



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS

IVAN VICENTE SEBASTIÃO JUNIOR

**EFEITO DA ESTIMULAÇÃO ELÉTRICA DE CARCAÇAS NO PROCESSO DE
MATURAÇÃO A SECO DE CARNE BOVINA**

CAMPINAS

2025

IVAN VICENTE SEBASTIÃO JUNIOR

**EFEITO DA ESTIMULAÇÃO ELÉTRICA DE CARCAÇAS NO PROCESSO DE
MATURAÇÃO A SECO DE CARNE BOVINA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia
de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas
como parte dos requisitos exigidos para a obtenção
do título de Mestre em Tecnologia de Alimentos.

Orientador: Dr. Sergio Bertelli Pflanzner Junior

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À
VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO
DEFENDIDA PELO ALUNO, E ORIENTADA
PELO PROF. DR. SERGIO BERTELLI
PFLANZER JUNIOR

CAMPINAS

2025

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Biblioteca da Faculdade de Engenharia de Alimentos
Gardenia Garcia Benossi - CRB 8/8644

Se21e Sebastião Junior, Ivan Vicente, 1981-
Efeito da estimulação elétrica de carcaças no processo de maturação a seco de carne bovina / Ivan Vicente Sebastião Junior. – Campinas, SP : [s.n.], 2025.

Orientador: Sergio Bertelli Pflanzner Junior.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Engenharia de Alimentos.

1. Estimulação elétrica. 2. Maturação seca. I. Pflanzner Junior, Sergio Bertelli, 1983-. II. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Faculdade de Engenharia de Alimentos. III. Título.

Informações complementares

Título em outro idioma: Effect of electrical stimulation of carcasses on the dry maturation process of beef

Palavras-chave em inglês:

Electric stimulation

Dry maturation

Área de concentração: Tecnologia de Alimentos

Titulação: Mestre em Tecnologia de Alimentos

Banca examinadora:

Sergio Bertelli Pflanzner Junior [Orientador]

Nara Regina Brandão Cônsolo

Flavio Luis Schmidt

Data de defesa: 20-02-2025

Programa de Pós-Graduação: Tecnologia de Alimentos

Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)

ODS: 9. Inovação e infraestrutura

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0009-0005-0299-5886>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/8688104394398632>

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Sergio Bertelli Pflanze Junior

Faculdade de Engenharia de Alimentos – Universidade Estadual de Campinas –

UNICAMP

Presidente

Profa. Dra. Nara Regina Brandão Cônsolo

Membro Titular

Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia – Universidade de São Paulo - USP

Prof. Dr. Flavio Luis Schmidt

Membro Titular

Faculdade de Engenharia de Alimentos – Universidade Estadual de Campinas –

UNICAMP

A Ata de Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertações/Teses e na Secretaria do Programa de Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

À Deus, à minha família
e a todas as pessoas que acreditaram que sou capaz.
Com carinho dedico.

“No que diz respeito ao empenho,
ao compromisso, ao esforço, à dedicação,
não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem feita ou não faz.”

Ayrton Senna

AGRADECIMENTOS

À minha esposa, **Josiane Sardella Godrim Sebastião** por sempre acreditar nos meus sonhos, objetivos e escolhas.

À minha filha, **Ana Stella Godrim Sebastião** por compartilhar sua energia e me fazer feliz todos os dias.

À minha família, pela paciência nos momentos de dificuldades, conselhos, compreensão durante minha caminhada de vida.

Ao meu orientador, **Prof. Dr. Sérgio Bertelli Pflanzner**, pelos ensinamentos, amizade, conselhos e acolhimento, por toda a resiliência e empatia nestes anos trabalhando juntos.

Aos colegas de trabalho e alunos, **Evelyn, Ana Paula, Nayara, Jonatã, Dyana, Flavio e Isabela** pela parceria, ensinamentos, amizade e conselhos nos momentos desta jornada.

À empresa **JBS SA**, na divisão Friboi de carne bovina, pela concessão dos espaços, da liberação dos materiais, da compra e transferências de carnes, da oportunidade de contar com a maior empresa do mundo do ramo e ainda ter a oportunidade de continuar aprendendo todos os dias no meu trabalho.

A **Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP** e seu corpo docente, discente e técnico, pelo apoio para realização dessa pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

RESUMO

O setor industrial de carne bovina tem adotado técnicas para melhorar os atributos sensoriais desse alimento, como o uso da estimulação elétrica de carcaças e da maturação. A estimulação elétrica promove a quebra de proteínas miofibrilares por meio da corrente elétrica, enquanto a maturação utiliza enzimas endógenas do tecido muscular para degradar as fibras musculares. A maturação pode ser aplicada por dois processos, via úmida, uma prática de menor custo operacional; ou a seco, processo de maturação sem a embalagem da carne, resultando em evaporação da água e concentrando compostos responsáveis por aroma e sabor. Assim, objetivou-se avaliar o efeito da estimulação elétrica em carcaças associada a maturação a seco de contrafilé bovino em indicadores de produção e de qualidade da carne. Carcaças de 24 animais Nelore foram divididas em dois grupos: carcaças estimuladas eletricamente (EE) e não estimuladas (NE). A estimulação elétrica utilizou tensões de até 110 V_{RMS} (root-mean-square voltage) em uma frequência de 12 Hz, monitorando a queda de pH e a temperatura durante o resfriamento. Após o resfriamento, amostras do músculo *Longissimus thoracis et lumborum* foram coletadas para análises microbiológicas e físico-químicas. As carnes foram maturadas a seco por 7, 14 e 21 dias em condições controladas e, com os dados de pesagem durante as etapas de maturação, foram calculados os indicadores de processo. Após a maturação, os atributos de qualidade microbiológica e físico-química foram avaliados. A estimulação elétrica resultou em uma queda de pH mais rápida e maior comprimento de sarcômero (1,80 µm contra 1,66 µm das amostras não estimuladas). A qualidade microbiológica foi satisfatória para todos os grupos microbianos avaliados dos dois tratamentos (estimulado e não estimulado), além de expressar um comportamento de queda de contagem microbiana com o passar do tempo de maturação. Referente aos indicadores de produção e qualidade físico-química, não foram observadas interações significativas entre os efeitos. Mas, a aplicação de estimulação elétrica resultou em um processo final com menor rendimento (52,53%) e melhor maciez (5,43 kg) contra as amostras não estimuladas (55,90%; 6,13 kg, respectivamente). Com o passar do tempo de maturação, embora tenha havido maior formação de aparas e ossos nas amostras estimuladas ($P < 0,05$), as perdas totais e o rendimento final não foram afetados ($P > 0,05$). O tempo de maturação também resultou em aumento do pH e do teor de proteína bruta, mas diminuiu a atividade de água e os teores de umidade ($P < 0,05$). A cor foi afetada, em especial, pelo tempo de maturação, tornando as amostras mais escuras ($P > 0,05$), enquanto a maturação melhorou significativamente a maciez a cada período analisado. Sobre a maciez, percebeu-se que a estimulação elétrica promoveu melhoria significativa, especialmente nas amostras maturadas por mais tempo: amostras estimuladas eletricamente atingiram a mesma maciez em 7 dias de maturação (5,6 kg) que as não estimuladas em 14 dias (5,8 kg). Assim, conclui-se que a estimulação elétrica acelera o processo de maturação, reduzindo o tempo necessário para atingir a maciez desejada, o que pode diminuir custos operacionais e tornar as carnes maturadas a seco mais acessíveis ao consumidor.

ABSTRACT

The beef industry has adopted techniques to improve the sensory attributes of this food, such as the use of electrical stimulation of carcasses and aging. Electrical stimulation promotes the breakdown of myofibrillar proteins through electrical current, while aging uses endogenous enzymes from muscle tissue to degrade muscle fibers. Aging can be applied through two processes: wet aging, a practice with lower operational costs; or dry aging, a process of aging without packaging the meat, resulting in evaporation of water and concentration of compounds responsible for aroma and flavor. Thus, the objective of this study was to evaluate the effect of electrical stimulation in carcasses associated with dry aging of beef sirloin on production and meat quality indicators. Carcasses of 24 Nellore animals were divided into two groups: electrically stimulated (EE) and non-stimulated (NE) carcasses. Electrical stimulation used voltages of up to 110 VRMS (root-mean-square voltage) at a frequency of 12 Hz, monitoring the drop in pH and temperature during cooling. After cooling, samples of the Longissimus thoracis et lumborum muscle were collected for microbiological and physicochemical analyses. The meats were dry-aged for 7, 14 and 21 days under controlled conditions and, using the weighing data during the aging stages, the process indicators were calculated. After aging, the microbiological and physicochemical quality attributes were evaluated. Electrical stimulation resulted in a faster pH drop and greater sarcomere length (1.80 μm versus 1.66 μm in the unstimulated samples). The microbiological quality was satisfactory for all microbial groups evaluated in both treatments (stimulated and unstimulated), in addition to expressing a behavior of decreasing microbial counts over the aging time. Regarding the production and physicochemical quality indicators, no significant interactions were observed between the effects. However, the application of electrical stimulation resulted in a final process with lower yield (52.53%) and better tenderness (5.43 kg) compared to the non-stimulated samples (55.90%; 6.13 kg, respectively). As the maturation time passed, although there was greater formation of chips and bones in the stimulated samples ($P < 0.05$), the total losses and the final yield were not affected ($P > 0.05$). The maturation time also resulted in an increase in pH and crude protein content, but decreased water activity and moisture contents ($P < 0.05$). The color was affected, in particular, by the maturation time, making the samples darker ($P > 0.05$), while maturation significantly improved tenderness at each period analyzed. Regarding tenderness, it was observed that electrical stimulation promoted significant improvement, especially in samples matured for longer periods: electrically stimulated samples reached the same tenderness in 7 days of maturation (5.6 kg) as the non-stimulated samples in 14 days (5.8 kg). Thus, it is concluded that electrical stimulation accelerates the maturation process, reducing the time required to reach the desired tenderness, which can reduce operational costs and make dry-aged meats more accessible to the consumer.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVO	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1. Qualidade da carne bovina.....	12
3.2. Estimulação elétrica de carcaças.....	13
3.3. Maturação de carne bovina	14
4. MATERIAL E MÉTODOS	16
4.1. Descrição dos animais	16
4.2. Abate, resfriamento das carcaças e coleta de amostras	16
4.3. Desenho experimental e condições de maturação	17
4.4. Indicadores de rendimento de produção	18
4.4.1. Qualidade microbiológica	19
4.4.2. Comprimento do sarcômero.....	21
4.4.3. Atividade de água	22
4.4.4. pH.....	22
4.4.5. Composição centesimal	22
4.4.6. Cor instrumental	22
4.4.7. Perda por cocção e maciez instrumental.....	23
4.5. Análise estatística.....	24
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
5.1. Declínio de temperatura e pH de carcaças durante o <i>rigor mortis</i>	25
5.2. Indicadores de rendimento do processo de maturação	28
5.3. Qualidade microbiológica.....	29
5.4. pH e atividade de água	31
5.5. Composição centesimal.....	33
5.6. Cor instrumental	33
5.7. Perda por cocção e maciez instrumental	35
6. CONCLUSÃO	39
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

1. INTRODUÇÃO

Com um rebanho de 202,8 milhões de cabeças, a pecuária brasileira alcançou em 2022 uma produção de 10,8 milhões de tonelada equivalente carcaça (TEC), o que corresponde a 14,34% da produção mundial de carne bovina (ABIEC, 2023). Nesse mesmo período, o Brasil exportou um total de 3,02 milhões de TEC, consolidando-se como o principal exportador de carne bovina no cenário global (ABIEC, 2023). Cerca de 80% do rebanho nacional é composto por animais zebuínos (*Bos indicus*), reconhecidos por boa adaptação ao clima brasileiro, contudo, sua carne tende a ser menos macia em comparação com outras raças (ABIEC, 2023; Anaruma et al., 2020; Menezes et al., 2016).

Apesar do desempenho robusto do setor, o Brasil ainda enfrenta desafios em relação à qualidade sensorial da carne bovina. Suculência, sabor e, sobretudo, maciez são características que frequentemente não satisfazem plenamente os consumidores. Com a crescente demanda por alimentos de alta qualidade, inclusive na pecuária de corte, a melhoria desses atributos tornou-se prioridade. A carne de bovinos zebuínos, por exemplo, é frequentemente menos macia comparada à de taurinos (*Bos taurus*) devido à maior atividade da enzima calpastatina, que inibe as enzimas calpaínas responsáveis pela degradação proteica *post mortem*, resultando em uma carne mais rígida (Rubensam et al., 1998). Como a maciez é vista pelos consumidores como a característica sensorial mais importante da carne bovina (Miller et al., 2001), técnicas pós-abate que aprimorem esse atributo são essenciais para atender às expectativas do mercado.

Nesse contexto, a estimulação elétrica de carcaças e o processo de maturação têm sido amplamente adotados para melhorar a maciez da carne. A estimulação elétrica, em particular, tem ganhado reconhecimento internacional devido à sua eficácia, sendo objeto de estudo de diversas pesquisas para otimizar o processo industrial de carne bovina (Djimisa et al., 2022; Simmons et al., 2008). Esta técnica atua nas fases de glicólise e proteólise muscular, acelerando a degradação de adenosina trifosfato (ATP) e declínio do pH, prevenindo o encurtamento pelo frio durante a transformação do músculo em carne (Mota-Rojas et al., 2012). Além disso, favorece a ação de enzimas proteolíticas, o que resulta em uma carne mais macia (Devine et al., 2024).

A maturação, por sua vez, promove o amaciamento da carne através da ação de enzimas endógenas que degradam proteínas estruturais (Dransfield, Etherington, et al., 1992). Ela pode ser realizada através de dois processos, por via úmida ou seca. A maturação úmida, onde a carne é acondicionada em embalagens a vácuo, é a técnica mais comum e economicamente viável (Parrish et al., 1991). Porém, esse processo pode resultar em carne com alterações sensoriais indesejáveis, sendo comumente reportado notas ácidas, devido a acentuada diminuição do pH, oriunda da fermentação por bactérias lácticas (Barker et al., 2022, 2023). Durante este processo, utilizando carne de boa procedência, associada a um bom vácuo e a baixa temperatura de armazenamento durante a maturação (próxima a 0 °C), garantem a qualidade sanitária do produto final (Brasil, 2022b).

Já a maturação a seco ocorre sem uso de embalagens, e é um processo que tem ganhado popularidade tanto de consumidores quanto de processadores de carne, devido ao seu impacto na maciez e ao desenvolvimento de um sabor característico e diferenciado (Ha et al., 2019; Kanokruangrong et al., 2019; Lepper-Blilie et al., 2016; Rezende-de-Souza et al., 2021). Isso porque, a ausência de embalagem durante o processo resulta em evaporação parcial da água da carne, concentrando compostos responsáveis por sabor e aroma (Dashdorj et al., 2016). Devido a isso, durante o processo deve ter um controle rigoroso de temperatura, umidade, fluxo de ar e tempo de maturação, permitindo que ocorra uma série de transformações bioquímicas que resultam em melhorias sensoriais (Dashdorj et al., 2016; Smith et al., 2008).

Com a evaporação de água, também ocorre a formação de uma crosta superficial na carne, a qual é comumente removida após o processo de maturação; essas perdas podem reduzir o rendimento de processo em até 50% (Dashdorj et al., 2016). Considerando o elevado custo da maturação a seco e a crescente demanda por carne de alta qualidade, a combinação dessa técnica com a estimulação elétrica de carcaças surge como uma alternativa promissora. A estimulação elétrica pode potencialmente reduzir o tempo necessário para o processo de maturação, o que, por sua vez, pode aumentar a produtividade e viabilidade econômica desse método. A associação dessas duas práticas pode representar uma solução inovadora para o setor de carnes, equilibrando custos e entregando um produto de alta qualidade com atributos sensoriais aprimorados, especialmente no que diz respeito à maciez.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do uso de estimulação elétrica de carcaças associado ao processo de maturação a seco de contrafilé bovino, em indicadores de produção e de qualidade da carne.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Qualidade da carne bovina

A qualidade da carne bovina pode ser definida por um conjunto de características intrínsecas, como teor de proteína e gordura, que influenciam fatores como cor da carne fresca, sabor, aroma e textura da carne assada (Polkinghorne & Thompson, 2010). Além desses aspectos, a segurança sanitária, mediada pelo tipo e quantidade de microrganismos presentes, também é um componente crucial da qualidade da carne (Warriss, 2009). Entre todos os fatores, a maciez se destaca como o mais importante, pois está fortemente associada ao potencial de recompra de um corte ou marca de carne (Gomes et al., 2014; Pflanzner & Felício, 2009; Warriss, 2009).

A maciez é influenciada por vários fatores. As condições de produção, como raça do animal, condição sexual, sistema de alimentação e idade, afetam diretamente o perfil de qualidade da carne (Miller et al., 2019; Pellegrin et al., 2009). No entanto, o processo de transformação do músculo em carne, conhecido como *rigor mortis*, tem um impacto significativo na qualidade final. Após o abate, o pH muscular é próximo de 6,8, e a temperatura da carcaça é de 37 °C (Ha & Bekhit, 2024). Com o consumo de glicogênio intramuscular, ocorre a produção de ácido lático, que causa o declínio do pH, acidificando a matriz (Bhat et al., 2018). Com a queda do pH, a membrana do retículo sarcoplasmático se rompe, liberando íons de cálcio, o que ativa enzimas como as calpaínas, que hidrolisam proteínas estruturais do sarcômero, finalizando o processo de *rigor* (Ha & Bekhit, 2024).

A transformação do músculo em carne deve ser rigorosamente controlada, pois se a queda de temperatura das carcaças for intensa, atingindo valores entre 10 e 15 °C enquanto o pH ainda estiver acima de 6,0, pode ocorrer o fenômeno conhecido como *Cold Shortening* (Devine, 2014). Isso resulta em um encurtamento irreversível

do sarcômero, diminuindo sua extensão e resultando em carnes menos macias (Devine et al., 2024). Para evitar e mitigar esses efeitos indesejáveis, a indústria de carnes aplica processos tecnológicos em diferentes etapas da produção, como a estimulação elétrica de carcaças e a maturação da carne, para obter produtos de melhor qualidade.

3.2. Estimulação elétrica de carcaças

A estimulação elétrica, aplicada em carcaças previamente ao processo de resfriamento, envolve a passagem de uma corrente elétrica através da carcaça, levando a contrações musculares que simulam a ação do potencial de ação nervoso, fazendo com que os músculos entrem em ciclos de contração e relaxamento após a morte do animal (Devine et al., 2024; Sabow et al., 2017; Simmons et al., 2008). Essas contrações esgotam rapidamente o glicogênio residual no músculo, promovendo o acúmulo de ácido láctico e a redução do pH muscular (Devine, 2014; Devine et al., 2024; Simmons et al., 2008). Assim, esse procedimento acelera a instalação do *rigor mortis*, ao aumentar a taxa glicolítica e promover a queda mais rápida do pH.

A estimulação elétrica é uma técnica utilizada pela indústria para garantir a qualidade do produto final, melhorando as propriedades sensoriais da carne por meio da interferência nos processos de glicólise e proteólise muscular (Mota-Rojas et al., 2012). Essa técnica previne o encurtamento pelo frio ao reduzir a concentração de adenosina trifosfato (ATP) durante o desenvolvimento do *rigor*, além de aumentar a atividade de enzimas proteolíticas e acelerar a queda do pH (Devine, 2014; Devine et al., 2024).

Existem três tipos de estimulação elétrica utilizados pela indústria. A estimulação de alta voltagem (>300 V) é a mais eficiente para promover a maciez da carne, mas possui alto custo de implementação e manutenção devido à necessidade de infraestrutura complexa e procedimentos de segurança rigorosos. A estimulação de baixa voltagem (<100 V), utilizada imediatamente após a sangria, aproveita a integridade do sistema nervoso para propagar a corrente elétrica pela carcaça (Devine, 2014; Kim et al., 2013; Simmons et al., 2008). Já a estimulação de média voltagem (100-300 V), embora promissora, ainda carece de dados conclusivos para

carcaças bovinas, mas é considerada mais segura em comparação aos sistemas de alta voltagem (Zhang et al., 2019).

A velocidade de queda do pH é um fator crucial para determinar a qualidade da carne, influenciando características como cor, suculência, maciez e sabor. Carcaças submetidas à estimulação elétrica apresentam uma redução mais rápida do pH (Lawrie & Ledward, 2014). Cardoso (2005) observou que os músculos estimulados eletricamente apresentaram valores de pH menores nas primeiras medições, e após 7 e 14 dias de maturação, não foram observadas diferenças significativas no pH entre músculos estimulados e não estimulados. Esses resultados sugerem que a estimulação elétrica acelera o processo de *rigor*, favorecendo a maciez da carne.

Em um mercado global cada vez mais competitivo, como o Brasil, que é um dos maiores exportadores de carne bovina, a estimulação elétrica se torna uma ferramenta valiosa para garantir a qualidade da carne, satisfazendo as exigências dos consumidores e mercados mais exigentes.

3.3. Maturação de carne bovina

A maciez é a característica sensorial mais valorizada pelos consumidores de carne bovina (Lage et al., 2009). O processo de maturação, amplamente utilizado pela indústria, é essencial para melhorar essa qualidade. Após o abate do animal, várias alterações bioquímicas ocorrem no músculo, principalmente devido à ação de enzimas endógenas (Toldrá et al., 1995). Essas enzimas, que tinham funções específicas no músculo vivo, passam a degradar proteínas estruturais após a morte do animal, resultando no amaciamento da carne (Dransfield, 1993).

A maturação envolve a proteólise muscular, onde ocorrem alterações químicas e estruturais, como a degradação da linha Z, desmina, titina, nebulina e troponina-T (Bhat et al., 2018; Huff-Lonergan, 2014; Huff-Lonergan et al., 1996). As calpaínas, enzimas dependentes de cálcio, são as principais responsáveis pelo aumento da maciez durante o período *post mortem* (Andrighetto et al., 2006). O processo de proteólise é influenciado por fatores como temperatura e pH, sendo mais intenso em temperaturas mais altas, com maior atividade da calpaína I, e conforme o pH diminui,

a calpaína II assume um papel importante na continuação do amaciamento (Dransfield, 1994).

Diferenças na composição genética dos animais também afetam a qualidade da carne. Animais cruzados F1 *Bos taurus* x *Bos indicus*, por exemplo, produzem carcaças mais pesadas e de melhor qualidade em termos de marmoreio e maciez em comparação com raças puras *Bos indicus* (Pereira et al., 2015; Ramos et al., 2020). A atividade das calpastatinas, inibidoras das calpaínas, é maior em *Bos indicus*, o que pode retardar o amaciamento da carne (Dransfield, 1994).

A maturação pode ser realizada por dois métodos principais: maturação a seco (dry aging) e maturação úmida (wet aging). A maturação úmida, onde a carne é acondicionada em embalagens a vácuo, é a técnica mais comum e economicamente viável (Parrish et al., 1991). Já a maturação a seco, sem uso de embalagens, é um processo que tem ganhado popularidade devido ao seu impacto positivo na maciez e no desenvolvimento de sabores únicos (Dashdorj et al., 2016).

A maturação a seco tem despertado interesse crescente tanto entre consumidores quanto entre processadores de carne, buscando diferenciar seus produtos no mercado. Nesse processo, os cortes cárneos são armazenados sem embalagem em câmaras controladas, onde fatores como umidade, temperatura e fluxo de ar desempenham papéis fundamentais na qualidade final da carne (Bernardo, Silva, Ferreira, et al., 2020; Bernardo, Silva, Francisco, et al., 2020; Rezende-de-Souza et al., 2021).

O impacto da maturação a seco na carne é evidenciado em sua contribuição para o desenvolvimento de sabor e maciez únicos. Estudos indicam que a maturação a seco aumenta a oxidação lipídica e a proteólise, resultando em sabores intensificados, como notas de nozes e manteiga, e ainda, melhoria da textura (Smith et al., 2008). Além disso, a perda de peso associada à desidratação durante o processo também concentra os sabores, resultando em um perfil sensorial distintivo (Dashdorj et al., 2016).

Em relação à segurança alimentar, o processo de maturação a seco requer um monitoramento rigoroso das condições ambientais para evitar o crescimento microbiano e garantir a segurança do produto final (Dashdorj et al., 2016). No entanto,

se adequadamente controlada, a maturação a seco pode resultar em um produto de alta qualidade, que atende às expectativas dos consumidores mais exigentes.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Descrição dos animais

Para o experimento foram utilizados 24 bovinos, machos não castrados, da raça Nelore (*Bos indicus*), provenientes da mesma fazenda e lote de criação. Os animais apresentaram peso entre 18 e 20 arrobas, de 0 a 2 dentes e com grau de acabamento de carcaça entre 5 e 10 mm de espessura.

4.2. Abate, resfriamento das carcaças e coleta de amostras

O abate e coleta de amostras foram realizados na unidade frigorífica de Andradina, São Paulo – Brasil, da empresa JBS S/A. Após o abate, as meias carcaças esquerdas ($n = 24$) foram separadas das direitas ($n = 24$), no Departamento de Inspeção Final (DIF) da unidade frigorífica. As meias carcaças esquerdas foram submetidas ao processo de estimulação elétrica (Grupo EE). As respectivas direitas não foram estimuladas (Grupo NE).

O protocolo de estimulação elétrica consistiu em tensões crescentes de 20, 40, 70 e 110 V_{RMS} (root-mean-square voltage), com 10 segundos de estimulação em cada tensão, usando frequência de 12 Hz e amplitude da tensão entre 200 e 500 V. As meias carcaças esquerdas foram estimuladas por 4 eletrodos posicionados no dianteiro das mesmas (um para cada tensão), com aproximadamente 30 minutos *após a insensibilização*, ainda antes de seu resfriamento. Os parâmetros elétricos foram monitorados com Digital Phosphor Oscilloscope (DPO 2014 - Tektronix).

Em seguida, todas as meias carcaças foram pesadas em balança de trilho da linha de produção e encaminhadas para o resfriamento em câmara programada a 2 °C, por período total de 48 horas. Durante o resfriamento, o declínio do pH e da temperatura da carcaça foram monitorados na região do contrafilé (10ª vértebra torácica), utilizando pHmetro portátil digital (Hanna, modelo HI98163), previamente

calibrado com soluções tampão de pH 4 e 7, e termômetro digital a laser (Zyhum, modelo GM320). Passadas as 48 horas, de três carcaças por grupo estimulado e não estimulado, foram coletadas porções de amostras para as análises de qualidade microbiológica da carne fresca (detalhes são descritos no item 4.5.1.).

Posteriormente, as meias carcaças foram encaminhadas para a desossa, etapa na qual foi coletado o músculo *Longissimus thoracis et lumborum* (10^a vértebra torácica a 6^a vértebra lombar, $\pm$ 35 cm). As peças, ainda com osso, foram novamente identificadas conforme o tratamento recebido: estimulado (EE) e não estimulado (NE). As peças de carne foram embaladas a vácuo e transportadas em caixas com gelo até o laboratório de carnes da Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas.

4.3. Desenho experimental e condições de maturação

Previamente a distribuição das peças de carne, de cada peça foram coletados quatro bifes de 2,5 cm para caracterização da carne não maturada – dia 0 (comprimento do sarcômero, pH, atividade de água, composição centesimal, cor e textura instrumental), com posterior pesagem de cada peça. Em seguida, para cada tratamento (EE e NE), as peças de carnes foram distribuídas aleatoriamente em 03 tempos de maturação a seco, com 8 peças cada:

- 7 dias de maturação: 8 amostras EE e 8 amostras NE
- 14 dias de maturação: 8 amostras EE e 8 amostras NE
- 21 dias de maturação: 8 amostras EE e 8 amostras NE

As peças foram distribuídas em uma única câmara de maturação, de forma balanceada, com a cobertura de gordura (gordura subcutânea) virada para cima; as carnes foram maturadas ainda com osso (Figura 1). A câmara de maturação foi mantida a 2 °C, com velocidade do ar de 2,5 m/s e umidade relativa do ar de 70%. Ao final de cada um dos tempos de maturação (7, 14 e 21 dias), as amostras foram novamente pesadas para cálculo dos indicadores de rendimento, seguido por toalete das carnes, caracterizado pela remoção das aparas e ossos. Posteriormente, uma nova pesagem foi realizada, e, por fim, as carnes foram porcionadas em bifes para

realização das análises de qualidade. Ressalta-se que uma porção das aparas, de cada uma das peças de carne, foi utilizada para determinação da atividade de água. Detalhes sobre o porcionamento das carnes e distribuição das amostras para as análises de qualidade da carne são descritos no item 4.5.



Figura 1. Amostras de carne acondicionadas para a maturação a seco.

4.4. Indicadores de rendimento de produção

Com os dados coletados após todas as etapas de pesagem, foi possível determinar a perda por evaporação durante o período de maturação, o total de aparas e ossos, bem como a perda total e o rendimento total, por meio das Equações 1 a 4.

$$Evaporação = 100 - \left(\frac{Peso \text{ após a maturação} * 100}{Peso \text{ inicial}} \right)$$

Equação 1

$$\text{Aparas e Ossos} = 100 - \left(\frac{\text{Peso aparas e ossos} \times 100}{\text{Peso inicial}} \right) \quad \text{Equação 2}$$

$$\text{Perda total} = 100 - \text{Desidratação} - \text{Aparas e Ossos} \quad \text{Equação 3}$$

$$\text{Rendimento total} = 100 - \text{Perda total} \quad \text{Equação 4}$$

Preparo das amostras e métodos de análise de qualidade

Após a finalização do processo de maturação e das etapas de pesagem, foi conduzido o *toalete* das peças de carne, caracterizado pela remoção da crosta superficial das amostras, também denominado de aparas; em conjunto, foi removido a porção óssea. As aparas foram distribuídas para as análises microbiológicas e para a determinação da atividade de água, as quais foram conduzidas no mesmo dia do processamento das amostras, assim que finalizado o seu respectivo tempo de maturação.

Da porção muscular restante, bifes foram preparados, os quais foram distribuídos para as análises de pH, composição centesimal, cor instrumental, perda por cocção e textura instrumental. Os bifes destinados à análise de cor, todos de 2,5 cm, foram acondicionados em bandejas de poliestireno expandido e envoltos com filme de policloreto de vinila (PVC), e armazenados em câmara refrigerada para a análise. As demais amostras foram devidamente identificadas, acondicionadas em embalagem a vácuo, e congeladas até o momento da análise.

4.4.1. Qualidade microbiológica

4.4.1.1. Amostras não maturadas

As amostras destinadas à avaliação da qualidade microbiológica das carnes do dia 0 foram coletadas no frigorífico após 48 horas de resfriamento, antes do processo de desossa. Para atender aos critérios de amostragem da unidade frigorífica, foram selecionadas três carcaças para análise, de ambos os tratamentos: estimuladas e não estimuladas. De cada uma dessas carcaças, pequenas frações dos cortes de contrafilé, filé de costela e filé mignon foram coletadas, formando um *pool* de amostras por carcaça. Assim, a qualidade microbiológica das carnes do dia 0 foi avaliada em triplicata para cada grupo microbiano analisado. Por questões de segurança, essas

amostras foram analisadas em um laboratório de microbiologia localizado na própria unidade frigorífica. As análises realizadas incluíram a contagem de *E. coli* e de bactérias mesófilas totais.

Após a coleta das amostras, uma alíquota de 25 g de cada *pool* de amostra foi homogeneizada em 225 mL de solução salina 0,1% de peptona, durante 2 min em homogeneizador de amostras tipo *stomacher*, formando a diluição 10^1 (Salfinger & Tortorello, 2015). Novas diluições em série foram conduzidas até a diluição 10^6 . Para ambos os grupos microbianos, utilizou-se o método de contagem de células viáveis em placas de Petrifilm. Assim, 1 mL da diluição de interesse foi inoculada em placa de Petrifilm, seguido por solidificação do gel inoculante por 1 min e posterior incubação a 35 °C por 24 h para a *E. coli* (AOAC 998.08, 2023) e a 35 °C por 48 h para as bactérias mesófilas totais (AOAC 990.12, 2023).

4.4.1.2. Amostras maturadas

Após a finalização de cada período de maturação, de cada tratamento, foi coletado um *pool* de aparas (região superficial da carne) de três peças de carne. Nessas amostras, as análises foram conduzidas com apenas uma repetição. As contagens realizadas incluíram enterobactérias, psicrotróficos, mesófilos totais, além de bolores e leveduras. Essas análises foram conduzidas no laboratório de microbiologia da Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade de Campinas, imediatamente após a coleta das amostras.

Para todos os grupos microbianos analisados, o preparo das amostras seguiu os métodos oficiais, utilizando técnicas de profundidade ou de superfície, conforme as diretrizes da APHA (Salfinger & Tortorello, 2015) e a ISO 15214:1998 (1998). Para tanto, 25 g de amostra da região das aparas foi homogeneizado em 225 mL de solução salina 0,1% de peptona, formando a diluição 10^1 . Novas diluições em série foram conduzidas até a diluição 10^8 .

A quantificação de mesófilos totais e enterobactérias se deu por meio de sistema de contagem padrão em placas por profundidade, utilizando o Ágar Padrão para Contagem (PCA) e o Ágar Vermelho Violeta Bile com Glicose (VRGB), respectivamente; ambos em condições de incubação de 35 °C por 48 h. A técnica por

superfície foi utilizada para a contagem de bolores e leveduras, com Ágar Dicloran Rosa de Bengala Cloranfenicol (DRBC), em condições de incubação de 25 °C por 5 dias, e para a análise para psicotróficos totais, na qual utilizou o meio de cultura PCA e temperatura de incubação de 7 °C por 10 dias.

4.4.2. Comprimento do sarcômero

Conforme descrito anteriormente, a determinação do comprimento do sarcômero foi realizada apenas nas amostras não maturadas (dia 0) de ambos os grupos experimentais (EE e NE), utilizando-se o método de difração a laser, conforme descrito por (Battaglia et al., 2020).

Inicialmente, porções de amostras medindo $2 \times 2 \times 1$ cm foram coletadas na direção das fibras musculares e fixadas por um período de 18 a 24 horas em solução de glutaraldeído a 5% ($C_5H_8O_2$), contendo 0,1 M de fosfato dissódico (Na_2PO_4) com pH ajustado para 7,2. Durante o processo de fixação, as amostras foram mantidas a uma temperatura de 5 °C. Após esse período, o sobrenadante foi descartado, e as amostras foram lavadas com solução de sacarose a 0,2 M (pH 7,2). Em seguida, uma nova fração da mesma solução de sacarose foi adicionada novamente ao frasco contendo as amostras, de modo a cobri-las completamente, permitindo a conservação a 5 °C por até 7 dias.

Para o preparo das lâminas, fragmentos de fibras musculares foram extraídos manualmente com ajuda de pinça e bisturi até a obtenção de, no mínimo, 10 feixes de fibras. Sobre os feixes, foi adicionada uma gota de solução de sacarose, seguida por colocação de uma lamínula. A leitura foi realizada utilizando um equipamento de laser de hélio-neônio (Spectra Physics Inc., modelo 117A, EUA), com comprimento de onda de 632,8 nm. As miofibrilas foram posicionadas sob o feixe de luz para a formação de um padrão de difração. No total, 10 medições foram realizadas por amostra, e os valores obtidos foram usados para o cálculo do comprimento do sarcômero com base na Equação 5, onde D representa a distância (mm) entre a lâmina e o ponto de medição, e T é a distância (mm) entre duas bandas de difração.

$$\text{Comprimento do sarcômero, } \mu\text{m} = 0,0006328 \times D \times \sqrt{\frac{T^2}{D^2} + 1} \times 100 \quad \text{Equação 5}$$

4.4.3. Atividade de água

Para a condução da atividade de água (A_w), uma porção circular da apara de cada uma das peças de carne foi acondicionada em capsula plástica, de 3 cm de diâmetro, e a A_w foi determinada em instrumento Aqualab Series 4TE Decagon Devices (Rezende-de-Souza et al., 2023). Três porções foram utilizadas por peça de carne.

4.4.4. pH

O pH das amostras foi avaliado ao final de cada período de maturação, com pHmetro Hanna (modelo HI98163), previamente calibrado com soluções tampão de pH 4 e 7 (Rezende-de-Souza et al., 2023). Foram realizadas 3 leituras por amostra.

4.4.5. Composição centesimal

A composição centesimal (umidade total, proteína total e lipídios totais) foi determinada pelo método de reflectância no infravermelho próximo (NIR) (AOAC 2007.04, 2007), em instrumento FoodScan 2 PRO, utilizando padrão de curva de calibração para carne bovina. Para isso, a amostra foi triturada grosseiramente em triturador de alimentos convencional e, aproximadamente 150 g de carne foi distribuída em placa de Petri e lida em instrumento, em duplicata.

4.4.6. Cor instrumental

Cada amostra foi acondicionada individualmente em bandeja de poliestireno expandido e envoltos com filme de policloreto de vinila (PVC), sendo posteriormente armazenados em câmara frigorífica à 2 °C por 1 h para dar início a análise de cor. A cor foi determinada com auxílio de colorímetro portátil HunterLab, MiniScam MSEZ

1314, versão 2.0, através dos parâmetros de luminosidade (L^*) e coordenadas vermelha/verde (a^*) e amarela/azul (b^*). Utilizou-se as especificações determinadas pela Meat Color Measurement Guidelines (King et al., 2023), sendo assim, o equipamento foi configurado com iluminante D65, ângulo de visão de 8° e observador padrão de 10°. A leitura foi realizada em três diferentes pontos da região muscular da amostra.

4.4.7. Perda por cocção e maciez instrumental

Utilizou-se o método oficial descrito pela American Meat Science Association (AMSA, 2016). Inicialmente, pesou-se as amostras cruas, seguindo pelo acondicionamento das mesmas em bandejas de alumínio com grade, para posterior assamento. O processo de assamento foi conduzido em forno elétrico regulado a 170 °C; quando as amostras atingiram 45 °C, foram virados e assados até atingirem a temperatura interna de 71 °C. O controle da temperatura interna foi realizado com auxílio de termopares de cobre/constantan com hastes flexíveis conectados a sensores de temperatura Omron modelo E5CWL (fabricante: CSW), inseridos na região central dos bifos. Imediatamente após cocção, os bifos foram novamente pesados para cálculo da perda por cocção, por meio da Equação 6.

$$Perda\ por\ coção = \left(\frac{Peso\ inicial - Peso\ final}{Peso\ inicial} \right) * 100 \quad \text{Equação 6}$$

As amostras já assadas foram refrigeradas a 4 °C por 24 horas. Em seguida, de cada amostra, seis cilindros de 1,27 cm de diâmetro foram retirados paralelamente ao sentido longitudinal das fibras musculares utilizando um amostrador tipo *coring cutter*. Os cilindros foram imediatamente cisalhados em um texturômetro marca TA-XT (Texture Technologies Corp./Stable Micro Systems, UK), equipado com lâmina de Warner Bratzler, de 1 mm de espessura (AMSA, 2016). As configurações do equipamento foram: velocidade do teste de 3,7 mm/s, velocidade pós-teste de 40

mm/s, com distância de 20 mm. Os resultados foram computados pelo próprio software do texturômetro e expressos em kg.

4.5. Análise estatística

Os dados relacionados ao processo de *rigor mortis* (queda de pH e temperatura) foram comparados por análise de variância (ANOVA) one-way, comparando os dados de acordo com o tempo analisado. O comprimento do sarcômero também foi analisado por meio de ANOVA one-way. Assim, para essas análises, comparou-se apenas o efeito da aplicação da estimulação elétrica nas carcaças. Os resultados da qualidade microbiológica foram analisados apenas por método descritivo.

Para os indicadores de rendimento e demais atributos de qualidade da carne (pH, atividade de água, composição centesimal, cor instrumental, perda por cocção e maciez instrumental), utilizou-se uma ANOVA fatorial 2x4, com duas fontes de efeito (aplicação da estimulação elétrica vs tempos de maturação). Ressalta-se que para as análises de qualidade das carnes, comparou-se as carnes não maturadas (tempo 0) com as maturadas por diferentes tempos (7, 14 e 21 dias). Em sequência, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a um nível de significância de 5%.

De forma complementar, para os dados de maciez instrumental, um gráfico foi gerado, com as médias individuais dos tratamentos. Toda a análise dos dados foi conduzida em Software Statistica, versão 10.0, e os gráficos foram gerados em Excel 2016.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Declínio de temperatura e pH de carcaças durante o *rigor mortis*

A temperatura das carcaças submetidas à estimulação elétrica foi significativamente maior em comparação às carcaças não estimuladas, em todos os tempos de resfriamento avaliados (Tabela 1). A estimulação elétrica acelera a transformação do músculo em carne por meio da liberação rápida de íons de cálcio do retículo sarcoplasmático, o que intensifica a quebra anaeróbica do glicogênio intramuscular (Ha & Bekhit, 2024). Esse processo resulta em um aumento da temperatura das carcaças estimuladas, fenômeno conhecido como "aquecimento ôhmico" (Ha & Bekhit, 2024). Além disso, as carcaças não estimuladas foram submetidas ao resfriamento em câmara 30 minutos antes das carcaças estimuladas, o que também contribui para a variação de temperatura observada entre os dois grupos ao longo do tempo de resfriamento.

Estudos anteriores também relatam que carcaças não estimuladas tendem a resfriar mais rapidamente em comparação às estimuladas, especialmente quando é aplicada uma lavagem ou aspersão na superfície das carcaças (Djimsa et al., 2022; Prado & de Felício, 2010). Portanto, independentemente da ausência de aplicação da estimulação elétrica, fatores que promovem naturalmente a queda de temperatura influenciam diretamente a taxa de resfriamento.

Tabela 1. Queda de pH e temperatura durante o processo de *rigor mortis* das carcaças não estimuladas (NE) e estimuladas eletricamente (EE).

Tempo <i>Post mortem</i> (horas)	Temperatura (°C)			pH		
	NE	EE	Sig.	NE	EE	Sig.
2	28,35 ± 0,74 ^b	30,84 ± 0,56 ^a	*	6,72 ± 0,05 ^a	6,38 ± 0,04 ^b	***
4	21,06 ± 0,47 ^b	22,94 ± 0,38 ^a	**	6,42 ± 0,05 ^a	6,09 ± 0,03 ^b	***
6	16,07 ± 0,52 ^b	17,53 ± 0,36 ^a	*	6,13 ± 0,05 ^a	5,88 ± 0,03 ^b	***
9	9,06 ± 0,47 ^b	12,40 ± 0,34 ^a	***	5,89 ± 0,04 ^a	5,72 ± 0,03 ^b	***
12	5,35 ± 0,33 ^b	8,04 ± 0,26 ^a	***	5,80 ± 0,03 ^a	5,64 ± 0,03 ^b	***
48	NA	NA	-	5,50 ± 0,01 ^b	5,55 ± 0,01 ^a	**

^{a,b} Médias com letras distintas em uma mesma linha diferem entre si pelo teste *Tukey* ($P < 0,05$). NA = não se aplica. Sig. = significância; * $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; *** $P < 0,001$.

O pH das carcaças estimuladas foi significativamente menor em comparação às não estimuladas durante todos tempos de resfriamento avaliados (Tabela 1). Após 2 horas do abate as carcaças não estimuladas apresentaram um pH médio de 6,72, enquanto o pH das carcaças estimuladas foi de 6,38. Ao longo do resfriamento, as carcaças não estimuladas necessitaram de 12 horas para atingir um pH menor que 5,8, enquanto as carcaças estimuladas alcançaram esse valor após 9 horas de resfriamento (Tabela 1). Isso demonstra o impacto positivo da estimulação elétrica na aceleração da queda de pH, promovendo um avanço no processo de glicólise e, conseqüentemente, acelerando a finalização do *rigor* (Devine et al., 2024).

Esse efeito também foi reportado em outros estudos similares comparando carcaças estimuladas e não estimuladas eletricamente, em diferentes raças bovinas (Djimsa et al., 2022; Prado & de Felício, 2010; Zhang et al., 2019). A aceleração do *rigor mortis* nas carcaças estimuladas também previne o encurtamento das fibras musculares, uma anomalia conhecida como *Cold Shortening* (Devine et al., 2024). O *Cold Shortening* (ou encurtamento pelo frio, em português) pode ocorrer quando as fibras musculares se contraem enquanto o pH ainda é elevado (acima de 6,0) e a temperatura da carcaça está abaixo de 15 °C, resultando na formação irreversível dos complexos entre actina e miosina, o que reduz o comprimento normal do sarcômero (Devine et al., 2024; Ha & Bekhit, 2024). No presente estudo, a estimulação elétrica não só acelerou a queda do pH, como também reduziu o risco de Cold Shortening. Isso é evidenciado na Figura 2, que mostra que as carcaças não estimuladas eletricamente atingiram a zona crítica para Cold Shortening — pH acima de 6,0 combinado com temperaturas inferiores a 15 °C. Por outro lado, as carcaças estimuladas atingiram o pH 6,0 quando a temperatura ainda estava em torno de 23 °C, evitando o risco de encurtamento das fibras.

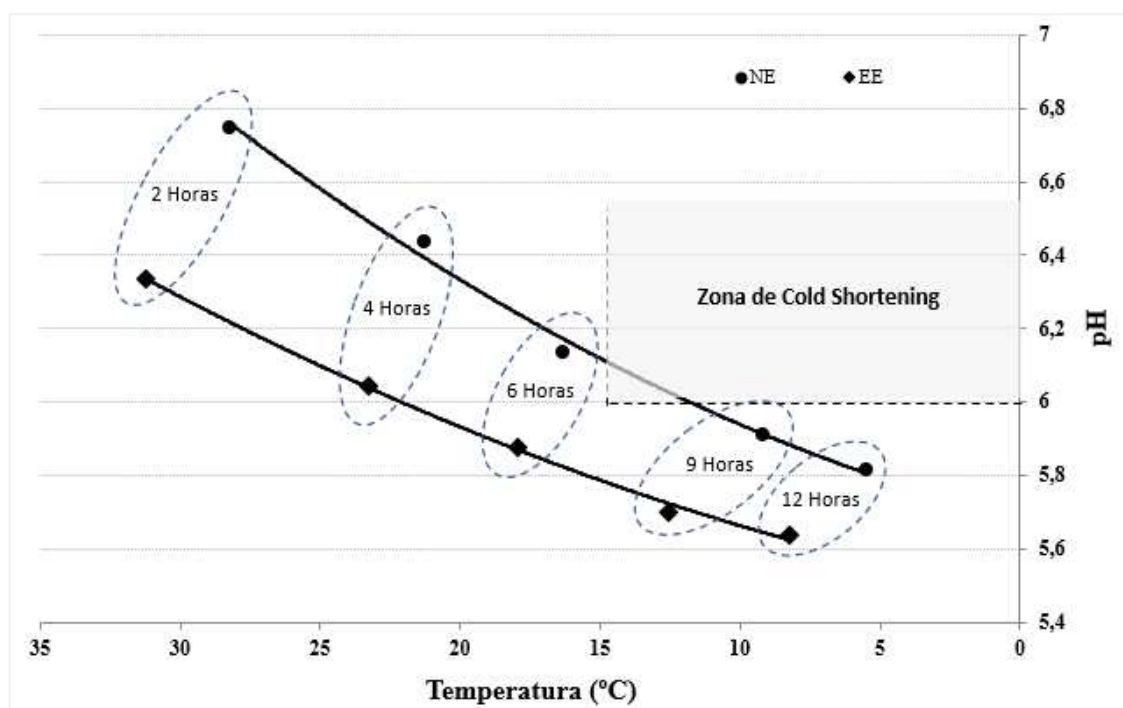


Figura 2. Zona de Cold Shortening (temperatura menor que 15 °C e pH maior que 6,0) para as carcaças bovinas não estimuladas (NE) e estimuladas eletricamente (EE).

Além do declínio acelerado do pH, carcaças estimuladas eletricamente tendem a apresentar carnes com maior comprimento de sarcômero quando comparadas a carcaças não estimuladas, assim prevenindo o *Cold Shortening* (Devine et al., 2024; Djimsa et al., 2022; Honikel, 2014). Esse fenômeno foi observado nas amostras deste estudo. Assim, nota-se significativamente um maior comprimento de sarcômero nas amostras estimuladas em relação as não estimuladas (Tabela 2).

Tabela 2. Comprimento de sarcômero de carcaças bovinas não estimuladas (NE) e estimuladas eletricamente (EE).

Sarcômero (µm)	NE	EE	Valor P
	1,66 ± 0,02 ^b	1,80 ± 0,02 ^a	<0,001

Médias com letras diferentes em uma mesma linha diferem entre si pelo teste *Tukey* ($P < 0,05$).

5.2. Indicadores de rendimento do processo de maturação

Não foi observada interação significativa entre a aplicação de estimulação elétrica de carcaças e o tempo de maturação a seco das amostras para os indicadores de rendimento analisados (Tabela 3).

A aplicação da estimulação elétrica resultou em um aumento significativo na perda por aparas e ossos, o que contribuiu para uma maior perda total e, consequentemente, um menor rendimento em comparação às amostras não estimuladas. Por outro lado, a estimulação elétrica não teve impacto significativo na desidratação total das amostras (Tabela 3).

Tabela 3. Indicadores de rendimento de contrafilé bovino de carcaças não estimuladas (NE) e estimuladas eletricamente (EE), e maturados a seco por diferentes tempos.

	Evaporação (%)	Aparas + osso (%)	Perda total (%)	Rendimento total (%)
Estimulação				
NE	7,74 ± 0,41 ^a	36,32 ± 0,66 ^b	44,10 ± 0,70 ^b	55,90 ± 0,70 ^a
EE	7,89 ± 0,42 ^a	39,55 ± 0,76 ^a	47,21 ± 0,72 ^a	52,53 ± 0,70 ^b
Valor P	0,54	<0,01	<0,01	<0,01
Dias de maturação				
7 dias	5,61 ± 0,16 ^c	39,45 ± 1,03 ^a	44,72 ± 1,00 ^a	55,05 ± 1,04 ^a
14 dias	7,79 ± 0,22 ^b	37,77 ± 0,91 ^{a,b}	45,74 ± 0,92 ^a	54,26 ± 0,92 ^a
21 dias	10,04 ± 0,21 ^a	36,67 ± 0,85 ^b	46,71 ± 0,91 ^a	53,29 ± 0,91 ^a
Valor P	<0,001	<0,05	0,27	0,40
Interação dos efeitos				
Valor P	0,98	0,78	0,96	0,83

^{a,b,c} Médias com letras distintas em uma mesma coluna diferem entre si pelo teste *Tukey* ($P < 0,05$).

Com o avanço do tempo de maturação, houve um aumento significativo na perda de peso das amostras devido à desidratação (Tabela 3). Esse comportamento é amplamente documentado em estudos sobre maturação a seco (Berger et al., 2018; Bernardo, Silva, Ferreira, et al., 2020), sendo esperado devido à evaporação da água livre presente na superfície da carne para o ambiente ao longo do processo.

A perda total de aparas e ossos foi menor ($P < 0,05$) nas amostras maturadas por 21 dias em comparação às aquelas maturadas por 7 dias, enquanto as amostras de 14 dias não apresentaram diferenças significativas em relação aos outros grupos (Tabela 3). Esse resultado pode estar relacionado a possíveis inconsistências técnicas durante o refile das amostras após os diferentes períodos de maturação, sendo mais acentuadas nas amostras maturadas por 7 dias. A perda por refile pode ser influenciada por fatores como a habilidade do operador e a condição da superfície da carne após o processo de maturação, que tende a se tornar mais rígida e desidratada com o tempo, dificultando o corte preciso.

Quando somadas as perdas totais (evaporação de água, aparas e ossos), o tempo de maturação não apresentou influência significativa, resultando em um rendimento total que também não foi afetado de forma relevante (Tabela 3). No entanto, percebe-se uma tendência de efeito linear do tempo de maturação na diminuição do rendimento total, mesmo essa tendência não ter sido significativa.

5.3. Qualidade microbiológica

Conforme descrito no item 4.5.1., a metodologia de amostragem para a análise microbiológica das amostras do dia 0 foi distinta daquelas submetidas à maturação. Portanto, a discussão desses dados foi conduzida separadamente.

As contagens microbiológicas das amostras coletadas ainda no frigorífico demonstraram que para bactérias mesófilas, as amostras provenientes de carcaças não estimuladas apresentaram uma contagem microbiana numericamente superior, com $3,60 \pm 0,10 \log.UFC/g$, em comparação com as amostras estimuladas, que registraram $2,92 \pm 0,02 \log.UFC/g$. Entretanto, a diferença numérica é pequena, e possivelmente sem efeito significativo. Mas, os valores indicam boa qualidade microbiológica devido as contagens baixas (Brasil, 2022a). Em relação à contagem de *Escherichia coli*, os dois grupos de amostras, estimuladas e não estimuladas, apresentaram valores $<1 \log.UFC/g$, que foi o limite de detecção utilizado para esse grupo microbiano. Esses resultados indicam uma presença mínima ou ausência detectável de *E. coli* nas amostras, o que é um indicativo positivo da higiene no processamento e manuseio das carcaças (Brasil, 2022a).

Referente às amostras maturadas, a contagem de bactérias mesófilas foi semelhante entre as amostras não estimuladas maturadas por 7 e 14 dias, mas houve uma redução de 1 log após 21 dias de maturação (Tabela 4). Para as amostras estimuladas eletricamente, observou-se um aumento microbiano de quase 2 logs após 14 dias de maturação em relação às amostras maturadas por 7 dias (Tabela 4). Contudo, essa contagem diminuiu nas amostras maturadas por 21 dias, possivelmente devido à redução da atividade de água na superfície da carne, o que pode ter dificultado o crescimento microbiano (Dashdorj et al., 2016; Hwang et al., 2022). No geral, tanto as amostras não estimuladas quanto as estimuladas, maturadas por 21 dias, apresentaram contagem total de bactérias mesófilas abaixo de 2 logs, valores inferiores ao limite de segurança estipulado pela Instrução Normativa nº 161, a qual determina o limite de 5 logs de bactérias mesófilas em carne bovina fresca e maturada (Brasil, 2022a). Isso demonstra um resultado positivo para a qualidade sanitária do produto, indicando um controle eficaz do crescimento bacteriano ao longo do tempo de maturação.

Tabela 4. Qualidade microbiológica (log.UFC/g) de contrafilé bovino de carcaças não estimuladas (NE) e estimuladas eletricamente (EE), e maturados a seco por diferentes tempos.

Grupo microbiano	NE			EE		
	7 dias	14 dias	21 dias	7 dias	14 dias	21 dias
Mesófilos totais	2,18	2,23	1,30	2,64	4,23	1,78
Psicrotróficos totais	4,97	5,11	3,51	7,04	6,84	5,78
Enterobactérias	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00
Bolores	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00
Leveduras	2,90	3,54	2,48	3,08	4,04	2,48

* Médias não comparadas estatisticamente entre si, devido a amostragem única por tratamento por meio de *pool* de amostra.

No grupo dos psicrotróficos, observou-se uma leve tendência de aumento nas contagens após 14 dias de maturação em comparação com as amostras maturadas por 7 dias, quando provenientes de carcaças não estimuladas (Tabela 4). Em amostras estimuladas, notou-se um declínio nas contagens microbianas à medida que o período de maturação foi prolongado (Tabela 4). O declínio da contagem de psicrotróficos em 21 dias de maturação, comparado ao 7º dia, em amostras

estimuladas e não estimuladas eletricamente, também pode estar relacionado a menor atividade de água, o que impede o desenvolvimento desses microrganismos. Mesmo com contagem de 5,78 logs em amostras estimuladas eletricamente e maturadas por 21 dias, a carga microbiana ainda foi menor àquela reportada por Matos et al. (2024) em amostras maturadas a seco por 20 dias (6,5 log).

A contagem de enterobactérias foi conduzida para determinar a presença de possíveis indicadores patogênicos, como a *E. coli*, que foi avaliada anteriormente nas amostras do dia 0. Para as amostras maturadas em ambos os grupos, estimulado e não estimulado, a contagem de enterobactérias foi abaixo de 1 log.UFC/g, que foi o limite de detecção utilizado neste estudo (Tabela 4). Sendo assim, a contagem desse grupo microbiano foi menor que o estabelecido em legislação nacional para a bactéria *E. coli*, indicando segurança sanitária das amostras (Brasil, 2022a).

As contagens de bolores também ficaram abaixo do limite de detecção do método, que foi de 2 log.UFC/g (Tabela 4). Isso indica que, independentemente do tratamento ou do tempo de maturação, a contagem de bolores se manteve baixa, indicando controle adequado do processo de maturação, especialmente no que se refere à qualidade do ar e ambiente da câmara de maturação. Em relação às leveduras, o comportamento foi similar entre as amostras provenientes de carcaças não estimuladas e estimuladas eletricamente. Inicialmente, houve um aumento na contagem de leveduras de 7 para 14 dias de maturação, seguido por um declínio após 21 dias (Tabela 4). Essa variação pode ser atribuída à competição entre microrganismos e à diminuição da atividade de água, fatores que influenciam diretamente no crescimento e na viabilidade das leveduras ao longo do processo de maturação (Dashdorj et al., 2016). Esses resultados reforçam a importância de monitorar os parâmetros microbiológicos durante a maturação para garantir a segurança e a qualidade do produto final.

5.4. pH e atividade de água

Não houve interação significativa entre a aplicação de estimulação elétrica em carcaças com o tempo de maturação para os parâmetros de pH e atividade de água

(A_w) (Tabela 5). Além disso, a estimulação elétrica não apresentou influência significativa sobre esses atributos físico-químicos (Tabela 5).

Tabela 5. pH, atividade de água (A_w) e composição centesimal de contrafilé bovino de carcaças não estimuladas (NE) e estimuladas eletricamente (EE), e maturados a seco por diferentes tempos.

	pH	A_w superficial	Umidade (%)	Lipídios (%)	Proteína (%)
Estimulação (E)					
NE	5,49 ± 0,01 ^a	0,9782 ± 0,0024 ^a	72,84 ± 0,11 ^a	2,97 ± 0,08 ^a	22,87 ± 0,11 ^a
EE	5,53 ± 0,01 ^a	0,9783 ± 0,0023 ^a	72,97 ± 0,11 ^a	2,82 ± 0,09 ^a	22,97 ± 0,12 ^a
Valor <i>P</i>	0,07	0,90	0,20	0,23	0,44
Dias de maturação (M)					
0 dias	5,52 ± 0,01 ^a	0,9919 ± 0,0002 ^a	73,25 ± 0,09 ^a	2,89 ± 0,08 ^a	22,82 ± 0,07 ^b
7 dias	5,45 ± 0,01 ^b	0,9753 ± 0,0017 ^b	72,97 ± 0,17 ^{ab}	2,97 ± 0,12 ^a	21,99 ± 0,13 ^c
14 dias	5,52 ± 0,02 ^a	0,9655 ± 0,0017 ^c	72,16 ± 0,13 ^{bc}	2,85 ± 0,09 ^a	23,80 ± 0,14 ^a
21 dias	5,55 ± 0,03 ^a	0,9529 ± 0,0030 ^d	72,53 ± 0,21 ^c	2,81 ± 0,21 ^a	23,28 ± 0,20 ^a
Valor <i>P</i>	<0,001	<0,001	<0,001	0,69	<0,001
Interação dos efeitos (E vs M)					
Valor <i>P</i>	0,63	0,58	0,67	0,97	0,98

^{a,b,c} Médias com letras distintas em uma mesma coluna diferem entre si pelo teste *Tukey* ($P < 0,05$).

O tempo de maturação, por outro lado, afetou o pH das amostras. Observou-se uma queda significativa no pH em amostras maturadas por 7 dias em comparação às amostras não maturadas (tempo 0) (Tabela 5), indicando que o início do processo de maturação promove uma acidificação inicial. Entretanto, o pH voltou a aumentar significativamente nas amostras maturadas por 14 e 21 dias (Tabela 5). Esse comportamento pode estar relacionado ao consumo do ácido láctico pelas bactérias naturalmente presentes, ou ainda, ao processo da proteólise, o qual libera peptídeos e aminoácidos básicos, elevando o pH de acordo com o prolongamento da maturação (Bernardo, Silva, Ferreira, et al., 2020; Lawrie & Ledward, 2014; Wyrwysz et al., 2016). Embora haja essa variação, todas as amostras permaneceram dentro da faixa ideal de pH para carnes (valores abaixo de 5,8).

Em relação à A_w , o prolongamento da maturação a seco resultou em uma diminuição significativa de seus valores em todos os grupos de amostras, partindo de

0,9919 nas amostras do dia 0 até 0,9529 nas maturadas por 21 dias (Tabela 5). Essa redução na A_w é esperada devido ao processo de desidratação que ocorre principalmente na superfície da carne, sendo intensificado à medida que o tempo de maturação a seco se prolonga (Bernardo, Silva, Ferreira, et al., 2020; Cònsolo et al., 2024; Dashdorj et al., 2016). Assim, percebe-se que a redução na A_w é um aspecto natural do processo de maturação a seco.

5.5. Composição centesimal

Não houve interação significativa entre o efeito da estimulação elétrica com o tempo de maturação a seco para os parâmetros de composição centesimal (Tabela 5). Além disso, isoladamente, a estimulação elétrica não exerceu influência significativa sobre esses atributos bromatológicos (Tabela 5).

O teor de umidade foi significativamente maior nas amostras não maturadas (0 dias) em comparação às amostras maturadas por 14 dias, enquanto as amostras maturadas por 21 dias apresentaram o menor valor médio de umidade total ($P < 0,05$) (Tabela 5). O declínio de 73,25% para 72,53% de umidade nas amostras do tempo 0 para as maturadas por 21 dias pode ser atribuído à evaporação parcial da água livre no interior da carne durante o processo de maturação a seco (Cònsolo et al., 2024).

Embora o tempo de maturação não tenha afetado significativamente os teores de lipídios totais ($P > 0,05$), observou-se uma variação significativa nos teores de proteína total entre os diferentes tempos avaliados (Tabela 5). Em geral, houve uma tendência de concentração dos teores de proteína nas amostras maturadas por 14 e 21 dias, o que é consistente com a redução dos teores de umidade total. Assim, essa concentração proteica pode ser explicada pela perda de água durante a maturação, levando a uma maior proporção de sólidos, como proteínas, em relação à água.

5.6. Cor instrumental

Não houve interação significativa entre o efeito da estimulação elétrica das carcaças e o tempo de maturação a seco nos atributos de cor instrumental (Tabela 6). De forma isolada, a estimulação elétrica não afetou significativamente a luminosidade

(L*) e a intensidade da cor amarela (b*) (Tabela 6). No entanto, as amostras provenientes de carcaças não estimuladas apresentaram maior intensidade da cor vermelha (a*) em comparação às amostras de carcaças estimuladas eletricamente ($P < 0,05$) (Tabela 6).

Em geral, a estimulação elétrica tende a aumentar a intensidade da cor vermelha, seja de forma leve ou acentuada, como reportado em estudos anteriores (Bakker et al., 2021; Zhang et al., 2019). Esse efeito ocorre devido à danificação das fibras musculares causada pela estimulação elétrica, que facilita a penetração do oxigênio nas fibras musculares, resultando em uma maior concentração de oximioglobina (Hughes et al., 2023). Contudo, os dados deste estudo mostraram uma tendência oposta, com valores de a* ligeiramente menores nas amostras estimuladas. Essa diferença pode estar relacionada aos maiores valores de a* nas amostras maturadas por períodos mais longos, o que possivelmente influencia a comparação direta com os efeitos da estimulação elétrica.

Os valores de a* observados neste estudo (22,17 para amostras de carcaças não estimuladas e 21,56 para amostras de carcaças estimuladas) são consistentes com os reportados na literatura. Zhang et al. (2019) relataram valores de a* de 21,3 em amostras não estimuladas, enquanto as estimuladas variaram entre 22,1 e 24,0, dependendo dos parâmetros de estimulação elétrica. Bakker et al. (2021) encontraram valores ligeiramente superiores, com 24,94 para amostras não estimuladas e entre 26,06 e 26,08 para as estimuladas a 40 e 80 V, respectivamente. Leighton et al. (2024) observaram valores de a* variando entre 22,8 e 22,1 em amostras de carcaças submetidas a estimulação elétrica de corrente constante versus voltagem constante, respectivamente. Embora haja variações entre os estudos, os valores de a* permanecem próximos e dentro do esperado para carne fresca.

A maturação a seco resultou em um aumento significativo nos valores de luminosidade (L*) em todos os tempos de maturação, em comparação com as amostras do dia 0 (Tabela 6). Este aumento pode ser explicado pela hidrólise enzimática das proteínas da carne durante a maturação, que causa uma maior dispersão da luz, elevando os valores de L* (Macdougall & Taylor, 1975).

No que diz respeito à intensidade da cor vermelha (a*), as amostras maturadas por 7 dias apresentaram valores significativamente mais altos ($a^* = 24,04$) em

comparação às demais amostras, que apresentaram valores abaixo de 22 (Tabela 6). A intensidade da cor amarela (b^*) também foi mais pronunciada nas amostras maturadas em comparação às do dia 0 ($P < 0,05$) (Tabela 6). Esse aumento nos valores de a^* e b^* podem ser atribuídos não apenas à concentração de pigmentos de cor, como oximioglobina, mas também ao processo de maturação, que contribui para mudanças na estrutura muscular e no teor de água da carne, intensificando a percepção da cor.

Tabela 6. Cor instrumental de contrafilé bovino de carcaças não estimuladas (NE) e estimuladas eletricamente (EE), e maturados a seco por diferentes tempos.

	L^*	a^*	b^*
Estimulação (E)			
NE	41,00 $\pm$ 0,45 ^a	22,17 $\pm$ 0,24 ^a	18,77 $\pm$ 0,20 ^a
EE	41,17 $\pm$ 0,38 ^a	21,56 $\pm$ 0,22 ^b	18,45 $\pm$ 0,19 ^a
Valor <i>P</i>	0,96	<0,05	0,13
Dias de maturação (M)			
0 dias	38,99 $\pm$ 0,23 ^b	21,10 $\pm$ 0,20 ^b	17,91 $\pm$ 0,18 ^b
7 dias	42,32 $\pm$ 0,38 ^a	24,04 $\pm$ 0,36 ^a	19,69 $\pm$ 0,28 ^a
14 dias	43,64 $\pm$ 0,53 ^a	21,98 $\pm$ 0,25 ^b	19,34 $\pm$ 0,21 ^a
21 dias	43,83 $\pm$ 0,60 ^a	21,88 $\pm$ 0,21 ^b	18,92 $\pm$ 0,30 ^a
Valor <i>P</i>	<0,001	<0,001	<0,001
Interação dos efeitos (E vs M)			
Valor <i>P</i>	0,71	1,00	0,78

^{a,b} Médias com letras distintas em uma mesma coluna diferem entre si pelo teste *Tukey* ($P < 0,05$).

5.7. Perda por cocção e maciez instrumental

Não houve interação significativa entre a aplicação de estimulação elétrica nas carcaças e o processo de maturação a seco em relação à perda por cocção e à maciez instrumental (Tabela 7). Isoladamente, a estimulação elétrica das carcaças não afetou a perda por cocção ($P > 0,05$). No entanto, as carnes provenientes de carcaças estimuladas eletricamente foram significativamente mais macias em comparação às não estimuladas (Tabela 7). A estimulação elétrica de carcaças, além de prevenir o fenômeno de *Cold Shortening* (conforme detalhado no item 5.1.), desempenha um papel crucial na promoção da quebra das fibras musculares, o que contribui para a

obtenção de carnes mais macias (Devine et al., 2024). Esse efeito positivo na maciez ocorre devido ao fato de que a estimulação elétrica acelera o declínio do pH pós-abate, ativando as calpaínas, enzimas que degradam as proteínas miofibrilares responsáveis pela rigidez do músculo (Devine et al., 2024; Dransfield, Wakefield, et al., 1992). Estudos indicam que a estimulação elétrica pode melhorar a maciez da carne, em média, até 25% em comparação às carcaças não estimuladas, reforçando sua eficácia como uma técnica para otimizar a qualidade sensorial da carne (Razminowicz et al., 2008; Zhang et al., 2019). Para este estudo, a melhoria da maciez foi de 11,42% apenas com o uso da estimulação elétrica de carcaças.

Em relação à maturação a seco, a técnica demonstrou reduzir significativamente a perda por cocção quando comparada às amostras do dia 0 (Tabela 7). Durante a maturação a seco ocorre uma desidratação por evaporação, que resulta em uma menor quantidade de água livre na carne. Essa redução prévia no teor de água contribui para uma menor perda de água durante a cocção (Cônsole et al., 2024).

Tabela 7. Perda por cocção e textura instrumental de contrafilé bovino de carcaças não estimuladas (NE) e estimuladas eletricamente (EE), e maturados a seco por diferentes tempos.

	Perda por cocção (%)	Warner-Bratzler SF (kg)
<i>Estimulação (E)</i>		
NE	21,67 ± 0,30 ^a	6,13 ± 0,20 ^a
EE	21,47 ± 0,31 ^a	5,43 ± 0,18 ^b
Valor <i>P</i>	0,34	<0,05
<i>Dias de maturação (M)</i>		
0 dias	22,60 ± 0,30 ^a	6,38 ± 0,19 ^a
7 dias	20,93 ± 0,41 ^b	5,85 ± 0,24 ^{a,b}
14 dias	20,99 ± 0,54 ^b	5,44 ± 0,27 ^b
21 dias	20,84 ± 0,51 ^b	4,26 ± 0,27 ^c
Valor <i>P</i>	<0,05	<0,001
<i>Interação dos efeitos (E vs M)</i>		
Valor <i>P</i>	0,12	0,69

^{a,b} Médias com letras distintas em uma mesma coluna diferem entre si pelo teste *Tukey* ($P < 0,05$).

O prolongamento do tempo de maturação também favoreceu uma melhoria significativa na maciez das amostras. As carnes não maturadas (dia 0) foram as menos macias em comparação às maturadas por 14 dias, enquanto as amostras maturadas por 21 dias apresentaram a maior maciez ($P < 0,05$) (Tabela 7). Essa melhoria na maciez está diretamente associada ao processo de hidrólise enzimática das proteínas miofibrilares, mediado pela ação das calpaínas e outras proteases endógenas, que atuam principalmente nas proteínas estruturais do tecido muscular, como a titina e a nebulina (Dransfield, 1993; Huff-Lonergan, 2014). À medida que essas proteínas são degradadas, ocorre um desarranjo no sarcômero, a unidade funcional do músculo, resultando em uma melhor textura da carne.

Embora não tenha sido observada interação significativa entre a estimulação elétrica de carcaças e o processo de maturação a seco, foi elaborado um gráfico para melhor compreensão da importância desses fatores na maciez da carne (Figura 3). Nas amostras do dia 0, as carnes não estimuladas apresentaram uma força de cisalhamento de 6,9 kg, em comparação aos 5,9 kg das amostras estimuladas, indicando que as carnes não estimuladas exigiram 1,0 kg a mais de força para o cisalhamento em relação às estimuladas eletricamente ($P < 0,05$). Esse resultado evidencia o efeito positivo da estimulação elétrica nas carcaças, logo após a finalização do *rigor mortis*. Para as amostras maturadas por 7, 14 e 21 dias, não foram observadas diferenças significativas na maciez entre as carnes provenientes de carcaças estimuladas e não estimuladas. No entanto, observa-se uma tendência de menor força necessária para o cisalhamento nas carnes de carcaças estimuladas. Essa tendência sugere que, apesar de a diferença não ser estatisticamente significativa nesses tempos de maturação, a estimulação elétrica pode contribuir para uma melhoria inicial da maciez da carne que persiste ao longo do processo de maturação.

O tempo de maturação também teve um impacto positivo na maciez da carne, especialmente quando se comparam as amostras de 0 dias com as maturadas por 21 dias ($P < 0,05$) (Figura 3). Inicialmente, houve uma melhoria de 5,08% e 11,59% na maciez das amostras maturadas por 7 dias, em comparação com as do dia 0, para carnes de carcaças estimuladas e não estimuladas, respectivamente. Essa melhoria mais acentuada em carnes de carcaças não estimuladas, embora ainda sejam mais duras (6,1 kg) em comparação às estimuladas (5,6 kg), destaca que, enquanto a

maturação melhora a maciez, a estimulação elétrica acelera esse processo. Com a finalização da maturação em 21 dias, as melhorias na maciez aumentaram para 30,51% e 36,23% em carnes de carcaças estimuladas e não estimuladas, respectivamente, comparadas com aquelas do dia 0. No entanto, em 21 dias de maturação, a tendência de carne mais macia continua nas amostras estimuladas (4,1 kg) em comparação às não estimuladas (4,4 kg).

De forma geral, pode-se concluir que tanto a estimulação elétrica quanto o tempo de maturação contribuem significativamente para a melhoria da maciez da carne. No entanto, a estimulação elétrica acelera esse processo, permitindo que se alcance uma maciez desejada em um menor período de tempo. Por exemplo, as amostras estimuladas eletricamente no dia 0 apresentaram uma maciez de 5,9 kg, valor que só foi alcançado pelas carnes não estimuladas após 14 dias de maturação (5,8 kg). Esse resultado ressalta a importância da estimulação elétrica como uma técnica eficaz para reduzir o tempo de maturação necessário para atingir a maciez ideal, o que pode ser vantajoso em termos de eficiência produtiva e de mercado.

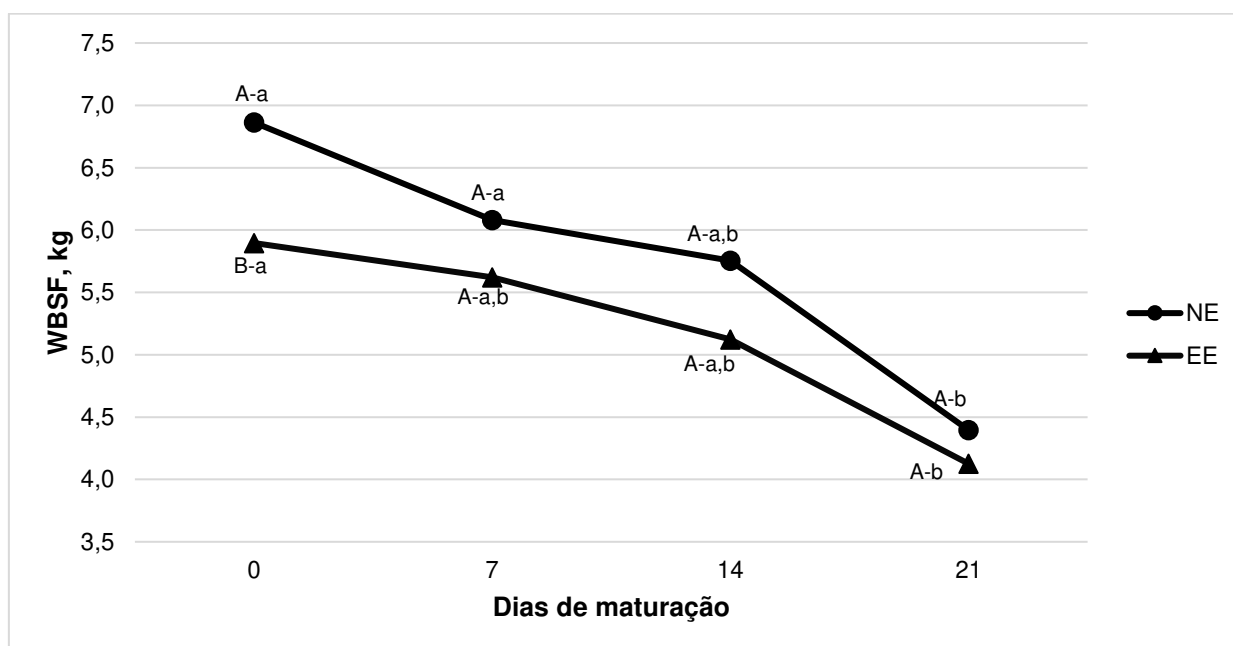


Figura 3. Maciez instrumental de contrafilé bovino de carcaças não estimuladas (NE) e estimuladas eletricamente (EE), e maturados a seco por diferentes tempos.

Médias com letras maiúsculas (A,B) diferentes em um mesmo tempo de maturação diferem entre si pelo teste *Tukey* ($P < 0,05$). Médias com letras minúsculas (a,b) diferentes em um mesmo tipo de tratamento (EE ou NEE) diferem entre si pelo teste *Tukey* ($P < 0,05$).

6. CONCLUSÃO

A aplicação da estimulação elétrica em carcaças bovinas reduziu o rendimento em 3,37% em relação às carnes de carcaças não estimuladas. No entanto, essa técnica não impactou os atributos relacionados à água, como desidratação durante a maturação, atividade de água na superfície, teor de umidade e perda por cocção. Por outro lado, a estimulação elétrica promoveu uma melhora significativa na maciez das amostras, acelerando o processo de maturação em aproximadamente uma semana. Dessa forma, carnes maturadas a seco, provenientes de carcaças eletricamente estimuladas podem alcançar o mesmo nível de maciez em 7 dias de maturação, comparado às carnes não estimuladas, que necessitam de 14 dias para atingir o mesmo resultado. Isso representa uma redução no tempo de maturação e, consequentemente, uma diminuição nos custos operacionais, o que pode resultar em um valor de venda mais acessível para carnes maturadas a seco.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIEC. (2023). *Perfil da pecuária no Brasil 2023*. Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes. BeefREPORT.
- AMSA. (2016). Research guidelines for cookery, sensory evaluation, and instrumental tenderness measurements of meat. In *American Meat Science Association Educational Foundation* (2nd ed.). American Meat Science Association.
- Anaruma, R. J., Reis, L. G., de Felício, P. E., Pflanzner, S. B., Rossi, S., Zanetti, M. A., Cônsolo, N. R. B., L. Silva, S., & Netto, A. S. (2020). Castration age and growth, meat production and meat quality of Nellore male cattle. *Animal Production Science*, 60(5), 725. <https://doi.org/10.1071/AN18460>
- Andrighetto, C., Jorge, A. M., Roça, R. O., Sartori, D. da R., Rodrigues, É., & Bianchini, W. (2006). Maturação da carne bovina. *Rev Eletron Vet*, 7(6), 1–6. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63612666003%0Ahttp://www.veterinaria.org/revistas/redvet%0Ahttp://www.veterinaria.org/revistas/redvet/n060606.html>
- AOAC 2007.04. (2007). *AOAC Official Method 2007.04 Fat, Moisture, and Protein in Meat and Meat Products FOSS FoodScan™ Near-Infrared (NIR) Spectrophotometer with FOSS Artificial Neural Network (ANN) Calibration Model and Associated Database First Action 2007 A. Principle*. www.foss.dk
- AOAC 990.12. (2023). *AOAC Official Method 990.12 - Aerobic Plate Count in Foods: Dry Rehydratable Film (Petrifilm™ Aerobic Count Plate)*. AOAC Official Method 990.12.
- AOAC 998.08. (2023). *AOAC Official Method 998.08 - Confirmed Escherichia coli Counts in Poultry, Meats and Seafood: Dry Rehydratable Film Method Petrifilm™*. AOAC Official Method 991.14.
- Bakker, C., Underwood, K., Grubbs, J. K., & Blair, A. (2021). Low-Voltage Electrical Stimulation of Beef Carcasses Slows Carcass Chilling Rate and Improves Steak Color. *Foods*, 10(5), 1065. <https://doi.org/10.3390/foods10051065>
- Barker, S. N., Brooks, J. C., Bachler, J. T., Woerner, D. R., & Legako, J. F. (2023). Flavor Development of Individually Vacuum-Packaged Beef Steaks During

- Extended Wet Aging. *Meat and Muscle Biology*, 7(1).
<https://doi.org/10.22175/mmb.16192>
- Barker, S. N., Legako, J. F., Brooks, J. C., & Woerner, D. R. (2022). Evaluation of beef steak flavor development in vacuum rollstock packaging under two lighting sources. *Meat and Muscle Biology*. <https://doi.org/10.22175/mmb.13725>
- Battaglia, C., Vilella, G. F., Bernardo, A. P. S., Gomes, C. L., Biase, A. G., Albertini, T. Z., & Pflanzner, S. B. (2020). Comparison of methods for measuring shear force and sarcomere length and their relationship with sensorial tenderness of longissimus muscle in beef. *Journal of Texture Studies*, 1–11.
<https://doi.org/10.1111/jtxs.12473>
- Berger, J., Kim, Y. H. B., Legako, J. F., Martini, S., Lee, J., Ebner, P., & Zuelly, S. M. S. (2018). Dry-aging improves meat quality attributes of grass-fed beef loins. *Meat Science*, 145, 285–291. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.07.004>
- Bernardo, A. P. da S., Silva, A. C. M. da, Ferreira, F. M. S., Nascimento, M. da S. do, & Pflanzner, S. B. (2020). The effects of time and relative humidity on dry-aged beef: Traditional versus special bag. *Food Science and Technology International*, 1–9. <https://doi.org/10.1177/1082013220976487>
- Bernardo, A. P. da S., Silva, A. C. M. da, Francisco, V. C., Ribeiro, F. A., Nassu, R. T., Calkins, C. R., Nascimento, M. da S. do, & Pflanzner, S. B. (2020). Effects of freezing and thawing on microbiological and physical-chemical properties of dry-aged beef. *Meat Science*, 161, 1–9.
<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.108003>
- Bhat, Z. F., Morton, J. D., Mason, S. L., & Bekhit, A. E.-D. A. (2018). Role of calpain system in meat tenderness: a review. *Food Science and Human Wellness*, 7(3), 196–204. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2018.08.002>
- Brasil. (2022a). *Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Instrução Normativa nº 161, de 01 de julho de 2022. Padrões microbiológicos dos alimentos*. Diário Oficial Da União.
https://antigo.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/IN_161_2022_.pdf/b08d70cb-add6-47e3-a5d3-fa317c2d54b2

- Brasil. (2022b). *Ministério da Agricultura Pecuária e do Abastecimento. Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade para carne maturada de bovino*. Diário Oficial Da União. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br>
- Cardoso, S. (2005). *Estimulação elétrica, tipo de desossa e taxas de resfriamento da carne bovina (MM. Longissimus lumborum e semimembranosus): efeitos em características físicas, físico-químicas, sensoriais e bacteriológicas*. Universidade de Campinas.
- Cônsolo, N. R. B., de Paula, A. P. M., Rezende-de-Souza, J. H., Herreira, V. L. S., Laura S. M. Gôngora, A., Colnago, L. A., Moraes, T. B., Santos, P. M., Nassu, R. T., & Pflanzner, S. B. (2024). Assessment of water relaxometry of meat under different ageing processes using time domain nuclear magnetic resonance relaxometry. *Food Research International*, 190, 114566. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114566>
- Dashdorj, D., Tripathi, V. K., Cho, S., Kim, Y., & Hwang, I. (2016). Dry aging of beef; Review. *Journal of Animal Science and Technology*, 58(20), 1–11. <https://doi.org/10.1186/s40781-016-0101-9>
- Devine, C. E. (2014). Conversion of muscle to meat: aging. In *Encyclopedia of Meat Sciences* (Vol. 1, pp. 329–338). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384731-7.00098-2>
- Devine, C. E., Hopkins, D. L., & Strydom, P. E. (2024). Electrical stimulation. In *Encyclopedia of Meat Sciences* (pp. 750–762). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85125-1.00046-6>
- Djimisa, B. A., Nair, M., Hess, A. M., Belk, K. E., & Woerner, D. R. (2022). The impact of carcass size, chilling, and electrical stimulation on beef postmortem temperature and pH decline. *Meat and Muscle Biology*. <https://doi.org/10.22175/mmb.13893>
- Dransfield, E. (1993). Modelling post-mortem tenderisation — IV: role of calpains and calpastatin in conditioning. *Meat Science*, 34(2), 217–234. [https://doi.org/10.1016/0309-1740\(93\)90029-H](https://doi.org/10.1016/0309-1740(93)90029-H)
- Dransfield, E. (1994). Modelling post-mortem tenderisation — V: inactivation of

- calpains. *Meat Science*, 37(3), 391–409. [https://doi.org/10.1016/0309-1740\(94\)90055-8](https://doi.org/10.1016/0309-1740(94)90055-8)
- Dransfield, E., Etherington, D. J., & Taylor, M. A. J. (1992). Modelling post-mortem tenderisation — II: enzyme changes during storage of electrically stimulated and non-stimulated beef. *Meat Science*, 31(1), 75–84. [https://doi.org/10.1016/0309-1740\(92\)90073-D](https://doi.org/10.1016/0309-1740(92)90073-D)
- Dransfield, E., Wakefield, D. K., & Parkman, I. D. (1992). Modelling post-mortem tenderisation — I: texture of electrically stimulated and non-stimulated beef. *Meat Science*, 31(1), 57–73. [https://doi.org/10.1016/0309-1740\(92\)90072-C](https://doi.org/10.1016/0309-1740(92)90072-C)
- Gomes, C. L., Pflanzner, S. B., Cruz, A. G., de Felício, P. E., & Bolini, H. M. A. (2014). Sensory descriptive profiling and consumer preferences of beef strip loin steaks. *Food Research International*, 59, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.01.061>
- Ha, M., & Bekhit, A. E.-D. A. (2024). Conversion of muscle to meat | rigor mortis, cold and rigor shortening. In *Encyclopedia of Meat Sciences* (pp. 134–144). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85125-1.00173-3>
- Ha, M., McGilchrist, P., Polkinghorne, R., Huynh, L., Galletly, J., Kobayashi, K., Nishimura, T., Bonney, S., Kelman, K. R., & Warner, R. D. (2019). Effects of different ageing methods on colour, yield, oxidation and sensory qualities of Australian beef loins consumed in Australia and Japan. *Food Research International*, 125, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108528>
- Honikel, K. O. (2014). Conversion of muscle to meat: rigor mortis, cold, and rigor shortening. In *Encyclopedia of Meat Sciences* (Vol. 1, pp. 358–365). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384731-7.00096-9>
- Huff-Lonergan, E. (2014). Enzymatic. In *Encyclopedia of Meat Sciences* (Vol. 3, pp. 438–442). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384731-7.00248-8>
- Huff-Lonergan, E., Mitsuhashi, T., Beekman, D. D., Parrish, F. C., Olson, D. G., & Robson, R. M. (1996). Proteolysis of specific muscle structural proteins by mu-calpain at low pH and temperature is similar to degradation in postmortem bovine muscle. *Journal of Animal Science*, 74(5), 993–1008.

<https://doi.org/10.2527/1996.745993x>

- Hughes, J., McPhail, N., Watkins, P., Stark, J., & Warner, R. D. (2023). Increased light scattering in electrically stimulated beef longissimus muscle fibres contributes to the observed meat colour at grading. *Animal Production Science*, 63(7), 673–680. <https://doi.org/10.1071/AN22390>
- Hwang, S. H., Lee, J., Nam, T. G., Koo, M., & Cho, Y. S. (2022). Changes in physicochemical properties and bacterial communities in aged Korean native cattle beef during cold storage. *Food Science & Nutrition*, 10(8), 2590–2600. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2864>
- ISSO 15214:1998. (1998). *Microbiology of food and animal feeding stuffs – Horizontal method for the enumeration of mesophilic lactic acid bacteria – Colony-count technique at 30°C* (1st ed.). The International Organization for Standardization.
- Kanokruangrong, S., Birch, J., & El-Din Ahmed Bekhit, A. (2019). Processing effects on meat flavor. In L. Melton, F. Shahidi, & P. Varelis (Eds.), *Encyclopedia of Food Chemistry* (Vol. 2, pp. 302–308). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21861-1>
- Kim, Y. H. B., Lonergan, S. M., Grubbs, J. K., Cruzen, S. M., Fritchen, A. N., della Malva, A., Marino, R., & Huff-Lonergan, E. (2013). Effect of low voltage electrical stimulation on protein and quality changes in bovine muscles during postmortem aging. *Meat Science*, 94(3), 289–296. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.02.013>
- King, D. A., Hunt, M. C., Barbut, S., Claus, J. R., Cornforth, D. P., Joseph, P., Kim, Y. H. B., Lindahl, G., Mancini, R. A., Nair, M. N., Merok, K. J., Milkowski, A., Mohan, A., Pohlman, F., Ramanathan, R., Raines, C. R., Seyfert, M., Sørheim, O., Suman, S. P., & Weber, M. (2023). American Meat Science Association Guidelines for Meat Color Measurement. *Meat and Muscle Biology*, 6(4). <https://doi.org/10.22175/mmb.12473>
- Lage, J. F., Oliveira, I. M., & Paulino, P. V. R. (2009). Papel do sistema calpaína-calpastatina sobre a proteólise muscular e sua relação com a maciez da carne em bovinos de corte. *Revista Eletrônica de Veterinária*, 10(12), 1–20.

<https://www.redalyc.org/pdf/636/63617155009.pdf>

- Lawrie, R. A., & Ledward, D. A. (2014). *Lawrie's Meat Science* (7th ed.). Woodhead Publishing.
- Leighton, P. L. A., López-Campos, Ó., Chabot, B., Scott, H. R., Schmidt, B., Zawadski, S., & Prieto, N. (2024). Effect of different electrical stimulation systems on beef quality and palatability: Constant current compared to constant voltage. *Meat Science*, 216, 109567. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2024.109567>
- Lepper-Blilie, A. N., Berg, E. P., Buchanan, D. S., & Berg, P. T. (2016). Effects of post-mortem aging time and type of aging on palatability of low marbled beef loins. *Meat Science*, 112, 63–68. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.10.017>
- Macdougall, D. B., & Taylor, A. A. (1975). Colour retention in fresh meat stored in oxygen—a commercial scale trial. *International Journal of Food Science & Technology*, 10(3), 339–347. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1975.tb00037.x>
- Matos, L. G., da Silva Abreu, A. C., Alonso, V. P. P., Gonçalves, J. L., Silva do Nascimento, M. da, Pflanzner Jr, S. B., Rezende-de-Souza, J. H., Gini, C., Murad, N. F., Brandão, M. M., & Silva, N. C. C. (2024). Comparison of bacterial diversity in wet- and dry-aged beef using traditional microbiology and next generation sequencing. *The Microbe*, 2, 100035. <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100035>
- Menezes, G. R. de O., Rosa, A. do N. F., Silva, L. O. C. da, Junior, R. A. de A. T., Feijó, G. L. D., Egito, A. A. do, & Siqueira, F. (2016). *Demandas tecnológicas dos sistemas de produção de bovinos de corte no Brasil – melhoramento genético animal*. Embrapa Gado de Corte. <https://www.embrapa.br/fale-conosco/sac>
- Miller, M. F., Carr, M. A., Ramsey, C. B., Crockett, K. L., & Hoover, L. C. (2001). Consumer thresholds for establishing the value of beef tenderness. *Journal of Animal Science*, 79(12), 3062. <https://doi.org/10.2527/2001.79123062x>
- Miller, R. K., Kerth, C. R., Berto, M. C., Laird, H. L., & Savell, J. W. (2019). Steak Thickness, Cook Surface Temperature and Quality Grade Affected Top Loin Steak Consumer and Descriptive Sensory Attributes. *Meat and Muscle Biology*, 3(1). <https://doi.org/10.22175/mmb2018.07.0020>

- Mota-Rojas, D., Roldán-Santiago, P., & Guerrero-Legarreta, I. (2012). Electrical Stimulation in Meat Processing. In Y. H. Hui (Ed.), *Handbook of Meat and Meat Processing* (pp. 323–331). Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/b11479>
- Parrish, F. C., Boles, J. A., Rust, R. E., & Olson, D. G. (1991). Dry and wet aging effects on palatability attributes of beef loin and rib steaks from three quality grades. *Journal of Food Science*, 56(3), 601–603. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1991.tb05338.x>
- Pellegrin, A. O., Rosa, A. do N., Fernandes, C. E., Corrêa, E. S., & Nogueira, É. (2009). *Fertilidade, funcionalidade e genética de touros zebuínos* (T. B. do Amaral, J. R. B. Sereno, & A. O. Pellegrin (eds.)). Embrapa Cerrados. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CPAC-2010/31913/1/amaral-01.pdf>
- Pereira, A. S. C., Baldi, F., Sainz, R. D., Utembergue, B. L., Chiaia, H. L. J., Magnabosco, C. U., Manicardi, F. R., Araujo, F. R. C., Guedes, C. F., Margarido, R. C., Leme, P. R., & Sobral, P. J. A. (2015). Growth performance, and carcass and meat quality traits in progeny of Poll Nellore, Angus and Brahman sires under tropical conditions. *Animal Production Science*, 55(10), 1295. <https://doi.org/10.1071/AN13505>
- Pflanzer, S. B., & Felício, P. E. de. (2009). Effects of teeth maturity and fatness of Nellore (*Bos indicus*) steer carcasses on instrumental and sensory tenderness. *Meat Science*, 83(4), 697–701. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.08.011>
- Polkinghorne, R. J., & Thompson, J. M. (2010). Meat standards and grading: A world view. *Meat Science*, 86(1), 227–235. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.05.010>
- Prado, C. S., & de Felício, P. E. (2010). Effects of chilling rate and spray-chilling on weight loss and tenderness in beef strip loin steaks. *Meat Science*, 86(2), 430–435. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.05.029>
- Ramos, P. M., Wright, S. A., Delgado, E. F., van Santen, E., Johnson, D. D., Scheffler, J. M., Elzo, M. A., Carr, C. C., & Scheffler, T. L. (2020). Resistance to pH decline

- and slower calpain-1 autolysis are associated with higher energy availability early postmortem in *Bos taurus indicus* cattle. *Meat Science*, 159, 107925. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.107925>
- Razminowicz, R. H., Kreuzer, M., & Scheeder, M. R. (2008). Effect of electrical stimulation, delayed chilling and post-mortem aging on the quality of *M. longissimus dorsi* and *M. biceps femoris* of grass-fed steers. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88(8), 1344–1353. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3222>
- Rezende-de-Souza, J. H., Cardello, F. A. B., Paula, A. P. M. de, Ribeiro, F. A., Calkins, C. R., & Pflanzner, S. B. (2021). Profile of Producers and Production of Dry-Aged Beef in Brazil. *Foods*, 10(10), 1–15. <https://doi.org/10.3390/foods10102447>
- Rezende-de-Souza, J. H., Nassu, R. T., Macedo, R. E. F., Francisco, V. C., Karwowski, M. S. M., & Pflanzner, S. B. (2023). Yield and Quality Attributes of Aged Beef through Lipid Coatings: A Comparative Study of Milk Butter and Pork Lard. *Meat and Muscle Biology*, 8(1), 1–12. <https://doi.org/10.22175/mmb.16909>
- Rubensam, J. M., Felício, P. E. de, & Termignoni, C. (1998). Influência do genótipo *Bos indicus* na atividade de calpastatina e na textura da carne de novilhos abatidos no sul do Brasil. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 18(4). <https://doi.org/10.1590/S0101-20611998000400009>
- Sabow, A. B., Nakyinsige, K., Adeyemi, K. D., Sazili, A. Q., Johnson, C. B., Webster, J., & Farouk, M. M. (2017). High frequency pre-slaughter electrical stunning in ruminants and poultry for halal meat production: A review. *Livestock Science*, 202, 124–134. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2017.05.021>
- Salfinger, Y., & Tortorello, M. L. (2015). *Compendium of methods for the microbiological examination of foods* (5th ed.). American Public Health Association.
- Simmons, N. J., Daly, C. C., Cummings, T. L., Morgan, S. K., Johnson, N. V., & Lombard, A. (2008). Reassessing the principles of electrical stimulation. *Meat Science*, 80(1), 110–122. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.05.006>
- Smith, R. D., Nicholson, K. L., Nicholson, J. D. W., Harris, K. B., Miller, R. K., Griffin,

- D. B., & Savell, J. W. (2008). Dry versus wet aging of beef: Retail cutting yields and consumer palatability evaluations of steaks from US Choice and US Select short loins. *Meat Science*, 79(4), 631–639. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.10.028>
- Toldrá, F., Flores, M., & Aristoy, M.-C. (1995). Enzyme generation of free amino acids and its nutritional significance in processed pork meats. In *Developments in Food Science* (pp. 1303–1322). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0167-4501\(06\)80235-9](https://doi.org/10.1016/S0167-4501(06)80235-9)
- Warriss, P. D. (2009). Meat quality. In *Meat science: an introductory text* (pp. 77–96). CABI. <https://doi.org/10.1079/9781845935931.0077>
- Wyrwisz, J., Moczowska, M., Kurek, M., Stelmasiak, A., Póltorak, A., & Wierzbicka, A. (2016). Influence of 21 days of vacuum-aging on color, bloom development, and WBSF of beef semimembranosus. *Meat Science*, 122, 48–54. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.07.018>
- Zhang, Y., Ji, X., Mao, Y., Luo, X., Zhu, L., & Hopkins, D. L. (2019). Effect of new generation medium voltage electrical stimulation on the meat quality of beef slaughtered in a Chinese abattoir. *Meat Science*, 149, 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.11.011>