



Universidade Federal de Santa Catarina
Centro Tecnológico
Departamento de Engenharia Química e
Engenharia de Alimentos

FERNANDA FABRIN FUHRMEISTER

**ANÁLISE DE CUSTO NA PRODUÇÃO DE LINGUIÇA DE CARNE E GORDURA
CELULAR BOVINA**

Florianópolis, SC
2025

FERNANDA FABRIN FUHRMEISTER

**ANÁLISE DE CUSTO NA PRODUÇÃO DE LINGUIÇA DE CARNE E GORDURA
CELULAR BOVINA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetida ao Programa de Graduação em Engenharia Química e Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Alimentos

Orientadora: Profa. Silvani Verruck

Coorientador: Dr. Anderson Moreira Gomes

Florianópolis, SC
2025

AGRADECIMENTOS

Inicio este agradecimento expressando minha profunda gratidão à minha família, por me oferecerem apoio incondicional, por sempre acreditarem no meu potencial e por celebrarem intensamente cada uma das minhas conquistas. São, sem dúvida, meus maiores exemplos e a base de tudo que construí. De forma muito especial, agradeço ao meu irmão, pela parceria constante e por toda a força ao longo desses anos.

Agradeço à minha orientadora, Profa. Silvani Verruck, pela dedicação, clareza nas orientações, paciência e incentivo constante, que foram fundamentais para a realização deste trabalho. Também agradeço ao meu coorientador, Dr. Anderson Moreira Gomes, pelo apoio e valiosas contribuições ao longo de toda a pesquisa.

Aos amigos que fiz ao longo da graduação, sou grata pelas trocas de experiências e por tornarem essa caminhada mais leve e memorável. Estendo também meu agradecimento a todos os meus amigos, que sempre estiveram presentes, oferecendo suporte e alegria em todos os momentos.

Por fim, minha gratidão a cada pessoa que, de alguma forma, contribuiu para o sucesso desta etapa tão significativa da minha vida.

RESUMO

A crescente demanda global por proteína e os significativos impactos ambientais da pecuária convencional impulsionam a busca por alternativas sustentáveis, sendo a carne celular uma inovação promissora por otimizar o uso de recursos, reduzir danos ambientais e éticos, e garantir a segurança alimentar, apesar dos desafios econômicos iniciais em sua produção. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo principal analisar os custos do processamento de linguiça de carne cultivada bovina, avaliando sua viabilidade econômica e potencial competitivo no mercado alimentício, por meio da identificação dos principais componentes dos custos e da comparação com as versões utilizando carne convencional e a proteína de soja, além de apontar desafios e oportunidades para sua adoção em larga escala. Desde os primeiros protótipos, os custos já foram reduzidos em até 99%. A metodologia considerou a formulação de três tipos de linguiça fresca: com 100% carne convencional (F1), 100% carne e gordura celular (F2) e híbrida (proteína de soja com 30% gordura celular, F3), utilizando um processo de produção baseado em batelada em escala de 3.500kg de carne destinada à produção de um lote. Para a análise de custos externos, foi aplicada a Contabilidade de Custos Reais (TCA), mensurando os impactos nas dimensões de capital natural, social e humano. Os resultados indicam que o meio de cultura, especialmente os fatores de crescimento, é o principal fator de custo da carne celular, enquanto a produção de gordura cultivada é significativamente menos dispendiosa do que a de carne muscular, representando uma vantagem econômica. Na análise de custos externos, a carne convencional apresenta maiores impactos ambientais (variando entre \$12,30 e \$110,07), em comparação à carne celular (\$0,57 a \$46,05) e à proteína de soja (\$0,31 a \$100,05); já os impactos sociais e humanos revelam complexidades e desafios semelhantes entre as opções. Além disso, a linguiça híbrida (F3) se destaca como uma ótima estratégia de transição, pois reduz custos e melhora características sensoriais de produtos à base de plantas, conciliando sustentabilidade e aceitação do consumidor. Por fim, o estudo conclui que investimentos contínuos em pesquisa, desenvolvimento e otimização de processos são essenciais para a consolidação da carne celular no mercado.

Palavras chave: Carne cultivada, viabilidade econômica, custos de produção

ABSTRACT

The growing global demand for protein and the significant environmental impacts of conventional livestock farming are driving the search for sustainable alternatives. Cellular meat emerges as a promising innovation in this context, aiming to optimize resource use, reduce environmental and ethical harms, and ensure food security, despite initial economic challenges in its production. This study's main objective was to analyze the costs of structured bovine cultivated meat sausage, evaluating its economic viability and competitive potential in the food market. This was achieved by identifying the main cost components, comparing them with conventional meat and soy protein, and pinpointing challenges and opportunities for its large-scale adoption. Since the first prototypes, costs have already been reduced by up to 99%. The methodology involved formulating three types of fresh sausage: conventional (F1), 100% cellular meat and fat (F2), and hybrid (soy protein with cellular fat, F3), based on a production batch of 3.500kg of raw material. The cellular meat production process was based on a hypothetical batch scheme with scale-up stages and the acquisition of established cell cultures for cost estimation. For the analysis of external costs, True Cost Accounting (TCA) was applied, measuring impacts across natural, social, and human capital dimensions. The results and discussions indicate that the culture medium, especially growth factors, is the primary cost driver for cellular meat. However, the production of cultivated fat is significantly less expensive than muscle meat, representing an economic advantage. In the external cost analysis, conventional meat shows greater environmental impacts (ranging between \$12,30 and \$110,07) compared to cultured meat (\$0,57 to \$46,05) and soy protein (\$0,31 to \$100,05); social and human impacts reveal similar complexities and challenges across the options. Furthermore, the hybrid sausage (F3) stands out as an excellent transition strategy, as it reduces costs and improves the sensory characteristics of plant-based products, reconciling sustainability and consumer acceptance. Finally, the study concludes that continuous investment in research, development, and process optimization are essential for the consolidation of cellular meat in the market.

Keywords: Cultivated meat, economic viability, production costs.

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 7 |
| 2. OBJETIVOS | 10 |
| 2.1 OBJETIVO GERAL | 10 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS | 10 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA | 11 |
| 3.1. CARNE CELULAR | 11 |
| 3.2 ETAPAS DE PRODUÇÃO DA CARNE CELULAR | 11 |
| 3.3 ANÁLISE DE CUSTOS EM PRODUTOS A BASE DE CARNE OU GORDURA CELULAR | 14 |
| 3.4 CONTABILIDADE DE CUSTOS REIAS (TCA) | 15 |
| 3.5 LEGISLAÇÃO PARA PRODUTOS CÁRNEOS A BASE DE CARNE CELULAR | 15 |
| 3.6 REGULAMENTO TÉCNICO DE IDENTIDADE E QUALIDADE (RTIQ) DE LINGUIÇA | 16 |
| 4 METODOLOGIA | 17 |
| 4.1 PROCESSO DE PRODUÇÃO DA CARNE E GORDURA CELULAR | 17 |
| 4.1.1 CÉLULAS UTILIZADAS | 18 |
| 4.1.2 MEIO DE CULTURA | 18 |
| 4.2 FORMULAÇÃO DE LINGUIÇA A BASE DE CARNE E GORDURA CELULAR | 19 |
| 4.3 ANALISE DE CUSTO | 23 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 23 |
| 5.1 CUSTO DA CARNE E GORDURA CELULAR | 23 |
| 5.2 ANÁLISE DE CUSTOS DAS LINGUIÇAS | 30 |
| 5.2.1 CUSTO DA FORMULAÇÃO | 30 |
| 5.2.2 CUSTOS EXTERNOS | 34 |
| 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 40 |
| 7. REFERÊNCIAS | 43 |

1. INTRODUÇÃO

A população mundial está crescendo continuamente, e as projeções indicam que esse aumento continuará nas próximas décadas. Com isso, a demanda por alimentos também deve crescer significativamente, com um risco de comprometer a segurança alimentar de uma população que pode chegar a 10 bilhões até 2050 (Abbas et al., 2025). Esse cenário impõe desafios aos sistemas de produção de alimentos, que precisam aumentar a oferta de forma sustentável. Isso inclui tanto a produção de grãos e vegetais quanto a de proteínas de origem animal, que desempenham um papel essencial na dieta de muitas culturas ao redor do mundo (Saath; Fachinello, 2018). Pesquisas apontam que o consumo global de carne pode dobrar até 2050 (Malila et al., 2024). No entanto, a intensificação da produção animal pode entrar em conflito com os objetivos de sustentabilidade, gerando impactos ambientais, desafios para a segurança alimentar e questões relacionadas ao bem-estar animal (FAO, 2020; Henchion et al., 2017), o que levanta preocupações.

Atualmente, a agricultura animal ocupa 70% das terras aráveis, gera 14,5% das emissões antropogênicas de gases de efeito estufa (Grossi et al., 2019) consome 27% dos recursos de água doce apenas para a produção de ração para o gado (Gerbens-Leenes; Mekonnen; Hoekstra, 2013). Diante desse cenário, torna-se evidente que a agricultura animal convencional e os métodos tradicionais de produção de carne não conseguirão sustentar o crescimento projetado na demanda global (Boakes et al., 2024).

Logo, para atender à crescente demanda por proteínas, é necessário investir em inovações na agricultura, na pecuária e em novas formas de produção, como a carne celular. Esta última surge como uma alternativa promissora, ajudando a otimizar o uso de recursos naturais limitados, como água e terra, além de reduzir os impactos ambientais associados à produção de carne convencional (REHBEIN, 2024; Tuomisto; Teixeira De Mattos, 2011). A redução do impacto ambiental da produção de carne pode ser alcançada por meio de avanços na pecuária e pela diminuição da dependência de práticas tradicionais de agricultura animal. Nesse contexto, as tecnologias de agricultura celular ganham destaque, pois oferecem o potencial de substituir ou minimizar a necessidade dessas práticas (Sinke et al., 2023). Até as práticas de produção animal mais sustentáveis tendem a ter impactos maiores do que os de substitutos vegetais equivalentes (Nemecek; Poore, 2018).

A agricultura celular apresenta benefícios significativos ao eliminar a necessidade de intermediários animais ou vegetais, contribuindo para a redução de externalidades negativas, como mudanças climáticas, degradação ambiental, resistência a antibióticos, doenças zoonóticas e preocupações com o bem-estar animal (Lam, 2024; Vecchi Dortas, 2022).

No que se refere ao impacto ambiental, estimativas iniciais indicam que a carne celular pode demandar 45% menos energia, ocupar 99% menos terra e reduzir as emissões de gases de efeito estufa entre 78% e 96% (Stephens et al., 2018; Tuomisto; Teixeira De Mattos, 2011). Além disso, considerando as questões relacionadas ao bem-estar animal, mais de 70 bilhões de animais terrestres são criados e abatidos anualmente para consumo humano, muitas vezes em condições precárias e com ciclos de vida extremamente curtos (Treich, 2021). A soma desses fatores reforça a necessidade de alternativas como a agricultura celular.

A carne celular, por não depender da criação e do abate de animais, configura-se como uma solução com profundas implicações éticas, um aspecto relevante, visto que a ética é apontada por diversas pesquisas como o principal fator motivador da adesão a essa inovação (Weinrich; Strack; Neugebauer, 2020). Outro ponto importante é a segurança alimentar: por ser produzida em ambientes controlados, sem contato com organismos externos, a carne celular apresenta menor risco de contaminação por patógenos intestinais, tornando-se potencialmente mais segura do que a carne convencional (Chriki; Hocquette, 2020).

No entanto, sua produção ainda levanta desafios econômicos e sociais. Muitos consumidores não compreendem totalmente a ciência por trás dos alimentos à base de células, e, embora a carne celular tenha o potencial de igualar ou até superar o sabor e a textura da carne convencional, a aceitação desse produto dependerá, em grande parte, da forma como será rotulado e apresentado ao público (Brennan et al., 2021; Bryant et al., 2019). Diante disso, é fundamental que as autoridades mantenham um diálogo transparente e inclusivo com os consumidores desde o início do processo (Nucci; L. & Hallman, 2015).

Com a popularização da carne celular, seu impacto no mercado de trabalho poderá ser significativo a longo prazo. Embora a demanda por trabalhadores na

produção desse tipo de carne seja semelhante à dos sistemas convencionais, as habilidades exigidas serão substancialmente diferentes. Juntamente com isso, como sua produção independe de fatores climáticos ou topográficos específicos, podem surgir impactos regionais. Produtores tradicionais de carne, por exemplo, podem perder parte de sua vantagem competitiva para concorrentes de outras regiões do país ou até mesmo do mundo (Brennan et al., 2021).

Outra preocupação relevante em relação à carne celular é o custo de produção. Inicialmente, esses produtos terão um preço mais elevado, o que pode torná-los inacessíveis para parte dos consumidores (Risner et al., 2021). No entanto, os custos já caíram significativamente desde o desenvolvimento do primeiro protótipo de carne celular (Kupferschmidt, 2013), apesar dessa redução, os preços ainda são elevados para a comercialização em larga escala. O meio de crescimento celular é o principal fator de custo (Brennan et al., 2021; Swartz, 2021), mas outras despesas, como energia, oxigênio, transporte e mão de obra, também influenciam diretamente o preço final (Mattick, 2018).

Atualmente, diversas empresas trabalham no desenvolvimento de carne celular e buscam levar seus produtos ao mercado nos próximos anos (Rubio; Xiang; Kaplan, 2020). Com o avanço da tecnologia e o aumento da escala de produção, espera-se uma redução progressiva dos preços. Desde os primeiros protótipos, os custos já foram reduzidos em até 99%, demonstrando um avanço significativo nesse sentido (Brennan et al., 2021).

Ainda assim, o desafio permanece complexo. Os custos de produção da carne celular continuam consideravelmente superiores aos das proteínas animais convencionais, principalmente devido à fabricação ainda limitada a escalas laboratoriais e piloto, além de desafios técnicos que precisam ser superados (Stephens et al., 2018). Estimativas indicam que cerca de 75% desses custos podem ser eliminados com a ampliação da escala e o aperfeiçoamento dos processos de produção. Os 25% restantes dependem de avanços em pesquisa e desenvolvimento (Brennan et al., 2021).

Uma alternativa para reduzir custos e tornar o produto mais acessível é a combinação de carne celular com proteínas vegetais, resultando em produtos híbridos

que vêm ganhando atenção no mercado (Grasso; Jaworska, 2020; Santos et al., 2022; Sha; Xiong, 2020). No entanto, estima-se que levará cerca de uma década até que o preço da carne celular seja inferior ao da carne convencional (Brennan et al., 2021). Apesar disso, pesquisas indicam que muitos consumidores já estão dispostos a pagar mais por alimentos que consideram mais saudáveis ou sustentáveis (Malila et al., 2024).

Embora a carne celular ofereça benefícios ambientais e sanitários significativos, sua viabilidade econômica ainda precisa ser analisada com cautela (Risner et al., 2021). A transição gradual para essa tecnologia pode, a longo prazo, contribuir substancialmente para a redução das emissões associadas ao consumo de proteína animal, mas garantir a sustentabilidade econômica da produção será um fator essencial para sua consolidação no mercado (Treich, 2021).

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar uma análise dos custos envolvidos na produção de linguiça de carne celular estruturada bovina, visando avaliar sua viabilidade econômica e seu potencial competitivo no mercado alimentício.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Identificar e categorizar os principais componentes dos custos de produção de carne celular, incluindo matéria-prima e custos externos;
- Comparar os custos de produção de linguiça de carne celular bovina com os custos de produção de linguiça de carne convencional de origem animal e de uma linguiça híbrida de proteína de soja com gordura cultivada;
- Identificar os principais desafios e oportunidades para a adoção em larga escala da linguiça de carne celular estruturada bovina no mercado global, com base nos resultados da análise de custos.

3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1. CARNE CELULAR

Existem diversos conceitos e descrições acerca da carne celular e de seu processo de produção. No entanto, há um consenso sobre o resultado final: a carne celular pode ser descrita, de forma breve, como a carne produzida a partir do cultivo de células animais em um ambiente controlado (Letti et al., 2021). O principal desafio na produção de carne celular está em reproduzir, de forma controlada, o ambiente necessário para o crescimento muscular fisiológico animal, seja em escala laboratorial ou industrial. A engenharia de tecido muscular animal depende de um profundo entendimento dos aspectos biológicos, químicos e físicos relacionados ao desenvolvimento do tecido e das células animais (Vilela et al., 2020).

A carne convencional é composta por um tecido muscular biológico complexo, constituído por fibras contráteis organizadas em uma rede de tecido conjuntivo, que forma tendões e aderências conectadas aos ossos, direta ou indiretamente. Em termos de composição, em média, contém cerca de 75% de água, 19% de proteínas, 3,5% de substâncias solúveis não proteicas (incluindo componentes inorgânicos) e 2,5% de gordura (Kumar, Sood e Han, 2022). Assim, é essencial que a carne celular seja projetada para possuir características iguais ou superiores às da carne convencional, garantindo ao consumidor um produto que mimetize ou supere o convencional.

3.2 ETAPAS DE PRODUÇÃO DA CARNE CELULAR

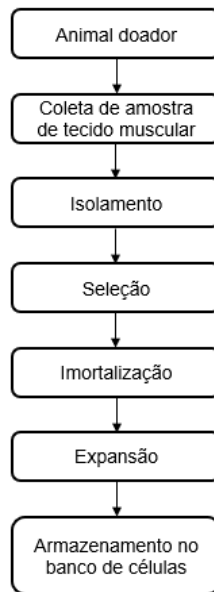
O processo de produção da carne celular começa com a seleção do animal doador e a coleta das células para a obtenção do material biológico a ser utilizado no cultivo celular. A seleção do animal doador é realizada com base em critérios específicos, incluindo uma inspeção veterinária detalhada. Durante essa avaliação, são considerados parâmetros clínicos, histórico vacinal, registro de doenças prévias e o uso de medicamentos veterinários, como antibióticos. Esse procedimento assegura que o animal esteja em boas condições de saúde no campo antes de prosseguir para a próxima etapa (Lanzoni et al., 2022).

Posteriormente a seleção, realiza-se a amostragem celular. Uma das formas de se realizar a coleta, inicia com a higienização da região do músculo semimembranoso, que é lavada, raspada e desinfetada com etanol. Em seguida, o animal recebe anestesia local à base de lidocaína, garantindo maior segurança e conforto. A coleta da amostra muscular é realizada por meio de uma incisão com um tubo metálico estéril. Esse procedimento ocorre diretamente no campo, em ambiente aberto e sob temperatura ambiente. Após a coleta das células, estas ainda necessitam passar pelo processo de isolamento antes de serem utilizadas no cultivo celular (Sant'ana et al., 2023).

Após a coleta da amostra muscular, as células de interesse — como células-tronco musculares ou progenitoras — são isoladas do tecido por meio de técnicas como digestão enzimática e triagem celular. Apenas as células com maior potencial de multiplicação e diferenciação são selecionadas. Em muitos casos, especialmente na produção em larga escala, essas células precisam ser imortalizadas, ou seja, modificadas para que possam se dividir indefinidamente sem entrar em senescência (perda da capacidade de replicação). Esse processo permite a criação de linhagens celulares estáveis, que mantêm suas características e desempenho ao longo do tempo (Martins et al., 2025).

Com as células já selecionadas e imortalizadas, inicia-se a fase de expansão, na qual elas são cultivadas em biorreatores, sob condições controladas de temperatura, oxigênio, pH e nutrientes. O objetivo é promover sua multiplicação em grande quantidade. Parte dessas células, já expandidas ou ainda em fase inicial, é então armazenada em bancos de células (Kulus et al., 2023). Esses bancos funcionam como uma reserva de material biológico de alta qualidade, permitindo que a produção seja retomada ou ampliada sempre que necessário, sem a necessidade de nova coleta no animal doador. O Fluxograma 1 mostra esse processo.

Fluxograma 1 - Processo de obtenção das células celular

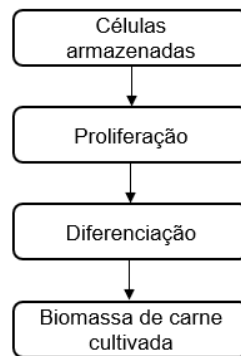


Fonte: Autora (2025)

Também é possível adquirir culturas de células já estabelecidas, que podem ser obtidas por meio de fornecedores comerciais ou instituições sem fins lucrativos, como bancos de células. Existem fornecedores confiáveis que oferecem linhas celulares de alta qualidade, submetidas a rigorosos testes para garantir sua integridade e a ausência de contaminantes. O empréstimo de culturas de outros laboratórios não é recomendado, pois pode aumentar significativamente o risco de contaminação (GIBCO, 2020).

É a partir dessas células cultivadas que se inicia, de fato, o processo de produção da carne celular, como pode-se ver no fluxograma 2. Elas são transferidas para biorreatores, onde são mantidas em um meio de cultura rico em nutrientes, responsável por fornecer as condições ideais para a proliferação celular — isto é, a multiplicação acelerada das células. Uma vez atingida a densidade celular necessária, dá-se início à fase de diferenciação, na qual as células são expostas a estímulos bioquímicos e físicos que as direcionam a se especializar em tipos específicos, como fibras musculares, células adiposas e tecido conjuntivo — componentes fundamentais da estrutura da carne convencional, que formará o produto final (Kirsch; Morales-Dalmau; Lavrentieva, 2023; Martins et al., 2025)

Fluxograma 2 - Processo de obtenção da biomassa de carne cultivada



Fonte: Autora (2025)

3.3 ANÁLISE DE CUSTOS EM PRODUTOS A BASE DE CARNE OU GORDURA CELULAR

A análise de custos na produção de carne celular é uma etapa essencial para avaliar a viabilidade econômica dessa tecnologia e identificar os principais pontos críticos que influenciam seu preço final (Chen et al., 2022). Diferentemente da carne convencional, a carne cultivada requer processos altamente especializados, que envolvem biotecnologia, engenharia de tecidos e infraestrutura complexa (Sant'ana et al., 2023). De forma geral, esses custos podem ser organizados em três categorias principais: despesas de capital, operacionais e de mão de obra (Risner et al., 2021).

As despesas de capital referem-se aos investimentos iniciais em equipamentos e infraestrutura, como biorreatores, sistemas de controle ambiental e laboratórios especializados (Humbird, 2021). Já as despesas operacionais abrangem os custos recorrentes necessários para manter a produção em funcionamento, como a aquisição de meios de cultura — um dos insumos mais onerosos —, fatores de crescimento, energia elétrica, água, manutenção de equipamentos, embalagens e licenças regulatórias. Ademais, incluem-se os custos com o desenvolvimento e manutenção de linhas celulares estáveis, que são essenciais para garantir consistência e rendimento no processo produtivo (Barzee et al., 2022). As despesas de mão de obra, por sua vez, englobam os salários, encargos sociais e treinamentos de profissionais altamente qualificados, como biólogos celulares, engenheiros de processos e técnicos de laboratório. Soma-se a isso a necessidade de atender às exigências regulatórias

sanitárias e alimentares e o consumo significativo de recursos naturais (Garrison; Biermacher; Brorsen, 2022).

Além desses elementos, também são considerados os custos externos evitados, como a redução de impactos ambientais, emissões de gases de efeito estufa e uso intensivo de terra e água (De; Marreiros, 2024). Assim, a análise de custos da carne celular não se limita ao cálculo de insumos diretos, mas adota uma abordagem sistêmica, que contempla desde a base biotecnológica até os impactos sociais e ambientais associados à produção.

3.4 CONTABILIDADE DE CUSTOS REAIS (TCA)

A Contabilidade de Custos Reais (TCA) é uma abordagem utilizada para mensurar os custos externos de um produto, levando em conta seus impactos três dimensões principais: capital natural, capital social e capital humano (Snoek et al., 2024). Dessa forma, é possível quantificar e valorar as externalidades ambientais, sociais e de saúde, positivas e negativas, facilitando a análise dos custos e benefícios de decisões comerciais ou políticas (Global Alliance for the Future of Food, 2020). A sustentabilidade é alcançada pela redução dos custos ocultos, abrangendo capitais produzido, social, ambiental e humano (FOOD AND AGRICULTURE, 2023).

3.5 LEGISLAÇÃO PARA PRODUTOS CÁRNEOS A BASE DE CARNE CELULAR

A Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) nº 839, de 14 de dezembro de 2023, publicada pela Anvisa, estabelece as diretrizes para a comprovação de segurança e autorização de uso de novos alimentos e novos ingredientes no Brasil. Seu principal objetivo é modernizar e tornar mais eficiente o processo regulatório, promovendo maior transparência e segurança para consumidores e empresas.

A norma define "novos alimentos e ingredientes" como aqueles sem histórico de consumo seguro no país, detalhando critérios como a finalidade alimentar, os métodos de obtenção (como extração seletiva ou modificação significativa) e o uso de nanomateriais. Além disso, introduz um procedimento administrativo que permite às

empresas consultarem previamente a Anvisa para verificar se determinado alimento ou ingrediente é classificado como novo, sendo que as respostas a essas consultas serão publicadas no portal da agência.

A RDC também estabelece requisitos específicos de avaliação de segurança, adaptados à natureza e à complexidade dos produtos, e incorpora procedimentos otimizados para análise, especialmente no caso de alimentos ou ingredientes com histórico de consumo seguro ou já aprovados por autoridades reguladoras estrangeiras equivalentes. Todos os novos produtos devem seguir essas diretrizes (ANVISA, 2023a).

No contexto da produção de produtos cárneos à base de carne cultivada, essa resolução é especialmente relevante, pois a carne cultivada é considerada um “novo alimento” devido à sua tecnologia inovadora e à ausência de histórico de consumo no Brasil. Assim, os processos de avaliação e autorização descritos na RDC nº 839 são fundamentais para garantir a segurança, a qualidade e a regulamentação adequada desses produtos, promovendo sua inserção segura no mercado nacional.

3.6 REGULAMENTO TÉCNICO DE IDENTIDADE E QUALIDADE (RTIQ) DE LINGUIÇA

O Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade (RTIQ) de Linguiça é um documento normativo estabelecido pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), que tem como objetivo principal fixar a identidade e as características mínimas de qualidade que o produto cárneo denominado linguiça deve apresentar para ser comercializado.

Esse regulamento define os parâmetros obrigatórios relacionados à identidade do produto, caracterizando a linguiça como um produto cárneo industrializado, obtido a partir de carnes de animais de açougue, com ou sem adição de tecidos adiposos e outros ingredientes, embutido em envoltório natural ou artificial e submetido a um processo tecnológico adequado.

Estabelece, ainda, a composição mínima exigida, determinando o teor mínimo de proteína, os limites de umidade, gordura e colágeno, bem como as proporções

permitidas de carne e gordura na formulação. Também especifica os ingredientes autorizados e suas quantidades máximas, além dos critérios de qualidade sensorial e sanitária — como textura, sabor, odor, coloração e limites microbiológicos — com o objetivo de garantir a segurança do consumidor.

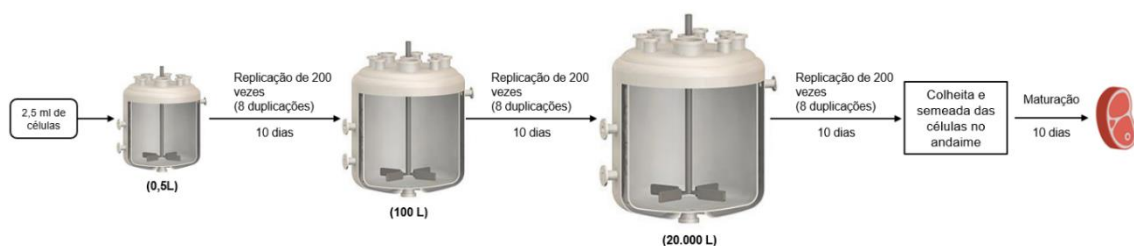
Além disso, contempla as diferentes classificações do produto, que variam conforme o processo de fabricação, como é o caso da linguiça frescal, foco do presente trabalho, e estabelece regras para rotulagem e apresentação, assegurando informações claras e padronizadas ao consumidor (BRASIL, 2000).

4 METODOLOGIA

4.1 PROCESSO DE PRODUÇÃO DA CARNE E GORDURA CELULAR

A Figura 1 apresenta o processo de produção de carne celular considerado para a realização da análise de custo neste estudo. Para a mensuração dos custos, foi considerado um esquema de produção em batelada. O processo hipotético utilizado para a mensuração dos custos na produção de carne celular foi estruturado em etapas de aumento de escala, seguindo um esquema de produção em batelada. Cada batelada de produção foi iniciada com a inoculação das células, partindo de uma cultura inicial. Para acomodar o aumento de 200 vezes entre a inoculação e a proliferação, cada reator possui 1/200 do volume do reator subsequente. O primeiro reator teve um volume de 0,5 litros (500 ml), sendo inoculado a partir de um único frasco congelado de 2,5 ml de células com densidade de 4×10^7 células/ml. O reator final considerado teve um volume de 20.000 litros.

Figura 1 - Esquema utilizado do processo de produção em batelada



Fonte: Adaptado de SPECHT, 2020

Foram consideradas oito duplicações celulares em cada estágio do processo de aumento de escala. O tempo estimado para cada duplicação foi de aproximadamente 28 horas, totalizando um tempo de residência de cerca de 10 dias por estágio. Então, realizou-se a colheita e a semeadura das células no andaime. Este componente exerce um papel fundamental ao fornecer suporte estrutural às células, permitindo o crescimento em três dimensões, característica essencial para a replicação da textura da carne. O período de maturação celular foi estimado em 10 dias, resultando em um tempo total de processo de aproximadamente 40 dias.

Para o cálculo do rendimento por batelada, foi considerada uma densidade celular de 4×10^7 células/ml. No entanto, há potencial para aumentar esse valor, o que resultaria em um maior rendimento de carne produzida por lote. Considerando um volume médio por célula de $5 \times 10^3 \mu\text{m}^3$, o rendimento estimado é de 3.500 kg de carne por lote. Na estimativa, foram utilizados diversos fatores conservadores, sugerindo que o rendimento real pode ser significativamente maior (Specht, 2020).

4.1.1 CÉLULAS UTILIZADAS

Para a obtenção do material biológico necessário para o processo de produção da carne celular, pode-se optar por estabelecer uma cultura própria a partir de células primárias ou adquirir culturas de células já estabelecidas.

Neste estudo, a mensuração dos custos da produção de carne celular considera a possibilidade de aquisição de culturas de células já estabelecidas por meio de fornecedores especializados. Essa abordagem pode reduzir a complexidade e os custos associados ao isolamento e à manutenção inicial das células.

4.1.2 MEIO DE CULTURA

Um estudo realizado pelo The Good Food Institute explorou cenários hipotéticos para a redução dos custos do meio de cultura celular. A pesquisa concluiu que estratégias como a redução da concentração de fatores de crescimento, mantendo níveis suficientes para a viabilidade celular, e a substituição parcial desses

fatores por alternativas mais acessíveis, aliadas à produção em larga escala, podem impactar significativamente os custos. Para este trabalho, foi selecionado um dos cenários avaliados no estudo, aquele que se apresentou como a alternativa economicamente mais vantajosa e tecnicamente viável para a produção do meio de cultura.

Além disso, para a estimativa dos requisitos de meio de cultura necessários à produção de um lote, adotou-se uma média entre dois cenários extremos — limite inferior e limite superior — definidos com base em diferentes práticas de uso. O limite inferior considera que todo o volume de meio adicionado em cada etapa do processo permanece no sistema e é integralmente transferido entre os reatores subsequentes. Nesse cenário, o volume mínimo necessário corresponde ao volume total do maior reator, estimado em 20.000 litros. Por outro lado, o limite superior pressupõe a substituição completa do meio de cultura a cada dois dias, uma prática comum em cultivos em escala de bancada. Considerando cinco trocas de meio em cada etapa do processo, o volume total estimado é de 140.000 litros. Dessa forma, foi considerado um consumo de 80.000 litros de meio por lote, média entre os dois limites (Specht, 2020).

4.2 FORMULAÇÃO DE LINGUIÇA A BASE DE CARNE E GORDURA CELULAR

A Tabela 1 apresenta as composições e quantidades dos ingredientes utilizados na formulação da linguiça frescal convencional (F1), linguiça frescal de carne e gordura celular (F2) e linguiça frescal híbrida formulada com proteína de soja e gordura celular (F3). As formulações de três tipos de linguiça frescal foram desenvolvidas para fins de comparação de custos, permitindo uma avaliação mais ampla sobre a viabilidade econômica e o desempenho de alternativas à carne tradicional.

As formulações foram elaboradas considerando o uso de 3.500 kg de matéria-prima. Esse valor foi adotado como referência para a definição das dosagens ou níveis de inclusão de cada ingrediente, permitindo a padronização necessária para a posterior comparação dos custos entre as formulações. Essa quantidade de matéria-prima resulta em uma produção de 5.407,6 kg de linguiça por lote.

Foram consideradas a linguiça convencional (F1), em razão de seu elevado consumo atual, e a linguiça à base de proteína de soja (F3), como alternativa viável diante dos ainda elevados custos associados à linguiça de carne celular. Nas formulações das linguiças de carne celular (F2) e à base de proteína de soja (F3), foram utilizadas células de gordura celular com o objetivo de tornar o produto final o mais semelhante possível à linguiça convencional (F1), tanto em termos de sabor quanto de textura e suculência. A adição dessas células de gordura celular busca reproduzir características sensoriais típicas dos produtos cárneos, que são difíceis de alcançar apenas com proteínas vegetais ou carnes celulares, contribuindo assim para maior aceitação do consumidor (Ben-Arye et al., 2020).

A formulação da linguiça frescal foi elaborada com base na Instrução Normativa nº 4, de 31 de março de 2000, do Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA), que estabelece os Regulamentos Técnicos de Identidade e Qualidade (RTIQ) para produtos cárneos. Conforme essa normativa, o teor máximo permitido de gordura em linguiças frescas é de 30% (BRASIL, 2000), valor adotado nesta formulação com o objetivo de reduzir os custos de produção e agregar sabor e textura, mantendo-se dentro dos padrões legais.

Tabela 1 -Ingredientes utilizados na formulação da linguiça frescal convencional (F1), linguiça frescal de carne e gordura celular (F2) e linguiça frescal híbrida formulada com proteína de soja e gordura celular (F3). (kg/lote).

| Matéria prima | F1 | F2 | F3 |
|----------------------|------|------|------|
| Carne convencional | 3500 | - | - |
| Gordura convencional | 1680 | - | - |
| Carne celular | - | 3500 | - |
| Gordura celular | - | 1680 | 1680 |
| Proteína de soja | - | - | 3500 |
| Sal refinado | 5,6 | 5,6 | 5,6 |
| Pimenta do reino | 5,6 | 5,6 | 5,6 |
| Alho | 5,6 | 5,6 | 5,6 |

| | | | |
|------------------------------------|------|------|------|
| Glutamato Monossódico (INS 621) | 5,6 | 5,6 | 5,6 |
| Tripolifosfato de Sódio (INS 451i) | 14 | 14 | 14 |
| Sal de Cura | 11,2 | 11,2 | 11,2 |
| Água gelada | 180 | 180 | 180 |

Para a formulação de linguiça frescal bovina convencional (F1) foi considerado o corte coxão mole, também conhecido como coxão de dentro ou chã de dentro, proveniente da parte traseira do animal, especificamente da porção interna da coxa, como base proteica principal. Essa escolha foi fundamentada por uma série de fatores técnicos e sensoriais, visto que o coxão mole apresenta teor proteico elevado, com aproximadamente 21,2 g de proteínas por 100 g de carne e quando cozido aproximadamente 32,4 g de proteínas (UNICAMP, 2011). Essas proteínas são essenciais para a emulsificação e ligação com outros ingredientes durante o processamento de embutidos, garantindo a coesão e estabilidade da massa cárnea (Spada, 2013). Além disso, o coxão mole possui baixo teor de tecido conjuntivo, o que reduz a rigidez e melhora a textura da linguiça após o preparo — característica importante para a obtenção de produtos cárneos com textura agradável e uniforme (Moreira, 2016).

A capacidade de retenção de água e gordura do coxão mole é outra propriedade relevante, pois contribui significativamente para a suculência e palatabilidade do produto final. Essa retenção está relacionada à estrutura das proteínas musculares e ao pH da carne, fatores que influenciam diretamente na qualidade dos embutidos (Macedo et al., 2008). Além de todos esses aspectos, o preço de custo moderado do corte oferece um bom equilíbrio entre qualidade e viabilidade econômica, tornando-o uma opção atrativa para o uso em produtos processados, como linguiças frescas.

Para a formulação da linguiça frescal a base de carne e gordura celular (F2) foi considerada a matéria-prima obtida a partir do processo descrito em 4.1, buscando-

se o máximo de semelhança possível com as características sensoriais, estruturais e nutricionais da linguiça feita com carne convencional.

A proteína de soja foi escolhida como principal ingrediente proteico na formulação do análogo de carne (F3) por conta de suas destacadas propriedades nutricionais e funcionais. Primeiramente, a soja apresenta uma alta concentração proteica e um perfil de aminoácidos completo, semelhante ao da carne, o que garante elevada qualidade nutricional (Bakhsh et al., 2021). Além disso, as proteínas de soja possuem excelente capacidade de retenção de água e emulsificação, características importantes para o desenvolvimento da suculência e da estabilidade da estrutura do produto final (Makinen et al., 2017).

Outro fator determinante para sua seleção é o seu potencial para formar texturas fibrosas quando submetida à texturização, o que permite simular fibras musculares presentes na carne, proporcionando uma experiência sensorial mais próxima do produto animal (Chiang et al., 2019; Yao; Liu; Hsieh, 2006). A proteína de soja também apresenta boa capacidade de absorção de aromas e sabores, o que facilita a personalização sensorial e melhora a aceitação do consumidor (Sha; Xiong, 2020). Por fim, a ampla disponibilidade comercial da soja, aliada ao seu custo competitivo, reforça sua viabilidade como matéria-prima na formulação de análogos de carne à base de plantas (Michel; Hartmann; Siegrist, 2021).

Por fim, a seleção dos aditivos considerou os compostos mais utilizados em formulações de linguiça fresca (Castro Porto et al., 2020), e suas respectivas quantidades foram adaptadas com base em um trabalho analisado (Cidarta et al., 2018). Na formulação das linguiças, foram utilizados dois aditivos com funções distintas e complementares. O primeiro foi o Glutamato Monossódico (INS 621), um aditivo alimentar amplamente empregado como realçador de sabor, devido à sua capacidade de intensificar o paladar dos alimentos, tornando-os mais atrativos e agradáveis ao consumo. Já o segundo aditivo foi o Tripolifosfato de Sódio (INS 451i), que atua como estabilizante (ANVISA, 2023b). Ele contribui para a retenção de umidade, auxiliando a carne a manter a água durante o processamento e o cozimento, o que preserva a suculência do produto. Além disso, melhora a textura ao estabilizar as proteínas da carne, garantindo uma consistência mais firme e uniforme, ajuda a manter o pH ideal, favorecendo a emulsificação entre gordura e água, e reduz a perda

de peso por cocção, aumentando o rendimento final (Queiroz, 2006). Ambos os aditivos são amplamente utilizados na produção de linguiças.

4.3 ANÁLISE DE CUSTO

A análise de custo das três diferentes formulações de linguiça fresca (F1, F2 e F3) foi realizada considerando o processo e ingredientes descritos nos itens 4.1 e 4.2. Para isso, foi realizado um levantamento de literatura que descrevesse a análise de custo para os diferentes processos. Os cenários escolhidos foram devidamente justificados ao longo do texto.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CUSTO DA CARNE E GORDURA CELULAR

O primeiro custo a ser considerado no processo de elaboração de carne celular refere-se às células utilizadas. Para isso, foi realizado um orçamento com três empresas — Opo Bio Aotearoa, Creative Bioarray e AcceGen — para aquisição de vials contendo aproximadamente 1 milhão de células. A empresa Opo Bio Aotearoa apresentou um custo de 700 dólares por vial de células satélites bovinas da raça Angus. A AcceGen comercializa vials de células satélites musculares bovinas por 1.850 dólares. Já a Creative Bioarray oferece vials de células musculares esqueléticas bovinas pelo valor de 2.680 dólares. Com base nesses valores, verificou-se que o custo médio por vial foi de 1.743 dólares em abril de 2025, o que representa um fator inicial relevante na análise econômica do processo produtivo. Este valor médio foi considerado para a soma final dos custos do processo.

O meio de cultura celular constitui a maior parte dos custos na produção de CM, sendo o principal fator de custo marginal na produção em escala industrial, com estimativas variando entre 55% e 95% do custo total, segundo especialistas (Swartz, 2024). Dada sua influência nos custos, é essencial estudar e analisar alternativas para sua otimização. Na Tabela 2, estão listados os componentes utilizados no meio de cultura Essential 8, o qual serviu como base para o desenvolvimento do meio de cultura proposto neste trabalho. Esse meio é amplamente utilizado por sua formulação

definida, livre de elementos de origem animal, e por garantir condições adequadas para o cultivo celular com maior reprodutibilidade e controle de variáveis (Badenes et al., 2016).

Tabela 2 - Custos dos componentes do meio Essential 8 para um lote de 80.000 litros (3.500kg de carne celular). Adaptado SPECHT (2020).

| Componentes | Concentração Final (mg/L) | **Quantidade por 80.000 L (g) | Custo por g | Custo por 80.000 L (Cenário base) | Cenário usado* |
|----------------------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|
| DMEM/F12 (meio basal) | - | 80.000 L | \$ 156 por 50 L | \$ 249.600 | \$18.400 |
| A42P (ácido ascórbico 2-fosfato) | 64 | 5.120 | \$ 7,84 | \$ 40.140,8 | \$17,92 |
| NaHCO ₃ | 543 | 43.440 | <\$0,01 | \$ 9,56 | \$9,56 |
| Selenito de sódio | 0,014 | 1,12 | \$ 0,10 | \$ 0,12 | \$0,12 |
| Insulina | 19,4 | 1.552 | \$ 340 | \$ 527.680 | \$6.208 |
| Transferrina‡ | 10,7 | 856 | \$ 400 | \$ 342.400 | \$3.424 |
| FGF-2 | 0,1 | 8,00 | \$ 2.005.000 | \$ 16.040.000 | \$32 |
| TGF-β ₃ | 0,002 | 0,16 | \$ 80.900.000 | \$ 12.944.000 | \$0,64 |
| Custo total por 80.000 L | | | | \$ 30.143.830,48 | \$68.216 |
| Custo por litro | | | | \$ 376,80 | \$0,85 |

*Nesse cenário foi realizada a produção interna do meio basal, bem como a produção em larga escala dos fatores de crescimento.

*Taxas de conversão utilizadas: 1 EUR = 1,1205 USD; 1 BRL = 0,1782531 USD. (Banco Central do Brasil, 14 mai. 2025)

Os fatores de crescimento representam mais de 99% do custo total da formulação do meio de cultura, sendo o FGF-2 (Fator de Crescimento de Fibroblastos

2) e o TGF- β 3 (Fator de Crescimento Transformador-Beta) os principais responsáveis. Apesar de estarem presentes em concentrações muito baixas, esses dois componentes correspondem a mais de 96% do custo total do meio (Swartz, 2023), como pode ser observado na Tabela 3. Uma estratégia eficaz para reduzir esses custos é a produção interna dos fatores de crescimento, diminuindo a dependência de fornecedores externos e seus preços elevados. Estima-se que, em larga escala, essa abordagem possa reduzir os custos do meio de cultura celular em até duas ordens de magnitude, resultando em uma queda significativa nos custos gerais de produção (Swartz, 2023). Além disso, a redução dos custos das proteínas recombinantes, insulina e transferrina, também é um fator crucial para tornar a produção de CM economicamente viável. Todos esses passos são essenciais para que os custos se aproximem dos produtos de carne convencionais, permitindo maior competitividade e acessibilidade (Specht, 2020).

A Tabela 3 apresenta todos os componentes incluídos no meio basal utilizado na formulação do meio de cultura, juntamente com suas respectivas concentrações, quantidades por lote e custos. Esses componentes estão organizados por categoria — aminoácidos, sais, vitaminas e outros compostos —, evidenciando a complexidade e a diversidade de substâncias indispensáveis para o desenvolvimento celular adequado.

Tabela 3 - Componentes do meio basal, sua concentração, quantidade e custo (Adaptado SPECHT, 2020)

| Componentes do Meio Basal | Concentração Final (mg/L) | Quantidade por 80.000 L (g) | Custo por kg | Custo por 80.000 L |
|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------------|
| Sais | | | | |
| Cloreto de cálcio | 116,7 | 9336 | \$0,30 | \$2,80 |
| Sulfato cúprico | 0,0013 | 0,104 | \$2,50 | \$0,00 |
| Nitrato férrico | 0,05 | 4 | \$60,00 | \$0,00 |
| Sulfato ferroso | 0,417 | 33,36 | \$10,00 | \$0,32 |
| Cloreto de potássio | 311,8 | 24944 | \$0,39 | \$9,72 |

| | | | | |
|-----------------------------------|--------|--------|------------|-------------|
| Cloreto de magnésio | 28,64 | 2291,2 | \$0,33 | \$0,76 |
| Sulfato de magnésio | 48,84 | 3907,2 | \$0,65 | \$2,52 |
| Cloreto de sódio | 6995,5 | 559640 | \$0,40 | \$223,84 |
| Bicarbonato de sódio | 1200 | 96000 | \$0,50 | \$48,00 |
| Fosfato monossódico, monoidratado | 62,5 | 5000 | \$2,00 | \$10,00 |
| Fosfato de sódio dibásico | 64,9 | 5192 | \$10,00 | \$51,92 |
| Sulfato de zinco | 0,432 | 34,56 | \$0,84 | \$0,04 |
| Outros compostos | | | | |
| D-Glicose | 3151 | 252080 | \$0,80 | \$201,68 |
| Hipoxantina | 2,05 | 164 | \$100,00 | \$16,40 |
| Ácido linoleico | 0,042 | 3,36 | \$50,00 | \$0,16 |
| Ácido lipoico | 0,105 | 8,4 | \$68,00 | \$0,56 |
| Fenol vermelho | 8,1 | 648 | \$25,00 | \$16,20 |
| Putrescina | 0,081 | 6,48 | \$2.985,00 | \$19,36 |
| Piruvato de sódio | 5,5 | 440 | \$1.000,00 | \$440,00 |
| HEPES | 3575 | 286000 | \$55,00 | \$15.730,00 |
| Timidina | 0,365 | 29,2 | \$300,00 | \$8,76 |
| Aminoácidos | | | | |
| L-Alanina | 4,45 | 356 | \$30,00 | \$10,68 |
| Cloridrato de L-Arginina | 147,5 | 11800 | \$30,00 | \$354,00 |
| L-Asparagina | 7,5 | 600 | \$30,00 | \$18,00 |
| Ácido L-Aspártico | 6,65 | 532 | \$3,00 | \$1,60 |
| L-Cisteína | 17,56 | 1404,8 | \$25,00 | \$35,12 |

| | | | | |
|-----------------------------|--------|--------|---------|----------|
| L-Cistina | 24 | 1920 | \$25,00 | \$48,00 |
| Ácido L- Glutâmico | 7,35 | 588 | \$30,00 | \$17,64 |
| Glicina | 18,75 | 1500 | \$2,00 | \$3,00 |
| L-Histidina | 15,9 | 1272 | \$98,00 | \$125,92 |
| L-Isoleucina | 54,47 | 4357,6 | \$50,00 | \$217,88 |
| L-Leucina | 59,05 | 4724 | \$15,00 | \$70,88 |
| L-Lisina hidroclorídrica | 91,25 | 7300 | \$30,00 | \$219,00 |
| L-Metionina | 17,24 | 1379,2 | \$15,00 | \$20,68 |
| L-Fenilalanina | 35,48 | 2838,4 | \$28,00 | \$79,48 |
| L-Prolina | 17,25 | 1380 | \$20,00 | \$27,60 |
| L-Serina | 26,25 | 2100 | \$40,00 | \$84,00 |
| L-Treonina | 53,45 | 4276 | \$2,50 | \$10,68 |
| L-Triptofano | 9,02 | 721,6 | \$15,00 | \$10,84 |
| L-Tirosina | 38,7 | 3096 | \$35,00 | \$108,36 |
| L-Valina | 52,85 | 4228 | \$30,00 | \$126,84 |
| Vitaminas | | | | |
| Biotina | 0,0035 | 0,28 | \$50,00 | \$0,00 |
| D-Pantotenato de cálcio | 2,24 | 179,2 | \$15,00 | \$2,68 |
| Cloreto de colina | 8,98 | 718,4 | \$35,00 | \$25,16 |
| Ácido fólico | 2,65 | 212 | \$60,00 | \$12,72 |
| Inositol | 12,6 | 1008 | \$15,00 | \$15,12 |
| Niacinamida | 2,02 | 161,6 | \$15,00 | \$2,44 |
| Cloridrato de piridoxal | 0,05 | 4 | \$25,00 | \$0,12 |
| Cloridrato de piridoxina | 0,031 | 2,48 | \$30,00 | \$0,08 |
| Riboflavina | 0,219 | 17,52 | \$25,00 | \$0,44 |
| Cloridrato de tiamina | 0,087 | 6,96 | \$20,00 | \$0,12 |

| | | | | |
|--------------|-------|------|---------|--------|
| Vitamina B12 | 0,068 | 5,44 | \$15,00 | \$0,80 |
|--------------|-------|------|---------|--------|

A formulação do meio basal, é fundamental para sustentar o metabolismo celular e garantir condições fisiológicas adequadas, como osmolaridade e pH (Arora, 2023). O custo desses componentes, listados na Tabela 3, varia de acordo com a escala de compra e o nível de pureza exigido. Na produção de carne celular, é possível empregar ingredientes de grau alimentício que atendam aos padrões mínimos de segurança, reduzindo a necessidade de materiais de grau farmacêutico. Dessa forma, substituir os componentes do meio basal por versões de grau alimentício ou industrial pode reduzir consideravelmente o custo total da formulação (Kirsch; Morales-Dalmau; Lavrentieva, 2023). Embora o impacto dos ingredientes do meio basal no custo geral seja menor do que o dos fatores de crescimento, aprimorar esse aspecto é fundamental para assegurar a viabilidade econômica da produção em larga escala.

Com base na análise das Tabelas 2 e 3, verifica-se que os principais determinantes do custo do meio de cultura, no estudo utilizado como referência, são os fatores de crescimento — notadamente FGF-2 e TGF- β 3 —, seguidos pelo meio basal, cujo valor é significativamente impactado pelo elevado custo do tampão de pH HEPES.

Conforme mostrado na Tabela 2, o cenário utilizado apresenta valores inferiores ao do cenário base em diversos aspectos. Primeiramente, foi adotada a produção interna do meio basal a partir da compra de componentes individuais — como aminoácidos, açúcares e vitaminas — com custos calculados com base nos preços a granel e adquiridos em grandes volumes, substituindo-se o uso de formulações comerciais pré-misturadas (Specht, 2020). Adicionalmente, foi implementada a estratégia de produção em larga escala dos fatores de crescimento, fabricados em verdadeira escala industrial, em condições comparáveis às da produção de enzimas amplamente utilizadas em indústrias como a de processamento de alimentos. Considera-se que os fatores de crescimento não sejam, em essência, mais difíceis de produzir por expressão recombinante do que essas enzimas, e, portanto, o custo de produção alcançável deve ser semelhante (Specht, 2020). Dessa

forma, foi possível desenvolver uma alternativa economicamente vantajosa e tecnicamente viável para a produção de meio de cultura (cenário usado) (Specht, 2020).

Para esta análise, foi utilizado um valor de custo de produção de \$ 19,98 por quilograma de CM, calculado com base nos dados coletados e nos valores de referência disponíveis. Esse valor corresponde principalmente ao custo do meio de cultura e das células utilizadas para a produção de um lote. É importante ressaltar, contudo, que essa estimativa não inclui as despesas de capital, os custos com mão de obra, nem a maior parte dos custos operacionais — como energia elétrica, água, manutenção de equipamentos, embalagens e licenças regulatórias — devido à ausência de dados suficientes para estimativas precisas desses componentes. Dessa forma, o custo real tende a ser mais elevado do que o valor considerado nesta análise.

Por outro lado, um estudo realizado pela Universidade de Delft analisou possíveis cenários futuros capazes de reduzir significativamente os custos de produção da carne celular. Foi adotado um critério de investimento com tempo de retorno inferior a 30 anos, considerando um enfoque social, em que os custos seriam recuperados ao longo da vida útil das instalações. Dessa forma, foram propostas melhorias no processo produtivo, como a redução do tempo de execução da produção — estimando-se uma diminuição viável de até 25% — o que implicaria menor consumo total e médio de energia nos biorreatores, redução da quantidade de equipamentos necessários para manter a mesma capacidade produtiva e aumento no volume celular. A ampliação do volume celular permitiria o cultivo de uma maior quantidade de células no mesmo volume de reator, o que também contribuiria para a redução no consumo de energia, na demanda média e nos requisitos de equipamentos. Considerando esses fatores em conjunto, o estudo estimou que o custo de produção de 1 kg de carne celular poderia ser reduzido para US\$ 6,43 (Odegard; Sinke; Vergeer, 2021).

Já a produção de gordura cultivada é significativamente mais barata do que a de carne cultivada, podendo custar entre 50 e até mais de 60 vezes menos, dependendo do método utilizado e da escala de produção (THE SPOON, 2023). No entanto, nesta análise, foi adotado um valor mais conservador — uma redução de 50% em relação ao custo da carne cultivada — como forma de cautela diante das

incertezas ainda existentes no processo produtivo em larga escala. Com isso, estimou-se um custo de \$ 9,99 por quilo de gordura cultivada.

Isso ocorre porque os adipócitos, ou células de gordura, possuem menor complexidade estrutural e exigem menos estímulos mecânicos para sua diferenciação em relação aos miócitos, células musculares, o que simplifica os protocolos de cultivo e reduz o consumo energético (Li et al., 2013). Além disso, a menor exigência de fatores de crescimento caros, como FGF e IGF, utilizados em menor quantidade nos protocolos de diferenciação adipogênica, contribui para a significativa redução dos custos dos meios de cultura (LEE, 2014; Venkatesan et al., 2022). Outro fator importante é que a gordura pode ser cultivada em sistemas mais simples que os exigidos para o crescimento do músculo, o que facilita a escalabilidade e reduz o custo por unidade produzida (Yuen et al., 2022).

Além dos benefícios econômicos, a gordura cultivada possui aplicações versáteis na indústria alimentícia, principalmente para melhorar o sabor e a textura de produtos à base de plantas e carne cultivada. Isso se deve às suas propriedades sensoriais e funcionais semelhantes à gordura animal convencional, conferindo maior suculência e aceitabilidade ao consumidor, o que viabiliza sua produção em maior escala e com custo unitário reduzido (Venkatesan et al., 2022). Dessa forma, a incorporação da gordura cultivada não apenas aprimora as características organolépticas dos produtos, mas também contribui para sua competitividade no mercado, destacando seu papel crucial no futuro da alimentação sustentável.

5.2 ANÁLISE DE CUSTOS DAS LINGUIÇAS

5.2.1 CUSTO DA FORMULAÇÃO

A Tabela 4 apresenta os custos individuais por quilograma de cada ingrediente utilizado na composição das linguiças frescas (Tabela 1). Durante a análise, foram encontrados dados expressos em diferentes moedas, o que exigiu a conversão para uma unidade comum. Essa padronização foi essencial para garantir a consistência e a comparabilidade dos valores utilizados no cálculo do custo de produção.

Tabela 3 - Custos individuais por quilograma de cada ingrediente utilizado na composição das linguiças frescas

| Ingrediente | US\$/kg |
|------------------------------------|----------------|
| Carne convencional | 7,61 |
| Gordura convencional | 4,81 |
| Carne celular | 19,98 |
| Gordura celular | 9,99 |
| Proteína de soja | 1,64 |
| Sal refinado | 0,32 |
| Pimenta do reino | 4,25 |
| Alho | 5,22 |
| Glutamato Monossódico (INS 621) | 3,60 |
| Tripolifosfato de Sódio (INS 451i) | 4,64 |
| Sal de Cura | 1,09 |
| Água gelada | 0,11 |

*Taxas de conversão utilizadas: 1 EUR = 1,1205 USD; 1 BRL = 0,1782531 USD. (Banco Central do Brasil, 14 mai. 2025)

Os valores do corte de coxão mole bovino e do alho foram obtidos por meio do site do Instituto de Economia Agrícola (IEA) de São Paulo, órgão vinculado à Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado, responsável por pesquisas e divulgação de dados sobre os preços praticados no mercado agropecuário paulista (IEA, 2025). O IEA coleta, analisa e publica periodicamente indicadores econômicos que servem de referência para produtores, comerciantes, consumidores e formuladores de políticas públicas. De acordo com os dados disponíveis para o mês de maio de 2025, foram consultados os preços médios do quilo do coxão mole bovino e do alho, considerando as variações sazonais e a oferta no mercado. Para o restante

dos produtos, foram realizados orçamentos com distribuidoras, e a partir dessas cotações chegou-se aos valores por quilograma.

A partir dos valores apresentados na Tabela 4, chegou-se ao custo por lote e ao custo por quilograma para os três produtos avaliados, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Custo total por lote (\$) e custo por quilograma (\$/kg) para a formulação da linguiça frescal convencional (F1), linguiça frescal de carne e gordura celular (F2) e linguiça frescal híbrida formulada com proteína de soja e gordura celular (F3).

| Ingredientes | F1 | F2 | F3 |
|--------------------------------|---------------|----------------|---------------|
| Carne convencional | \$26.617,82 | - | - |
| Gordura Convencional | \$8.085,56 | - | - |
| Carne celular | - | \$69.930,00 | - |
| Gordura celular | - | \$16.783,20 | \$16.783,20 |
| Proteína de soja texturizada | - | - | \$5.743,30 |
| Sal refinado | \$1,78 | \$1,78 | \$1,78 |
| Pimenta do reino | \$23,81 | \$23,81 | \$23,81 |
| Alho | \$29,21 | \$29,21 | \$29,21 |
| Glutamato Monossódico | \$20,15 | \$20,15 | \$20,15 |
| Tripolifosfato de Sódio | \$64,98 | \$64,98 | \$64,98 |
| Sal de Cura | \$12,18 | \$12,18 | \$12,18 |
| Água gelada | \$19,25 | \$19,25 | \$19,25 |
| Custo total por lote | \$34.874,74 | \$86.884,56 | \$22.697,86 |
| Custo por kg de produto | \$6,45 | \$16,07 | \$4,19 |

*Taxas de conversão utilizadas: 1 EUR = 1,1205 USD; 1 BRL = 0,1782531 USD. (Banco Central do Brasil, 14 mai. 2025)

Os preços dos diferentes tipos de carne analisados revelam aspectos importantes sobre o momento atual e o futuro do mercado de proteínas alternativas. A carne convencional, ainda amplamente consumida, apresenta um valor de \$ 6,45/kg. Já a carne de soja, representante das proteínas vegetais, custa \$ 4,19 o quilo,

enquanto a carne cultivada – também chamada de carne celular – aparece como a de maior valor agregado, com um custo de \$ 16,07 por quilo.

Apesar do alto preço atual da carne cultivada, é importante destacar que esse valor já representa uma queda significativa em relação aos primeiros protótipos desenvolvidos há poucos anos, como o primeiro hambúrguer cultivado em laboratório, produzido por Mark Post em 2013, que custou cerca de 250 mil dólares (Devlin, 2013). Com os avanços contínuos na tecnologia de cultivo celular, espera-se que esses custos diminuam ainda mais nos próximos anos, o que pode tornar esse tipo de carne cada vez mais competitivo (BENNY; PANDI; UPADHYAY, 2022). No entanto, no cenário presente, o custo elevado ainda é uma barreira para a ampla adoção desse produto.

Diante disso, a proteína de soja surge como uma excelente alternativa. Com preço acessível, menor impacto ambiental e boa disponibilidade no mercado, ela representa uma solução viável e sustentável no curto prazo para quem busca reduzir o consumo de carne animal convencional sem abrir mão da proteína na dieta. Ademais, sua produção em larga escala pode contribuir significativamente para suprir o aumento da demanda mundial por alimentos, que cresce continuamente com o avanço populacional e as mudanças nos padrões de consumo (SANTOYO et al., 2022).

Nesse contexto, uma estratégia promissora para equilibrar custos, sustentabilidade e aceitação do consumidor é o desenvolvimento de produtos híbridos, que combinam carne cultivada com proteína vegetal, como a de soja. Essa abordagem permite a redução do custo final, melhora o sabor e a textura em relação aos produtos 100% vegetais, e ainda contribui para a diminuição da dependência da pecuária tradicional (GFI, 2022).

Assim, os produtos híbridos podem representar um ponto de transição inteligente no mercado, tornando as alternativas mais atraentes tanto do ponto de vista econômico quanto sensorial. Enquanto a carne cultivada ainda está em fase de desenvolvimento e melhoria e a proteína de soja já se mostra uma alternativa acessível e sustentável para o presente, os híbridos surgem como uma solução

estratégica para facilitar a mudança nos hábitos alimentares e ajudar a suprir essa nova demanda por alimentos.

5.2.2 CUSTOS EXTERNOS

Os custos externos de um produto ou serviço refletem os impactos sociais ocultos associados à sua produção, especialmente no setor alimentício. Neste trabalho, esses custos foram avaliados por meio da TCA, incluindo as dimensões do capital natural, social e humano. A Tabela 6 apresenta um resumo dos custos, organizados por tipo de capital, para ambos os sistemas de produção de carne, permitindo uma comparação direta entre eles.

Tabela 6 - Custos de capital natural, social e humanos para produção de carne celular, carne convencional e proteína de soja.

| Categoria | Impacto | | Carne Convencional (\$/kg) | Carne Celular (\$/kg) | Proteína de Soja (\$/kg) | |
|------------------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------------|--------|
| Capital Natural | Emissões de GEE | | \$4,55 | \$0,37 | \$0,06 | |
| | Erosão do Solo | | \$0,00 a \$97,76 | \$0,00 a \$45,47 | \$0,00 a \$99,73 | |
| | Uso de Água | | \$0,03 | \$0,01 | \$0,22 | |
| | Acidificação | | \$7,69 | \$0,17 | \$0,03 | |
| | Ecotoxicidade | | \$0,03 | \$0,02 | \$0,00 | |
| | <i>Custo Total Estimado</i> | | \$12,30 a \$110,07 | \$0,57 a \$46,05 | \$0,31 a \$100,05 | |
| | Capital Humano | Toxicidade Humana | | \$0,04 | \$0,03 | \$0,03 |
| | | Salário Digno | | \$0,21 | \$0,00 | \$0,00 |
| Excesso de Horas de Trabalho | | | Não estimado | Não estimado | Não estimado | |
| | | | | | | |

| | | | | |
|-----------------------|--------------------|--------------|--------------|--------------|
| | Saúde e | \$366,22 a | \$643,19 a | \$627,54 a |
| | Segurança | \$1.094,38 | \$1.929,54 | Não |
| | Ocupacional | | | estimado |
| | <i>Custo Total</i> | \$366,48 a | \$643,22 a | \$627,57 a |
| | <i>Estimado</i> | \$1.094,64 | \$1.929,57 | Não |
| | | | | estimado |
| Capital Social | Disparidade | | | |
| | Salarial de | \$0,32 | \$38,83 | \$0,00 |
| | Gênero | | | |
| | Trabalho Forçado | Não estimado | Não estimado | Não estimado |

5.2.2.1 CAPITAL NATURAL

O capital natural abrange os recursos e serviços ecossistêmicos fornecidos pela natureza, como ar limpo, água potável, solo fértil, biodiversidade e clima estável — todos essenciais para as atividades econômicas, a vida humana e o funcionamento dos sistemas produtivos (Natural Capital Coalition, 2016; TEEB, 2018).

Assim é possível atribuir valor monetário às externalidades ambientais geradas na produção de bens e serviços, permitindo a identificação dos principais impactos ecológicos (FAO & WHO, 2023; True Price, 2019). Com isso, torna-se possível orientar decisões empresariais e políticas mais sustentáveis, incorporar custos ambientais normalmente ignorados pelos preços de mercado e obter uma estimativa mais fiel dos custos reais da produção, promovendo a conservação dos recursos naturais e a redução dos danos ambientais (True Price, 2021). Nessa análise do capital natural, os custos associados a diferentes impactos ambientais foram estimados para a produção de carne celular e convencional.

Em relação às Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), o custo real estimado das emissões para a carne celular é de \$ 0,37 por quilo, enquanto a produção de carne convencional gera um custo de \$ 4,55 por quilo devido às suas

emissões (De; Marreiros, 2024). Já a produção de soja, por sua vez, apresenta um custo significativamente menor, estimado em \$ 0,066 por quilo (Brito et al., 2021).

Quanto à erosão do solo, a produção de carne celular demanda 2,48 m² de área por unidade funcional, a maior parte destinada à produção de insumos agrícolas (Sinke et al., 2023). Os custos reais associados à erosão do solo variam entre \$ 0,00 e \$ 45,47. Já a carne convencional utiliza cerca de 0,00243 hectares por unidade, com custos que podem variar entre \$ 0,00 e \$ 97,76, dependendo das premissas adotadas (De; Marreiros, 2024). A produção de soja, por sua vez, utiliza aproximadamente 0,000283 hectares por quilo produzido, com custos associados à erosão que variam entre \$ 0,00 e \$ 99,73 (EMBRAPA, 2025).

O uso de água na produção de carne está diretamente relacionado ao cultivo e à obtenção dos insumos necessários. Para a carne celular, o custo real do estresse hídrico é estimado em \$ 0,01 por unidade funcional, enquanto para a carne convencional esse custo é de \$ 0,03 por unidade (De; Marreiros, 2024). Já a produção de soja apresenta um custo de \$ 0,22 relacionado ao uso da água, indicando um impacto mais relevante nesse aspecto em comparação com as alternativas de origem animal (Brito et al., 2021).

Em relação à acidificação, a produção de carne celular gera um custo de \$ 0,17 por unidade, devido às emissões de dióxido de enxofre equivalente. Na carne convencional, o custo é significativamente maior, chegando a \$ 7,69 por unidade, devido ao maior volume de emissões associadas (De; Marreiros, 2024). Já a produção de soja apresenta um custo de \$ 0,03 relacionado à acidificação, refletindo um impacto ambiental consideravelmente menor nesse aspecto (Brito et al., 2021).

Além disso, a produção de carne celular libera substâncias químicas que afetam ecossistemas marinhos, de água doce e terrestres, resultando em um custo real de ecotoxicidade de \$ 0,02 por unidade. Para a carne convencional, esse custo é ligeiramente maior, alcançando \$ 0,03 por unidade (De; Marreiros, 2024). Já a produção de soja tem um impacto insignificante, tendo um custo de \$ 0,00 por quilo produzido (Brito et al., 2021).

Portanto, o custo real do capital natural varia entre \$ 0,57 e \$ 46,05 para a carne celular, entre \$ 12,30 e \$ 110,07 para a carne convencional e entre \$ 0,31 e \$ 100,05 para a produção de soja, como é possível ver na Tabela 6. Esses valores ressaltam os impactos ambientais associados à produção de ambos os tipos de carne e também da soja, proporcionando uma visão mais precisa dos custos reais dessas indústrias. A análise demonstra que os impactos ambientais da carne convencional são, em geral, mais elevados do que os da carne celular e da cultura da soja, o que contribui para uma avaliação mais robusta da sustentabilidade de cada processo produtivo (Vural Gursel et al., 2022).

5.2.2.2 CAPITAL HUMANO

O capital humano, refere-se aos impactos relacionados à saúde, bem-estar e qualidade de vida das pessoas envolvidas na cadeia produtiva, como trabalhadores, consumidores e comunidades. Em particular, na produção de carne, o capital humano abrange os custos associados a condições de trabalho, segurança no ambiente de trabalho, doenças ocupacionais e outros efeitos sobre a saúde dos trabalhadores. Além disso, considera-se o impacto positivo ou negativo que a produção tem nas condições de vida e saúde das comunidades ao redor (Häfner; Möller; Latacz-Lohmann, 2019).

A TCA busca quantificar e monetizar os efeitos desses impactos sobre o capital humano, considerando tanto os custos diretos (como despesas com saúde e segurança no trabalho) quanto os custos indiretos (como impactos na qualidade de vida das comunidades e saúde pública). Dessa forma, a valoração do capital humano é essencial para uma análise completa e precisa dos custos reais de produção, levando em conta os impactos sociais e de saúde (Baumann; Tillman; Björklund, 2021).

Um dos fatores considerados foi a toxicidade humana, que inclui tanto os efeitos cancerígenos quanto os não cancerígenos provocados pela exposição a substâncias químicas. Nesse contexto, o custo real estimado da toxicidade humana foi de \$ 0,03 por unidade de carne celular e de soja. Em comparação, a carne convencional apresentou um custo levemente superior, estimado em \$ 0,04 por

unidade, refletindo uma maior exposição a agentes potencialmente nocivos durante sua produção (Brito et al., 2021; De; Marreiros, 2024).

Outro indicador analisado foi o salário digno, que se refere à diferença entre a remuneração recebida e o salário necessário para garantir um padrão de vida adequado. No caso da carne celular, essa diferença foi considerada nula, resultando em um custo real de \$ 0,00 por unidade funcional. Já na carne convencional, a diferença salarial observada, especialmente no setor de criação de gado, gerou um custo de \$ 0,21 por unidade, evidenciando uma disparidade socioeconômica mais relevante. Para a produção de soja, essa diferença também foi considerada nula, não gerando custo adicional relacionado ao salário digno. (De; Marreiros, 2024).

Quanto ao excesso de horas de trabalho, sabe-se que jornadas superiores a 54 horas semanais estão associadas a sérios riscos à saúde (Pega et al., 2021). No entanto, não foi possível estimar os custos reais desse fator para a carne celular, a carne convencional e a produção de soja, devido à indisponibilidade de dados confiáveis, o que limita uma análise completa dos impactos nesse aspecto.

No que se refere à saúde e segurança ocupacional, a análise considerou os diferentes graus de gravidade das lesões e doenças relacionadas ao trabalho, aos quais foram atribuídos pesos de incapacidade que permitem transformar os danos à saúde em valores monetários comparáveis. Na produção de carne celular, estima-se que 12% dos trabalhadores sofram lesões não fatais anualmente, sendo metade desses casos ligados à exposição a substâncias químicas ou ao excesso de trabalho. Além disso, cerca de 5% enfrentam doenças ocupacionais, das quais 2,5% também estão associadas a esses fatores. A taxa de mortalidade ocupacional nesse setor é estimada em 0,09%, com 0,05% das mortes atribuídas a doenças ou sobrecarga laboral, excluindo causas químicas (De; Marreiros, 2024).

Na indústria da carne convencional, embora os registros também sejam significativos, os números são ligeiramente inferiores. Aproximadamente 6% dos trabalhadores sofrem lesões não fatais não relacionadas a produtos químicos, 2,5% desenvolvem doenças ocupacionais sem vínculo com agentes químicos, e 0,05% acabam morrendo em decorrência de doenças ou sobrecarga de trabalho. Com base na aplicação dos pesos de incapacidade e na quantificação desses impactos, estima-

se que os custos reais relacionados à saúde e segurança ocupacional variem entre \$ 643,19 e \$ 1.929,54 por unidade de carne celular, enquanto, para a carne convencional, esses custos estão entre \$ 366,22 e \$ 1.094,38 (De; Marreiros, 2024).

Já na produção de soja, estudos indicam que o aumento da produção tende a elevar o número de acidentes de trabalho (Oderich; De Pellegrini Elias; Dabdab Waquil, 2019), sendo a maioria desses acidentes classificados como típicos, ou seja, ocorridos durante as atividades rotineiras (Mozena; Mendes; Santos, 2020). Fatores como condições ambientais adversas, riscos não controlados, falhas humanas, falta de treinamento e baixa escolaridade, especialmente no nível básico, contribuem para esse cenário (Santos et al., 2020).

Foi estimado um valor de \$ 627,54 relacionado à saúde e segurança ocupacional (De; Marreiros, 2024). No entanto, acredita-se que esse valor esteja subestimado devido à informalidade predominante no setor, à baixa conscientização sobre os riscos e à escassez de registros confiáveis — fatores que dificultam a coleta e o monitoramento adequados dessas ocorrências (Begnini; Almeida, 2015).

Ao final, observa-se que o custo associado ao capital humano varia entre \$ 643,19 e \$ 1.929,54 para a carne celular, e entre \$ 366,48 e \$ 1.095,64 para a carne convencional. No caso da proteína de soja, foi estimado um valor inicial de \$ 627,54, mas esse custo tende a ser maior, especialmente considerando a ausência de dados completos em algumas categorias avaliadas, os valores estimados e as comparações estão detalhadas na Tabela 6. Embora os valores absolutos da carne celular sejam mais elevados, os intervalos são relativamente próximos, indicando que, do ponto de vista do capital humano, ambos os modelos produtivos apresentam impactos sociais relevantes e comparáveis. Isso reforça a importância de políticas voltadas à melhoria das condições laborais no setor alimentício (FAO, 2023).

5.2.2.3 CAPITAL SOCIAL

O capital social representa os impactos das atividades econômicas nas relações sociais, como confiança, cooperação, justiça e coesão comunitária. Esse capital é afetado positivamente por práticas como comércio justo e inclusão social, e

negativamente por desigualdades, violações de direitos e precarização das condições de trabalho (FAO, 2019; UNEP, 2009).

A TCA busca monetizar esses impactos sociais, permitindo incluir os custos e benefícios sociais nas análises econômicas. Isso contribui para decisões mais sustentáveis, considerando o papel das relações sociais no fortalecimento de comunidades e na resiliência dos sistemas (World Benchmarking Alliance, 2020).

A disparidade salarial de gênero na produção de carne celular é expressiva, resultando em um custo real estimado de \$ 38,83 por unidade funcional. Em comparação, esse valor é significativamente menor na carne convencional, atingindo \$ 0,32 por unidade. Na produção de soja, por outro lado, essa diferença salarial foi considerada nula, não gerando custo adicional nesse aspecto. O trabalho forçado também representa uma preocupação relevante em ambas as cadeias produtivas, estando presente em diferentes etapas da produção alimentar. No entanto, tanto para a carne celular quanto para a convencional e para a soja, a escassez de dados consistentes e abrangentes limitou a estimativa de custos reais associados ao trabalho forçado, dificultando uma avaliação mais completa dos impactos sociais envolvidos (De; Marreiros, 2024).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise dos resultados e discussões apresentados, a avaliação da viabilidade econômica e das perspectivas de mercado da linguiça de carne celular estruturada bovina, em comparação com a linguiça convencional e a linguiça híbrida de proteína de soja com gordura celular, revela um cenário complexo e em evolução.

Atualmente, os custos de produção diretos da linguiça de carne celular (F2) são consideravelmente mais elevados do que os da linguiça convencional (F1) e da linguiça híbrida de proteína de soja com gordura celular (F3). A linguiça de carne celular apresenta um custo de \$16,07 por quilograma, enquanto a linguiça convencional custa \$6,45 por quilograma, e a linguiça de proteína de soja (híbrida) é a mais acessível, com um custo de \$4,19 por quilograma. O principal fator que eleva

o custo da carne celular é o meio de cultura, especialmente os fatores de crescimento como FGF-2 e TGF- β 3, que podem representar mais de 96% do custo do meio.

No entanto, é fundamental destacar que os custos de produção da carne celular já apresentaram uma redução significativa, de até 99%, desde os primeiros protótipos, e espera-se que continuem diminuindo com o avanço tecnológico e a ampliação da escala de produção. Estratégias como a produção interna de componentes do meio basal, a fabricação em larga escala de fatores de crescimento, a otimização das taxas de retorno sobre o investimento, a diminuição dos custos com equipamentos e as melhorias nos processos produtivos podem reduzir drasticamente os custos.

Um ponto crucial para a viabilidade econômica é a produção de gordura cultivada, que é significativamente mais barata do que a de carne cultivada, podendo ser até 50% menos dispendiosa. A menor complexidade estrutural dos adipócitos e a menor exigência de fatores de crescimento caros contribuem para essa redução de custos. A incorporação de gordura celular nas formulações F2 e F3 é estratégica para mimetizar as características sensoriais (sabor, textura, suculência) da carne convencional, visando uma maior aceitação do consumidor.

Ao considerar os custos externos, avaliados pela TCA: No Capital Natural, a carne celular e a proteína de soja geralmente demonstram impactos ambientais inferiores aos da carne convencional. Em relação às emissões de gases de efeito estufa (GEE), a carne celular apresenta um custo muito menor que os da carne convencional, e a soja é ainda mais baixa que ambas as anteriores. Embora haja variações em outros indicadores, como o uso da água, onde a soja tem um custo mais elevado em comparação com a carne celular e a carne convencional, a análise global do capital natural aponta para uma maior sustentabilidade das alternativas cultivadas e vegetais.

No Capital Humano, os custos associados à saúde e segurança ocupacional são relevantes para todas as produções, inclusive para a linguiça de soja, que também apresenta custos significativos nesse quesito, que podem estar subestimados devido à informalidade no setor. A carne convencional, por sua vez, mostra um custo mais elevado relacionado à disparidade de salário digno, em contraste com a carne celular e a soja nesse aspecto. Apesar de os valores absolutos da carne celular serem mais

altos em certas categorias de capital humano, os intervalos são relativamente próximos, sugerindo que ambos os modelos produtivos (celular e convencional) apresentam impactos sociais relevantes e comparáveis.

No Capital Social, a disparidade salarial de gênero na produção de carne celular foi estimada em um valor superior ao da carne convencional e da soja. A ausência de dados consistentes sobre trabalho forçado impede uma avaliação completa nesse capital para todas as cadeias produtivas.

Em suma, a carne celular emerge como uma alternativa promissora para o futuro da alimentação sustentável, impulsionada por seus benefícios ambientais (menor uso de terra e água, redução de GEE) e éticos (bem-estar animal). Contudo, os desafios econômicos atuais, principalmente o alto custo de produção, ainda constituem uma barreira para sua ampla adoção no mercado. Nesse cenário, o desenvolvimento de produtos híbridos, como a linguiça formulada com proteína de soja e gordura celular (F3), representa uma estratégia de transição inteligente e promissora. Essa abordagem permite reduzir o custo final do produto, tornando-o mais acessível, ao mesmo tempo em que melhora as características sensoriais (sabor e textura) em comparação com produtos 100% vegetais, graças à adição de gordura celular. Adicionalmente, contribui para a sustentabilidade ao diminuir a dependência da pecuária tradicional.

Portanto, enquanto a carne celular continua em fase de otimização para alcançar a competitividade de preço, os produtos híbridos oferecem uma solução viável e atraente a curto e médio prazo para atender à crescente demanda global por proteínas de forma mais sustentável. Para a consolidação da carne celular no mercado, o investimento contínuo em pesquisa e desenvolvimento será crucial para otimizar os processos e reduzir ainda mais os custos, além de um diálogo transparente com os consumidores e o estabelecimento de regulamentações claras.

7. REFERÊNCIAS

ANVISA. **RESOLUÇÃO DA DIRETORIA COLEGIADA - RDC Nº 839, DE 14 DE DEZEMBRO DE 2023.** , 2023a.

ANVISA. **INSTRUÇÃO NORMATIVA - IN Nº 211, DE 1º DE MARÇO DE 2023.** , 2023b.

ARORA, Meenakshi. Cell culture media: a review. **LABOME**, 2023.

BADENES, Sara M. *et al.* Defined essential 8' medium and vitronectin efficiently support scalable xeno-free expansion of human induced pluripotent stem cells in stirred microcarrier culture systems. **PLoS ONE**, v. 11, n. 3, 1 mar. 2016.

BAKHSH, A. *et al.* Tradicional plant-based meat alternatives, current and a future perspective: a review. 2021.

BARZEE, Tyler J. *et al.* **Cell-cultivated food production and processing: A review. Food Bioengineering** John Wiley and Sons Inc, , 1 mar. 2022.

BAUMANN, Henrik; TILLMAN, Anne-Marie; BJÖRKLUND, Anna. Human Capital and Environmental Impact in Food Production Systems: A Case Study. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 81, 2021.

BEGININI, Sergio Begnini; ALMEIDA, Lirane. Acidentes de trabalho no meio rural: perfil do trabalhador acidentado em Santa Catarina, Brasil. 2015.

BEN-ARYE, T. *et al.* Textured soy protein as a scaffold for the production of cultured meat. **Nature Food**, 2020.

BENNY, Anmariya; PANDI, Kathiresan; UPADHYAY, Rituja. Techniques, challenges and future prospects for cell-based meat. *Food Science and Biotechnology*, v. 31, n. 9, p. 1225–1242, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10068-022-01136-6>.

BOAKES, Elizabeth H. *et al.* Impacts of the global food system on terrestrial biodiversity from land use and climate change. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, 1 dez. 2024.

BRASIL. **INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 4, DE 31 DE MARÇO DE 2000.** , 2000.

BRENNAN, Tom *et al.* Cultivated meat: Out of the lab, into the frying pan. 2021.

BRITO, Thyago *et al.* LCA of Soybean Supply Chain Produced in the State of Pará, Located in the Brazilian Amazon Biome †. 2021.

BRYANT, Christopher J. *et al.* Strategies for overcoming aversion to unnaturalness: the case of. 2019.

CASTRO PORTO, Bruna *et al.* Aditivos em produtos cárneos embalados. **Brazilian Journal of Food Research**, v. 11, n. 3, p. 12–26, 2020.

CHEN, Lu *et al.* Large-scale cultured meat production: Trends, challenges and promising biomanufacturing technologies. **Biomaterials**, v. 280, 1 jan. 2022.

CHIANG, Jie Hong *et al.* Effects of soy protein to wheat gluten ratio on the physicochemical properties of extruded meat analogues. **Food Structure**, 2019.

CHRIKI, Sghaier; HOCQUETTE, Jean François. **The Myth of Cultured Meat: A Review.** **Frontiers in Nutrition** Frontiers Media S.A., , 7 fev. 2020.

CIDARTA, Thaisa *et al.* Avaliação microbiológica e sensorial de linguiça frescal bovina com adição de extratos de alecrim e chá verde. 2018.

DE, Rebecca; MARREIROS, Oliveira. True cost accounting applied on cultured meat: an economic analysis, issues and challenges. 2024.

DEVLIN, Hannah. *First hamburger made from lab-grown meat to be served at press conference.* The Guardian, 5 ago. 2013.

FAO. The State of the World's Biodiversity for Food and Agriculture. 2019.

FAO. Five practical actions towards resilient, low-carbon livestock systems. 2020.

FAO. Food safety aspects of cell-based food. 27 mar. 2023.

FAO & WHO. **Food safety aspects of cell-based food.** [S.l.]: FAO; WHO;, 2023.

FOOD AND AGRICULTURE. REVEALING THE TRUE COST OF FOOD TO TRANSFORM AGRIFOOD SYSTEMS. **The State of Food and Agriculture 2023**, 6 nov. 2023.

GARRISON, Greg L.; BIERMACHER, Jon T.; BRORSEN, B. Wade. How much will large-scale production of cell-cultured meat cost? **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 10, 1 dez. 2022.

GERBENS-LEENES, P. W.; MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. The water footprint of poultry, pork and beef: A comparative study in different countries and production systems. **Water Resources and Industry**, v. 1–2, p. 25–36, 2013.

GIBCO. Master basic cell culture techniques and achieve consistent results. 2020.

GLOBAL ALLIANCE FOR THE FUTURE OF FOOD. True Cost Accounting Inventory . 2020.

GRASSO, Simona; JAWORSKA, Sylvia. Part meat and part plant: Are hybrid meat products fad or future? **Foods**, v. 9, n. 12, 1 dez. 2020.

GROSSI, Giampiero *et al.* Livestock and climate change: Impact of livestock on climate and mitigation strategies. **Animal Frontiers**, v. 9, n. 1, p. 69–76, 3 jan. 2019.

GOOD FOOD INSTITUTE (GFI). Hybrid products to optimize nutrition, taste, cost, and sustainability. 2022.

HÄFNER, Johannes; MÖLLER, Melanie; LATACZ-LOHMANN, Uwe. Accounting for the social impacts of agricultural production: The role of human capital. **Sustainable Production and Consumption**, v. 18, 2019.

HENCHION, Maeve *et al.* Future protein supply and demand: Strategies and factors influencing a sustainable equilibrium. **Foods**, v. 6, n. 7, p. 1–21, 1 jul. 2017.

HUMBIRD, David. Scale-up economics for cultured meat. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 118, n. 8, p. 3239–3250, 1 ago. 2021.

KIRSCH, Marline; MORALES-DALMAU, Jordi; LAVRENTIEVA, Antonina. **Cultivated meat manufacturing: Technology, trends, and challenges**. **Engineering in Life Sciences** John Wiley and Sons Inc, , 1 dez. 2023.

KULUS, Magdalena *et al.* **Bioreactors, scaffolds and microcarriers and in vitro meat production—current obstacles and potential solutions**. **Frontiers in Nutrition** Frontiers Media SA, , 2023.

KUPFERSCHMIDT, K. Lab Burger Adds Sizzle to Bid for Research Funds. 2013.

LAM, David. The Next 2 Billion: Can the World Support 10 Billion People? **Population and Development Review**, 1 mar. 2024.

LANZONI, Davide *et al.* **Biotechnological and Technical Challenges Related to Cultured Meat Production**. **Applied Sciences (Switzerland)** MDPI, , 1 jul. 2022.

LEE, S. J. Growth factor requirements for muscle and fat cell culture. **Biotechnology Advances**, 2014.

LETTI, Luiz Alberto Junior *et al.* Cultivated meat: recent technological developments, current market and future challenges. **Biotechnology Research and Innovation**, v. 5, n. 1, p. e2021001, 2021.

LI, G. *et al.* Mechanical compressive force inhibits adipogenesis of adipose stem cells. **Cell Proliferation**, v. 46, n. 5, p. 586–594, out. 2013.

MACEDO, Livia Maria Araújo *et al.* Composição química e perfil de ácidos graxos de cinco diferentes cortes de novilhas mestiças. n. 3, 2008.

MAKINEN, O. E. *et al.* Protein From Oat: Structure, Processes, Functionality, and Nutrition. **Sustainable Protein Sources**, 2017.

MALILA, Yuwares *et al.* **Current challenges of alternative proteins as future foods.** *npj Science of Food* Nature Research, , 1 dez. 2024.

MARTINS, Beatriz *et al.* Advances and Challenges in Cell Biology for Cultured Meat. **Annual Review of Animal Biosciences** Downloaded from www.annualreviews.org. **Guest**, v. 23, p. 20, 2025.

MATTICK, Carolyn S. Cellular agriculture: The coming revolution in food production. . 2018.

MICHEL, Fabienne; HARTMANN, Christina; SIEGRIST, Michael. Consumers' associations, perceptions and acceptance of meat and plant-based meat alternatives. **Food Quality and Preference**, 2021.

MOREIRA, Leise Nascimento. TÉCNICA DIETÉTICA. 2016.

MOZENA, A. L. K.; MENDES, N. A. C.; SANTOS, P. S. B. ANÁLISE ESTATÍSTICA DE ACIDENTES DO TRABALHO NO CULTIVO DE SOJA, OCORRIDOS NO BRASIL E NA REGIÃO CENTRO-OESTE, DE 2008 A 2018. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering** , v. 14, n. 3, 2020.

NATURAL CAPITAL COALITION. Natural Capital Protocol. 2016.

NEMECEK, T.; POORE, J. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. 2018.

NUCCI, M.; L. & HALLMAN, W. K. The role of public (mis)perceptions in the acceptance of new food technologies: Implications for food nanotechnology applications. 2015.

ODEGARD, Ingrid; SINKE, Pelle; VERGEER, Robert. TEA of cultivated meat - Future projections of different scenarios-corrigendum. 2021.

ODERICH, Edmundo Hoppe; DE PELLEGRINI ELIAS, Lilian; DABDAB WAQUIL, Paulo. **Expansão do agronegócio no Brasil: diferentes discursos e dinâmicas socioeconômicas no Rio Grande do Sul.** , 2019.

PEGA, Frank *et al.* Global, regional, and national burdens of ischemic heart disease and stroke attributable to exposure to long working hours for 194 countries, 2000–2016: a systematic analysis from the WHO/ILO Joint Estimates of the Work-related Burden of Disease and Injury. **Environment International**, v. 154, 1 set. 2021.

QUEIROZ, Anelise. **EFEITOS DO TRIPOLIFOSFATO DE SÓDIO SOBRE AS CARACTERÍSTICAS MICROBIOLÓGICAS, FÍSICO-QUÍMICAS E VIDA DE PRATELEIRA EM LINGUIÇA FRESCAL DE FRANGO**, 2006. (Nota técnica).

REHBEIN, Katiele Daiana da Silva. Sustentabilidade à mesa: impactos ambientais do consumo da carne. **Sustentabilidade à mesa: impactos ambientais do consumo da carne**, 2024.

RISNER, Derrick *et al.* Preliminary techno-economic assessment of animal cell-based meat. **Foods**, v. 10, n. 1, 1 jan. 2021.

RUBIO, Natalie R.; XIANG, Ning; KAPLAN, David L. **Plant-based and cell-based approaches to meat production. Nature Communications** Nature Research, , 1 dez. 2020.

SAATH, Kleverton Clovis de Oliveira; FACHINELLO, Arlei Luiz. Crescimento da Demanda Mundial de Alimentos e Restrições do Fator Terra no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 56, n. 2, p. 195–212, 1 abr. 2018.

SANT'ANA, Anderson S. *et al.* Assuring the Safety of Cultivated Meat: HACCP plan development and application to a cultivated meat target-product. 2023.

SANTOS, Alexandre Assis Rezende *et al.* Acidentes de trabalho nas principais atividades do setor agrícola no Brasil entre 2013 e 2018. **Scire Salutis**, v. 11, n. 1, p. 134–145, 5 nov. 2020.

SANTOS, Mirian dos *et al.* Understanding the Performance of Plant Protein Concentrates as Partial Meat Substitutes in Hybrid Meat Emulsions. **Foods**, v. 11, n. 21, 1 nov. 2022.

SANTOYO, M. A. *et al.* Meat substitutes: Resource demands and environmental footprints. ScienceDirect, 2022.

SHA, Lei; XIONG, Youling L. **Plant protein-based alternatives of reconstructed meat: Science, technology, and challenges. Trends in Food Science and Technology** Elsevier Ltd, , 1 ago. 2020.

SINKE, Pelle *et al.* Ex-ante life cycle assessment of commercial-scale cultivated meat production in 2030. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 28, n. 3, p. 234–254, 1 mar. 2023.

SNOEK, Jonna *et al.* External costs of locally produced cultivated meat compared with three conventional Dutch meat products. 2024.

SPADA, Fernando Papa. **Redução dos níveis de gordura em mortadela bologna e sua influência sensorial em provadores de diferentes idades.** Piracicaba: USP, 2013.

SPECHT, Liz. An analysis of culture medium costs and production volumes for cultivated meat. 2020.

STEPHENS, Neil *et al.* **Bringing cultured meat to market: Technical, socio-political, and regulatory challenges in cellular agriculture. Trends in Food Science and Technology** Elsevier Ltd, , 1 ago. 2018.

SWARTZ, Elliot. Anticipatory life cycle assessment and techno-economic assessment of commercial cultivated meat production. 2021.

- SWARTZ, Elliot. Cell culture media and growth factor trends in the cultivated meat industry. 2023.
- SWARTZ, Elliot. Cost drivers of cultivated meat production. 2024.
- TEEB. TEEB for agriculture & food scientific and economic foundations report. 2018.
- THE SPOON. **Mosa Meat achieves an over 65x reduction in costs for its cultured fat.**
- TREICH, Nicolas. Cultured Meat: Promises and Challenges. **Environmental and Resource Economics**, v. 79, n. 1, p. 33–61, 1 maio 2021.
- TRUE PRICE. A roadmap for true pricing: Vision paper. 2019.
- TRUE PRICE. Monetisation Factors for True Pricing. 2021.
- TUOMISTO, Hanna L.; TEIXEIRA DE MATTOS, M. Joost. Environmental impacts of cultured meat production. **Environmental Science and Technology**, v. 45, n. 14, p. 6117–6123, 15 jul. 2011.
- UNEP. **Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products.** United Nations Environment Programme, , 2009. Disponível em: <<https://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2012/12/2009%20-%20Guidelines%20for%20Social%20Life%20Cycle%20Assessment%20of%20Products.pdf>>. Acesso em: 12 maio. 2025
- UNICAMP. **Tabela Brasileira de Composição de Alimentos - TACO.** (NEPA - UNICAMP, Org.)Campinas, 2011.
- VECCHI DORTAS, Camila. INTERAÇÕES ENTRE CARNE CULTIVADA E OS OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: REVISÃO INTEGRATIVA. 2022.
- VENKATESAN, Meenakshi *et al.* Recombinant production of growth factors for application in cell culture. **iScience**, v. 25, n. 10, 21 out. 2022.
- VILELA, Oliveira *et al.* Carne Cultivada: perspectivas e oportunidades para o Brasil. 2020.
- VURAL GURSEL, Iris *et al.* Review and analysis of studies on sustainability of cultured meat. 2022.
- WEINRICH, Ramona; STRACK, Micha; NEUGEBAUER, Felix. Consumer acceptance of cultured meat in Germany. **Meat Science**, v. 162, 1 abr. 2020.
- WORLD BENCHMARKING ALLIANCE. Social Transformation: The World Benchmarking Alliance’s Approach to Measuring and Incentivising Business Contribution to a Just and Equitable Society. 2020.

YAO, G.; LIU, K. S.; HSIEH, F. A New Method for Characterizing Fiber Formation in Meat Analogs during High-moisture Extrusion. **Food Science**, 2006.

YUEN, John S. K. *et al.* Perspectives on scaling production of adipose tissue for food applications. **Biomaterials**, v. 280, 1 jan. 2022.