondas, ao oferecer uma forma de aquecimento mais rápida e seletiva, pode ser explorado justamente para essa finalidade, desde que haja controle rigoroso das condições operacionais a fim de garantir a uniformidade térmica e a segurança microbiológica.

Portanto, a análise conjunta dos gráficos demonstra que a eficácia da inativação microbiana depende não apenas dos parâmetros físicos aplicados, mas também da composição microbiana e da resistência intrínseca dos grupos-alvo. A escolha dos parâmetros de tempo e potência deve considerar esses aspectos, podendo inclusive ser ajustada conforme o objetivo tecnológico, seja a completa esterilização, seja a seleção positiva de microbiota desejável.

Foram analisadas variáveis físico-químicas essenciais para a qualidade do leite, incluindo gordura, sólidos não gordurosos, densidade, proteínas, lactose, sais, condutividade elétrica e pH. Os resultados revelaram diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) para a maioria das variáveis, com exceção dos sais, conforme demonstrado na tabela 3.

A gordura é um dos principais componentes do leite, responsável não apenas pelo valor energético, mas também por características sensoriais importantes, como sabor e textura. Os valores de gordura variaram entre 4,32% (T2 – 140W/120s) e 4,73% (T8 – pasteurização convencional a 65 °C por 30 minutos). O menor teor observado em T2 pode estar associado à separação de fases ou degradação dos triglicerídeos durante o aquecimento prolongado em baixa potência. Já o maior valor em T7 indica que o tratamento convencional foi mais eficiente em preservar os glóbulos de gordura, resultado consistente com o que se observa na literatura, onde métodos mais suaves de pasteurização são associados a menor

**Tabela 3.** Caracterização físico-química dos tratamentos avaliados.

TRAT	VARIÁVEIS							
	Gordura (%)	SNG (%)	Densidade (Kg/L)	Proteína (%)	Lactose (%)	Sais (%)	C (mS/cm)	pH
0	4,47bc	8,36bc	1027,65ab	2,96ab	4,41abc	0,66a	5,24bc	6,66ab
1	4,46bc	8,42bc	1027,92ab	2,97ab	4,45abc	0,67a	5,04c	6,64b
2	4,32c	8,17c	1027,06b	2,88b	4,31c	0,65a	5,21bc	6,63bc
3	4,50bc	8,37bc	1027,76ab	2,97ab	4,43abc	0,67a	5,34b	6,60d
4	4,55ab	8,54ab	1028,26a	3,04a	4,50a	0,68a	5,24bc	6,64b
5	4,43bc	8,24bc	1027,26b	2,91b	4,35bc	0,65a	5,74a	6,60cd
6	4,47bc	8,37bc	1027,70ab	2,96ab	4,42abc	0,67a	5,10bc	6,59d
7	4,45	8,30bc	1027,48ab	2,93b	4,38abc	0,66a	5,42b	6,59d
8	4,73a	8,77 <sup>a</sup>	1028,49a	3,04a	4,50ab	0,68a	5,33b	6,69a
<b>DMS</b>	0,19	0,30	0,97	0,10	0,15	0,04	0,27	0,03
<b>Erro</b>	0,04	0,06	0,19	0,02	0,03	0,009	0,05	0,006

**Legenda:** SNG – sólidos não gordurosos; C – condutividade. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem significativamente, conforme teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

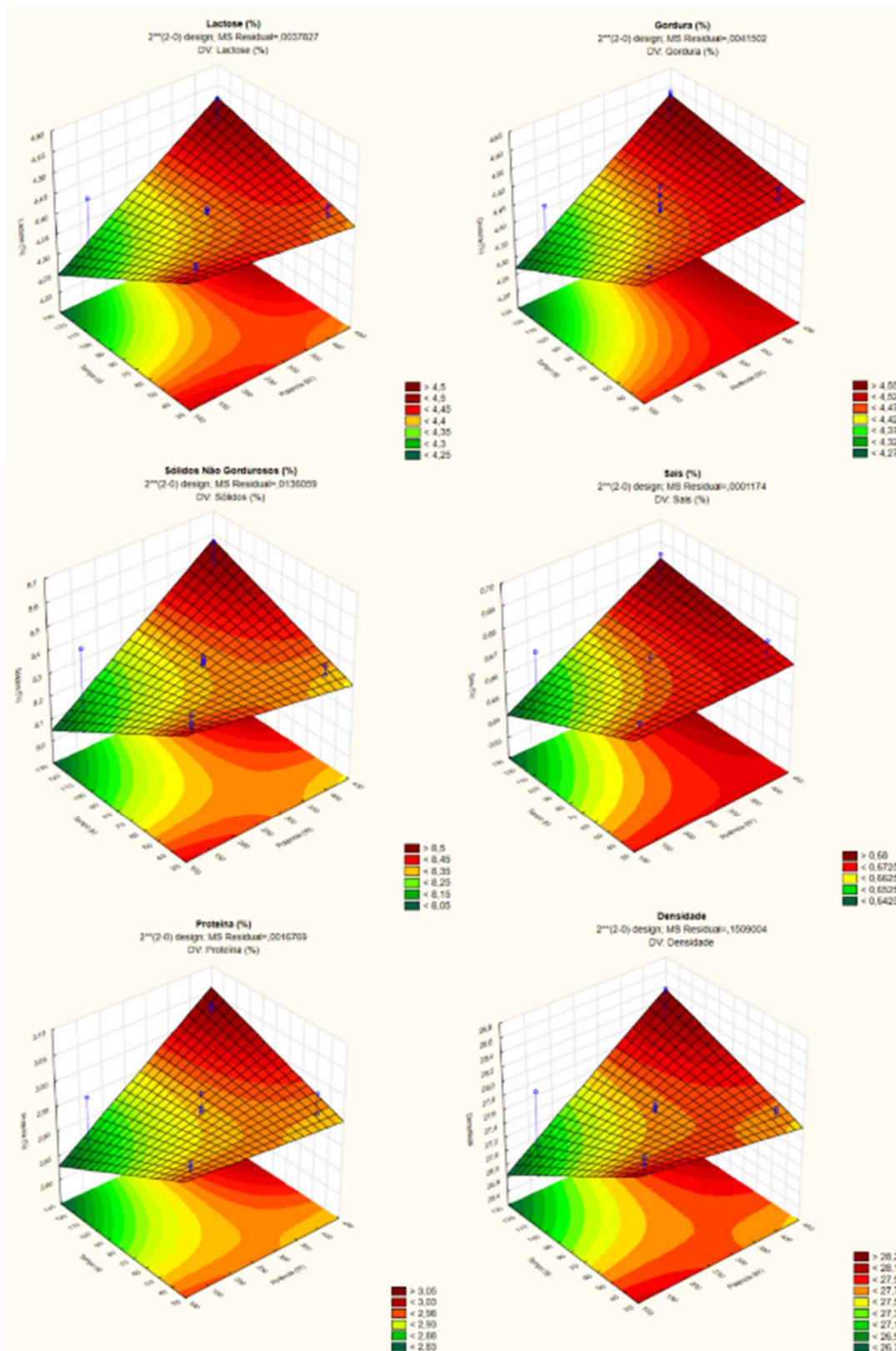
A gordura é um dos principais componentes do leite, responsável não apenas pelo valor energético, mas também por características sensoriais importantes, como sabor e textura. Os valores de gordura variaram entre 4,32% (T2 – 140 W/120 s) e 4,73% (T8 – pasteurização convencional a 65 °C por 30 minutos). O menor teor observado em T2 pode estar associado à separação de fases ou à degradação dos triglicerídeos devido ao aquecimento prolongado em baixa potência, que pode não ter gerado calor suficiente para romper a estrutura da emulsão, mas o bastante para promover instabilidade físico-química. Por outro lado, o maior valor observado em T8 indica que a pasteurização convencional, embora envolva um tempo mais longo, promoveu uma distribuição térmica mais uniforme e controlada, contribuindo para a

preservação dos glóbulos de gordura e minimizando a separação de fases. Isso é consistente com a literatura, que mostra que métodos térmicos contínuos e bem controlados, mesmo mais prolongados, podem ser mais eficientes na manutenção da estrutura lipídica em comparação com processos intermitentes ou de aquecimento não homogêneo, como ocorre frequentemente no micro-ondas (22).

Os sólidos não gordurosos (SNG) compreendem todos os constituintes do leite, exceto a gordura e a água, incluindo proteínas, lactose, sais minerais e outras substâncias dissolvidas, sendo um parâmetro importante para avaliar a densidade nutricional e a estabilidade físico-química do produto. Os valores observados neste estudo variaram entre 8,17% (T2 – 140 W/120 s) e 8,77% (T8 – pasteurização convencional a 65 °C por 30 minutos). A menor concentração verificada no tratamento T2 pode estar relacionada à instabilidade promovida pelo aquecimento prolongado e de baixa potência, que pode ter favorecido reações químicas como a desnaturação proteica ou degradação de carboidratos, além de possíveis perdas por evaporação localizada em um sistema de aquecimento não uniforme. Em contraste, o maior teor observado em T8 indica que o tratamento convencional, apesar do longo tempo de exposição, proporcionou um aquecimento mais gradual e uniforme, contribuindo para a preservação da fração solúvel do leite.

Na Figura 3 está disposto o comportamento geral das variáveis gordura, sólidos não gordurosos, densidade, proteína, sais e lactose.

Figura 3 – Comportamento dos parâmetros químicos e físicos ao tratamento de micro-ondas.



Fonte: Autores (2025).

A densidade, parâmetro diretamente influenciado pelo teor de sólidos não gordurosos, apresentou comportamento semelhante, com valores variando de 27,06 °D (T2) a 28,49 °D (T8), reforçando a tendência observada. De acordo com Abd El-Gawad *et al.* (23), a pasteurização por micro-ondas pode tanto preservar quanto comprometer os sólidos não gordurosos, dependendo do equilíbrio entre tempo e potência. Isso

sugere que, embora os tratamentos com micro-ondas ofereçam vantagens em termos de rapidez, a calibração inadequada dos parâmetros pode comprometer a integridade dos constituintes solúveis do leite.

No que diz respeito às proteínas, principalmente caseínas e proteínas do soro, os valores variaram de 2,88% (T2) a 3,04% (T4 e T8). A redução em T2 sugere ocorrência de desnaturação ou precipitação proteica, o que é coerente com os gráficos de resposta, que mostram menores concentrações nas regiões de baixa potência, mesmo com tempos prolongados. Por outro lado, T4 (420 W/120 s), representando uma combinação eficaz de potência e tempo, apresentou o mesmo teor de proteína que o tratamento convencional (T8), indicando que o micro-ondas, quando corretamente ajustado, pode preservar essas biomoléculas. Esse resultado está alinhado com os achados de Anese *et al.* (24) e Yang *et al.* (25), que ressaltam que o micro-ondas de baixa potência por longos períodos tende a alterar a estrutura das proteínas, enquanto o aquecimento rápido e uniforme pode minimizar tais efeitos.

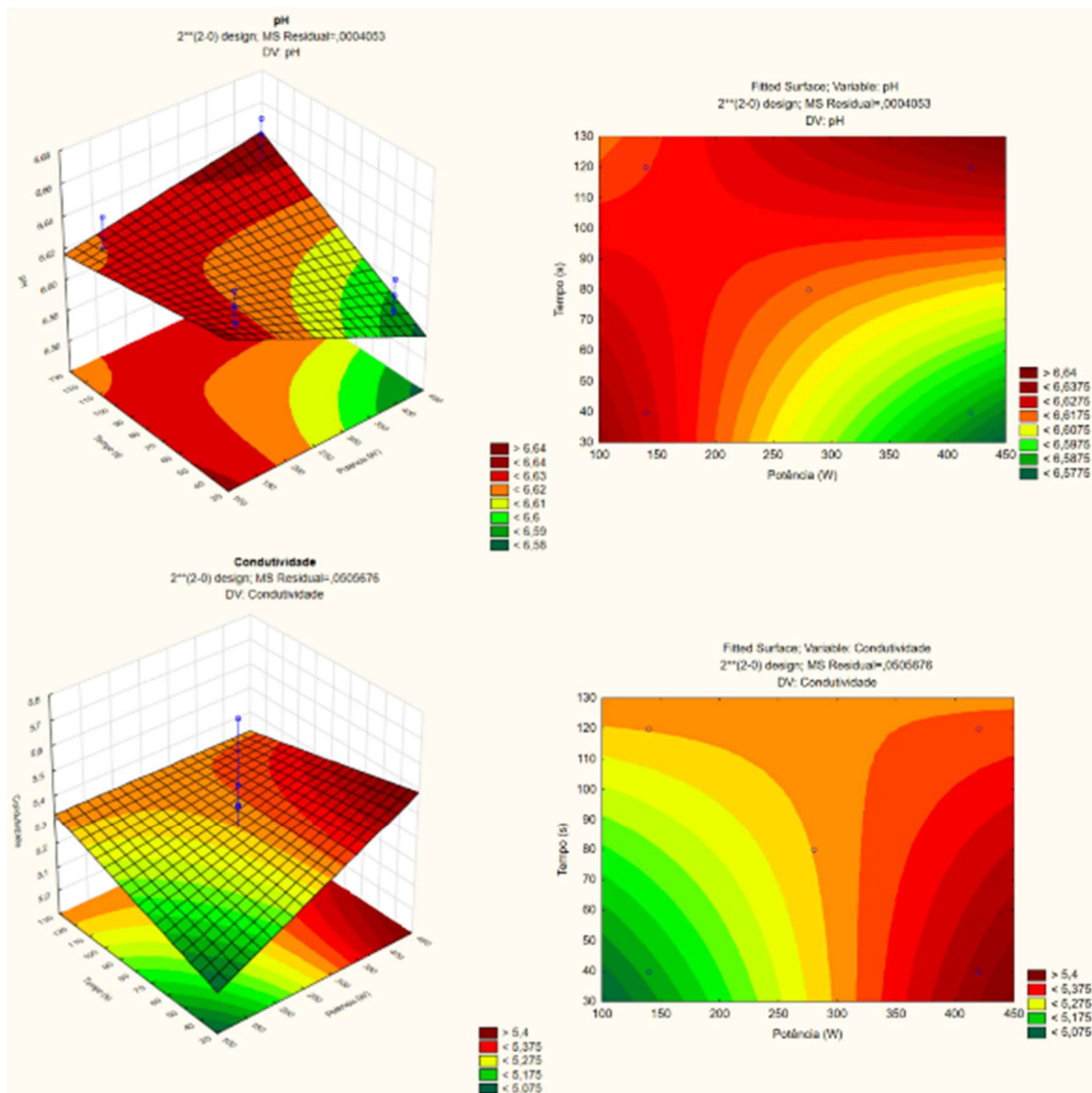
A lactose, principal carboidrato do leite, apresentou variações de 4,31% (T2) a 4,50% (T4 e T7), resultado também explicado pelos gráficos, que indicam maior preservação da lactose em áreas de alta potência e tempo moderado. A redução em T2 pode estar associada à ocorrência de reações de Maillard, que consomem açúcares redutores sob ação térmica, especialmente em aquecimentos lentos e prolongados. A manutenção dos níveis de lactose em T4 e T7 sugere que tanto o tratamento micro-ondas eficiente quanto o processo convencional são eficazes na conservação desse carboidrato. Conforme Pan *et al.* (26), o micro-ondas pode desencadear reações de escurecimento não enzimático, dependendo da intensidade e da distribuição do calor, afetando a estabilidade da lactose.

Em relação à gordura, os gráficos indicam uma tendência de menor teor nas regiões de baixa potência e tempo prolongado (como T2), chegando a 4,32%, e maior teor em T8 (4,73%). A redução observada em T2 pode estar associada à separação de fases ou à degradação parcial dos triglicerídeos, o que compromete a estabilidade da emulsão lipídica. Por sua vez, o valor mais elevado em T8 mostra que o aquecimento convencional, mesmo sendo prolongado, confere melhor preservação da fração lipídica, possivelmente devido à distribuição térmica mais uniforme e à ausência de picos localizados, típicos de sistemas de micro-ondas.

Os sais minerais, representados por íons como cálcio, fósforo, sódio e potássio, mantiveram-se estáveis entre os tratamentos, com variações discretas de 0,65% a 0,68%, e sem diferenças estatisticamente significativas. Esse comportamento, confirmado visualmente no gráfico de superfície (que apresenta baixa amplitude de variação), indica que os sais são relativamente resistentes à ação térmica nas condições estudadas. Tal constatação está de acordo com os relatos de Silva *et al.* (27), que observaram estabilidade dos minerais em tratamentos térmicos moderados.

Na Figura 4 estão apresentados o comportamento dos parâmetros físico-químicos (condutividade elétrica e pH) na representação gráfica de superfície de resposta e curvas de contorno.

Figura 4 – Comportamento dos parâmetros físico-químicos ao tratamento de micro-ondas.



Fonte: Autores (2025).

A avaliação do pH do leite submetido aos diferentes tratamentos térmicos demonstrou variações sutis, mantendo-se dentro da faixa esperada para leite fresco (6,6 a 6,8), o que indica que os tratamentos não comprometeram a acidez natural do produto. Os valores variaram de 6,59 (T6 – 280 W/80 s) a 6,69 (T8 – pasteurização convencional), sendo o menor pH associado a tratamentos por micro-ondas com intensidade térmica intermediária. Os gráficos de superfície de resposta confirmam essa tendência, mostrando redução do pH nas regiões de potência e tempo moderados (aproximadamente entre 200 e 300 W e 70 a 100 s), e estabilidade em extremos de baixa ou alta energia térmica. Essa leve acidificação pode estar relacionada à formação de compostos ácidos derivados da quebra térmica de proteínas e açúcares, como ácidos orgânicos de cadeia curta e intermediária. De acordo com Yang *et al.* (25) e Zhang *et al.* (28), esse fenômeno é comum em tratamentos por micro-ondas mal calibrados, sendo necessário cuidado para evitar perdas na qualidade sensorial e tecnológica do leite.

Por outro lado, o tratamento T8, correspondente à pasteurização convencional, manteve o maior valor de pH (6,69), o que reforça a ideia de que esse processo preserva

melhor a estabilidade química do leite, sobretudo pela homogeneidade térmica e ausência de "hot spots", típicos do aquecimento por micro-ondas. Esse resultado também é condizente com os dados observados para a condutividade elétrica, que apresenta estreita relação com o estado das proteínas e a liberação de íons no meio.

A condutividade elétrica, indicativa da presença de íons livres (principalmente cálcio, sódio, potássio e fosfato), variou de 5,04 mS/cm (T1 – 140 W/30 s) a 5,74 mS/cm (T5 – 280 W/80 s). O pico em T5 sugere um grau mais intenso de desnaturação proteica, o que favorece a liberação de íons anteriormente complexados, especialmente cálcio ligado às caseínas. A visualização gráfica da superfície de resposta evidencia esse comportamento, com valores máximos de condutividade localizados na região central dos gráficos (280 W/80 s) e redução nas bordas, especialmente em potências muito baixas ou muito altas, associadas a aquecimento insuficiente ou muito rápido, respectivamente.

Choudhary e Saini (29) relatam que o aumento da condutividade em sistemas lácteos submetidos ao calor é frequentemente atribuído à dissociação de micelas de caseína e à liberação de sais solúveis, o que reforça os resultados observados neste estudo. Já os menores valores (T1 e T2) refletem pouca alteração estrutural na matriz proteica, indicando aquecimento leve e manutenção da integridade molecular. Esse resultado sugere que há uma janela térmica crítica onde as alterações estruturais atingem um pico, o que pode ser desejável ou indesejável dependendo do objetivo tecnológico.

A associação entre queda de pH e aumento da condutividade, observada especialmente nos tratamentos intermediários (como T5, T6 e T7), evidencia a ocorrência simultânea de reações químicas como desnaturação proteica, liberação de íons e possível formação de ácidos fracos. Tal correlação já foi discutida por Anese *et al.* (23) e reafirma a importância de se ajustar cuidadosamente os parâmetros de potência e tempo no uso de micro-ondas, a fim de preservar a estabilidade físico-química do leite e evitar transformações indesejadas.

## CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo indicam que a tecnologia de micro-ondas possui potencial real como alternativa à pasteurização convencional no processamento do leite, desde que sejam cuidadosamente otimizados os parâmetros de tempo e potência. O tratamento T4 (420 W por 120 s) destacou-se por apresentar desempenho microbiológico satisfatório, redução significativa da carga de microrganismos mesófilos e estabilidade físico-química comparável à obtida com o método tradicional (T7). Esse equilíbrio entre eficiência sanitária e preservação da qualidade nutricional reforça o potencial do uso de micro-ondas como um método viável e tecnologicamente promissor.

Por outro lado, tratamentos com baixa potência e longo tempo de exposição, como o T2 (140 W por 120 s), mostraram-se ineficazes, tanto no controle microbiológico quanto na preservação da composição do leite, acarretando perdas de gordura, lactose, proteínas e sólidos não gordurosos. A condutividade elétrica e o pH também se mostraram sensíveis às condições de tratamento, refletindo alterações estruturais importantes nas proteínas do soro e no equilíbrio ácido-base, respectivamente.

A resistência térmica observada nas bactérias ácido-láticas, mesmo em tratamentos mais intensos, destaca a possibilidade de manter parte da microbiota

benéfica no produto final, enquanto há eliminação de mesófilos deteriorantes — o que pode representar uma vantagem tecnológica em determinados contextos, como no desenvolvimento de produtos com características funcionais ou fermentadas.

Diante dos achados, conclui-se que a pasteurização assistida por micro-ondas é uma abordagem viável, desde que bem ajustada, apresentando vantagens potenciais em termos de tempo de processamento, economia de energia e preservação da qualidade do leite. Estudos futuros devem focar na modelagem térmica do aquecimento por micro-ondas, análise sensorial e avaliação da estabilidade durante o armazenamento, visando à consolidação dessa tecnologia como alternativa segura e eficiente na indústria de laticínios.

## REFERÊNCIAS

1. VILELA, D.; ANDRADE, R. G.; LEITE, J. L. B.; MAGALHÃES JUNIOR, W. C. P. Produção de leite no Cerrado: conjuntura e análises. In: HOTT, M. C.; ANDRADE, R. G.; MAGALHÃES JUNIOR, W. C. P. (org.). **Geotecnologias: aplicações na cadeia produtiva do leite**. Ponta Grossa: Atena, 2022. p. 77-81.
2. BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **MAPA do leite**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/producaoanimal/mapa-do-leite>. Acesso em: 20 jul. 2025.
3. BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Decreto nº 9.013, de 29 de março de 2017. Aprova o Regulamento da Inspeção Industrial e Sanitária de Produtos de Origem Animal (RIISPOA). **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 30 mar. 2017. Seção 1, p. 3-40.
4. EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Setor de leite deve ter cautela em 2022**. 2022. Disponível em: <https://revistagloborural.globo.com/Noticias/Criacao/Leite/noticia/2022/01/setor-de-leite-deve-ter-cautela-em-2022-avalia-embrapa.html>. Acesso em: 20 jul. 2025.
5. ZEBIB, H.; ABATEC, D.; WOLDEGIORGIS, A. Z. Qualidade nutricional e adulterantes de leite cru de vaca, pasteurizado e queijo caseiro coletado ao longo da cadeia de valor em três regiões da Etiópia. **Heliyon**, v. 9, e15922, 2023.
6. FELLOWS, P. J. **Food Processing Technology: principles and practices**. Amsterdam: Elsevier, 2009.
7. UBO, M. T. K.; BAICU, A.; ERDOGDU, F.; POÇAS, M. F. et al. Thermal processing of food: challenges, innovations and opportunities. A position paper. **Food Reviews International**, v. 39, n. 6, p. 3344-3369, ago. 2023.
8. BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Decreto nº 9.013, de 29 de março de 2017. Dispõe sobre a inspeção industrial e sanitária de produtos de origem animal. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 29 mar. 2017. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2017/decreto/d9013.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/decreto/d9013.htm). Acesso em: 2 jun. 2025.

9. STEFFENS, J.; AMORIN, S. G.; SOUZA, F. A.; FELICETTI, M. A.; BALLEEN, S. C. Estudo da distribuição de temperatura na pasteurização lenta de leite orgânico em tacho de aço inoxidável. **Revista Tecnológica**, v. 29, n. 2, p. 421–429, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/revtecnol.v29i2.51920>. Acesso em: 2 jun. 2025.
10. CHANDRASEKARAN, S.; RAMANATHAN, S.; BASAK, T. Microwave food processing: a review. **Food Research International**, v. 52, n. 1, p. 243-261, jun. 2013.
11. TORRENEGRA, R.; ROJAS, D.; VARGAS, R. et al. Microwave processing: current background and effects on the physicochemical and microbiological aspects of dairy products. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 18, n. 1, p. 67–83, 2019.
12. TREMONTE, P.; SORRENTINO, E.; PANNELLA, G. et al. Evolution of microbiological and chemical parameters during the ripening of traditional Italian sausages. **Food Control**, v. 38, p. 77–85, 2014.
13. SOOD, M.; JAN, A.; SOFI, S. A. et al. Non-thermal processing in food applications: a review. **International Journal of Food Sciences and Nutrition**, v. 66, n. 4, p. 445–459, 2015.
14. MARTINS, C. P. C.; CAVALCANTI, R. N.; COUTO, S. M. et al. Microwave processing: current background and effects on the physicochemical and microbiological aspects of dairy products. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 18, n. 1, p. 67–83, 2019.
15. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Compendium of Methods for the Microbiological Examination of Foods**. 5. ed. Washington, DC: APHA Press, 2015.
16. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 15214:1998 – Microbiology of food and animal feeding stuffs – Horizontal method for the enumeration of mesophilic lactic acid bacteria – Colony-count technique at 30 °C**. Geneva: ISO, 1998.
17. CELANO, G.; CALASSO, M.; COSTANTINO, G. et al. Effect of seasonality on microbiological variability of raw cow milk from Apulian dairy farms in Italy. **Microbiology Spectrum**, v. 10, n. 5, e00514-22, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1128/spectrum.00514-22>
18. HAAS, J.; KIM, B. J.; ATAMER, Z.; WU, C.; DALLAS, D. C. Effects of high-temperature, short-time pasteurization on milk and whey during commercial whey protein concentrate production. **Journal of Dairy Science**, v. 108, n. 1, p. 257-271, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25493> Acesso em: 2 jun. 2025.
19. ZHAO, J. et al. Microbial diversity analysis and isolation of thermoresistant lactic acid bacteria in pasteurized milk. **Scientific Reports**, v. 14, p. 29705, 2024.
20. WANG, Y. et al. The investigation of changes in bacterial community of pasteurized milk during cold storage. **Foods**, v. 13, n. 3, p. 451, 2024.
21. GAO, X.; KONG, J.; ZHU, H.; MAO, B.; CUI, S.; ZHAO, J. Lactobacillus, Bifidobacterium and Lactococcus response to environmental stress: mechanisms and application of cross-protection to improve resistance against

- freeze-drying. **Journal of Applied Microbiology**, v. 132, n. 2, p. 802-821, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/jam.15251>.
22. GUO, J. et al. Influence of microwave sterilization on the stability of milk fat globule membrane. **LWT – Food Science and Technology**, v. 144, p. 111208, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111208>.
  23. ABD EL-GAWAD, M. A. M. et al. Utilization of microwave pasteurization for milk: physicochemical properties and microbiological aspects. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 44, n. 4, e14398, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpp.14398>.
  24. ANSE, M. et al. Effect of microwave treatment on milk proteins: a review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 84, p. 74–85, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.11.004>.
  25. YANG, H. et al. Effects of microwave pasteurization on the functional properties of milk proteins. **Dairy**, v. 3, n. 3, p. 531–547, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/dairy3030035>.
  26. PAN, J. et al. Effects of microwave treatment on the Maillard reaction and nutrient loss in milk. **Food Chemistry**, v. 336, p. 127725, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127725>.
  27. SILVA, L. C. R. et al. Avaliação da estabilidade físico-química do leite submetido à pasteurização por micro-ondas. **Revista Instituto Laticínios Cândido Tostes**, Juiz de Fora, v. 75, n. 2, p. 95–104, 2020. DOI: <https://doi.org/10.14295/2238-6416.v75i2.914>.
  28. ZHONG, Y. et al. Structural and functional changes in milk proteins induced by microwave heating: a comprehensive analysis. **Foods**, v. 12, n. 1, p. 55, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12010055>.
  29. CHOUDHARY, R.; SAINI, G. K. Impact of microwave heating on milk: a review. **International Journal of Dairy Technology**, v. 68, n. 3, p. 369–378, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12216>.