



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

CENTRO TECNOLÓGICO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA E ENGENHARIA
DE ALIMENTOS

**Inativação de *Salmonella* Typhimurium por luz pulsada e ácido
orgânico em peito de frango**

Lara Beatriz Mews

Florianópolis

2025

Lara Beatriz Mews

Inativação de *Salmonella* Typhimurium por luz pulsada e ácido orgânico em peito de frango

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Alimentos, Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina apresentado como requisito para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Augusto M. Carciofi

Coorientadora: Ma. Ana Guimarães Massia

Florianópolis

2025

Mews, Lara Beatriz

Inativação de *Salmonella Typhimurium* por luz pulsada e ácido orgânico em peito de frango / Lara Beatriz Mews ; orientador, Bruno Augusto Mattar Carciofi, coorientadora, Ana Guimarães Massia, 2025.

42 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia de Alimentos, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia de Alimentos. 2. *S. Typhimurium*. 3. Luz pulsada. 4. Inativação. 5. Peito de frango. I. Carciofi, Bruno Augusto Mattar. II. Massia, Ana Guimarães. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Alimentos. IV. Título.

Lara Beatriz Mews

Inativação de Salmonella Typhimurium por luz pulsada e ácido orgânico em peito de frango

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de engenheiro de alimentos e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia de Alimentos.

Florianópolis, 01 de dezembro de 2025.

Coordenação do Curso

Banca examinadora

Prof. Dr. Orientador Bruno Augusto M. Carciofi

Prof., Dr. Marcelo Lanza

Universidade Federal de Santa Catarina

Dra. Andréia Tremarin

Universidade Federal de Santa Catarina

Agradecimentos

Este trabalho só foi possível graças ao apoio de pessoas muito especiais que acompanharam minha jornada. Agradeço as principais pessoas que contribuíram com esse trabalho primeiramente ao meu orientador Bruno Carciofi, pela orientação, pelo incentivo, pela oportunidade e por se fazer presente mesmo com a distância. Agradeço à minha coorientadora e amiga Ana Massia por todo o suporte, atenção e cuidado em todas as etapas e um agradecimento especial para minha amiga e parceira de laboratório Laila, pela oportunidade de trabalharmos juntas, todas as conversas e companhia nesse processo, obrigada por ter me ensinado tanto durante esse processo.

Ao meu namorado Henrique, obrigada pelo companheirismo em visitas ao laboratório aos fins de semana, pelo apoio em todo o processo acadêmico e o cuidado de sempre.

Agradeço profundamente à minha família, que meus maiores motivadores, me acolheram nos momentos difíceis e celebraram comigo cada conquista. Obrigado mãe e pai, sem vocês nada disso seria possível.

Resumo

A presença de *Salmonella* em carne de frango representa um dos principais desafios de segurança alimentar no Brasil e no mundo, devido ao seu elevado potencial de causar surtos de doenças transmitidas por alimentos e ao amplo consumo dessa proteína. Diante da necessidade de métodos mais eficazes e sustentáveis para reduzir a contaminação microbiana, a luz pulsada surge como uma tecnologia promissora. Esse método baseia-se na aplicação de pulsos de alta intensidade luminosa, capazes de inativar microrganismos, oferecendo uma alternativa rápida, não térmica e com potencial de preservar as características sensoriais do alimento. O ácido peracético, por sua vez, destaca-se como um sanitizante amplamente utilizado na indústria de alimentos por apresentar forte ação oxidante, rápida decomposição e alta eficácia na inativação de microrganismos, incluindo *Salmonella* em produtos avícolas. Este trabalho avaliou a eficácia de diferentes tratamentos antimicrobianos na redução de *Salmonella* Typhimurium em filés de peito de frango, utilizando ácido peracético (PAA), ácido clorídrico (HCl) e luz pulsada (LP), aplicados de forma isolada ou combinada. As amostras foram submetidas à imersão em soluções de água filtrada, PAA à 1000, 1400 e 2000 ppm, ou HCl em pH equivalente seguidas ou não pela aplicação de LP a um pulso ou seis pulsos. Após os tratamentos, foram realizadas análises colorimétricas pelo sistema CIELAB (L^* , a^* , b^* e ΔE) para avaliar possíveis alterações na amostra. Os resultados demonstraram que o tratamento com PAA apresentou maior capacidade de inativação de *Salmonella* em comparação ao HCl, indicando que sua ação antimicrobiana não está relacionada ao pH, mas sim ao seu mecanismo oxidativo do ácido orgânico. Observou-se um efeito sinérgico quando o PAA foi combinado à LP, resultando em reduções microbianas mais expressivas do que as obtidas pelos tratamentos individuais. Por outro lado, os grupos tratados com HCl apresentaram reduções mínimas, compatíveis apenas com o efeito esperado da LP, sem demonstrar ação adicional relevante. A avaliação colorimétrica indicou que, embora L^* , a^* e b^* não tenham apresentado diferenças estatisticamente significativas pelo teste de Tukey ($p > 0,05$), os valores de ΔE mostraram alterações perceptíveis de cor proporcionais às concentrações de ácido. Conclui-se que o PAA, especialmente quando associado à LP, representa uma estratégia promissora para a redução de *Salmonella* em carne de frango. A combinação de métodos químicos e físicos destacou-se como uma alternativa viável para a indústria, conciliando segurança microbiológica com a preservação das características do produto.

Palavras-chave: *S. Typhimurium*; Ácido peracético; Peito de frango; Luz pulsada; Inativação.

Abstract

The presence of *Salmonella* in chicken meat represents one of the main food safety challenges in Brazil and worldwide, due to its high potential to cause foodborne disease outbreaks and the widespread consumption of this protein. Given the need for more effective and sustainable methods to reduce microbial contamination, pulsed light emerges as a promising technology. This method is based on the application of high-intensity light pulses capable of inactivating microorganisms, offering a rapid, non-thermal alternative with the potential to preserve the sensory characteristics of the food. Peracetic acid, in turn, stands out as a widely used sanitizer in the food industry due to its strong oxidizing action, rapid decomposition, and high effectiveness in inactivating microorganisms, including *Salmonella* in poultry products. This study evaluated the efficacy of different antimicrobial treatments in reducing *Salmonella* Typhimurium on chicken breast fillets using peracetic acid (PAA), hydrochloric acid (HCl), and pulsed light (PL), applied individually or in combination. Samples were immersed in solutions of filtered water, PAA at 1000, 1400, and 2000 ppm, or HCl at an equivalent pH, followed or not by the application of PL at one or six pulses. After treatments, colorimetric analyses were performed using the CIELAB system (L^* , a^* , b^* , and ΔE) to evaluate potential changes in the samples. The results demonstrated that PAA treatment exhibited greater *Salmonella* inactivation capacity compared to HCl, indicating that its antimicrobial action is driven by the organic acid's oxidative mechanism rather than pH alone. A synergistic effect was observed when PAA was combined with PL, resulting in more significant microbial reductions than those obtained by individual treatments. Conversely, groups treated with HCl showed minimal reductions, compatible only with the expected effect of PL, without demonstrating relevant additional action. Colorimetric evaluation indicated that although L^* , a^* , and b^* did not present statistically significant differences by the Tukey test ($p > 0.05$), ΔE values showed perceptible color changes proportional to acid concentrations. It is concluded that PAA, especially when associated with PL, represents a promising strategy for *Salmonella* reduction in chicken meat. The combination of chemical and physical methods stood out as a viable alternative for the industry, reconciling microbiological safety with the preservation of product characteristics.

Keywords: *S. Typhimurium*; Peracetic acid; Chicken breast; Pulsed Light; Inactivation.

Lista de figuras

Figura 1 - Representação Esquemática - unidade experimental de luz pulsada.....	20
Figura 2 - Equipamento de luz pulsada da Xenon, modelo X-1100	24
Figura 3 - Amostras de filé de peito de frango resfriados após cortados.	25
Figura 4 - Etapas do tratamento de amostras.	27
Figura 5 - Placas de contagem contaminadas em várias diluições.....	27
Figura 6 - Redução de <i>Salmonella</i> Typhimurium (Log N/N ₀) em filés de peito de frango submetidos a diferentes tratamentos com ácido peracético (PAA) e ácido clorídrico (HCl), isoladamente e combinados com luz pulsada (LP). As barras representam as médias ± desvio-padrão das reduções observadas para os tratamentos: controle (água, pH 6,26), P1 (1000 ppm PAA, pH 3,29), P2 (2000 ppm PAA, pH 3,13), H1 (HCl pH 3,29) e H2 (HCl pH 3,13), . As barras brancas representam os tratamentos apenas com ácido sem aplicação de luz, as barras texturizadas cinza representam amostras sob aplicação de 1 pulso (1,91 J/cm ²) e as barras sólidas são amostras que passaram por 6 pulsos (12,22 J/cm ²) de LP. Letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas entre os tipos de tratamento ($p < 0,05$), enquanto letras maiúsculas diferentes indicam diferenças entre as intensidades de luz pulsada aplicadas.....	29
Figura 7 - Variação dos parâmetros colorimétricos L* (luminosidade), b* (intensidade de amarelo), a* (intensidade de vermelho) e ΔE diferença total de cor nas amostras de filé de peito de frango submetidas aos diferentes tratamentos, em concentrações de 1000, 1400 e 2000 ppm e 1,91 J/cm ² (1 pulso de 420 μ s a 3000 V). As barras representam as médias e as linhas verticais o desvio-padrão.	34

Lista de tabelas

Tabela 1 - Planejamento experimental para inativação de <i>S. Typhimurium</i> por luz pulsada (1,91 e 12,22 J/cm ²) e ácidos (PAA e HCl, pH 3,29 e 3,13) em peito de frango	26
Tabela 2 - Índice de sinergia para a inativação de <i>S. Typhimurium</i> por tratamentos combinados entre PAA + LP e HCl + LP, considerando diferentes fluências de LP (1,91 e 12,22 J/cm ²) e diferentes concentrações de ácido com valores de pH para mesma concentração entre os diferentes ácidos (3,13 e 3,29).	32
Tabela 3 – Reduções logarítmicas de <i>Salmonella Typhimurium</i> (Log N/N ₀) em filés de peito de frango submetidos a diferentes tratamentos com ácido peracético (PAA) e ácido clorídrico (HCl), isoladamente e combinados com luz pulsada (LP).....	30

Lista de abreviaturas e siglas

B.O.D - Estufa incubadora para demanda bioquímica de oxigênio

HCl - Ácido clorídrico

J - Joule

N - População microbiana

N₀ - População microbiana inicial

PAA - Ácido peracético

ppm - Partes por milhão

rpm - Rotações por minuto

UV - Ultravioleta

V – Volts

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBEJTIVO	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 MERCADO DE CARNE DE FRANGO	15
3.2 PEITO DE FRANGO	15
3.2.1 Etapas de produção	16
3.3 <i>SALMONELLA</i>	17
3.4 MÉTODOS NÃO TÉRMICOS DE REDUÇÃO DE CARGA MICROBIANA	19
3.5 AGENTE MICROBIANO	21
3.5.1 Ácido peracético	21
3.6 MÉTODOS COMBINADOS PARA INATIVAÇÃO DE BACTÉRIAS PATOGÊNICAS	22
4 MATERIAL E MÉTODOS	23
4.1 MICRORGANISMOS	23
4.2 SISTEMA DE LUZ PULSADA	23
4.3 PREPARO DAS AMOSTRAS DE FRANGO	24
4.4 TRATAMENTO <i>S. TYPHIMURIUM</i> COM PAA/HCl E LP	25
4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA	28
4.6 ANÁLISE DE COR	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1 INATIVAÇÃO DE <i>S. TYPHIMURIUM</i> PELOS MÉTODOS COMBINADOS DE LP E ÁCIDOS (PAA E HCL)	29
5.2 SINERGISMO	32
5.3 COMPARAÇÃO DA VARIAÇÃO DE COR PELO TRATAMENTO COMBINADO DE PAA E LP	34
6 CONCLUSÃO	36
7 REFERÊNCIAS	37

1. INTRODUÇÃO

Com a urbanização e mudança de hábitos dos consumidores a demanda de uma variedade de alimentos cresceu e a preocupação com a segurança do alimento na cadeia alimentar global aumentou. Milhões de pessoas ficam doentes todos os anos ao consumir alimentos contaminados (OMS, 2015). Segundo o relatório anual da Associação Brasileira de Proteína Animal de 2025, o Brasil ocupa o primeiro lugar como maior exportador de carne de frango do mundo, tendo uma produção de 14.972 milhões de toneladas (ABPA, 2025). Isso se deve ao fato do crescimento do consumo de carne de frango em todo o mundo; nos Estados Unidos, por exemplo, houve um aumento de 67% no setor de vendas de carne avícola no período de 2021 para 2022 (USDA, 2025). Nos últimos anos, o consumo per capita de carne de frango no Brasil tem apresentado tendência de crescimento, passando de 45,5 kg por habitante em 2024 para uma projeção de 47,3 kg em 2026, conforme estimativas do setor (ABPA, 2025). Nos EUA no ano de 2021 foram levantados dados que revelaram que 18,6 % dos casos de salmonelose humana estavam relacionados ao consumo de frango (CDC, 2021).

A salmonelose é a infecção gastrointestinal causada pelo consumo de alimentos contaminados com bactérias do gênero *Salmonella* spp. (OMS, 2018). Essa bactéria é responsável pela maioria das mortes e hospitalizações nos Estados Unidos em decorrência do consumo de alimentos contaminados. A *Salmonella* está presente no ambiente e muitos animais, como gado, aves e répteis, podem carregar a bactéria naturalmente sem sintomas aparentes. A *Salmonella* é comumente encontrada em alimentos derivados de animais contaminados, como leite não pasteurizado, carne de gado ou aves, ovos e alimentos que não passaram por tratamento térmico necessário para inativação (FDA, 2023).

Tecnologias de processamento não térmico são uma alternativa eficiente para a descontaminação de alimentos, principalmente por não envolverem a interferência do calor, que afeta diretamente a qualidade físico-química dos alimentos. A luz pulsada (LP) é uma tecnologia que envolve a aplicação de um pulso curto de luz de alta intensidade, que inativa bactérias da superfície ao atingir um comprimento de onda específico, o que danifica seu DNA (MANDAL et al., 2020). Outra alternativa de tratamento não térmico para o controle de patógenos é a utilização de ácidos orgânicos e um dos ácidos mais utilizados atualmente é o ácido peracético. Por ter baixo custo e não produzir resíduos tóxicos, o ácido peracético pode ser utilizado diretamente em alimentos, sem riscos à saúde. Ele oxida lipídios, proteínas e ácidos nucleicos nas membranas celulares de

microrganismos, causando inativação, porém, decompondo-se em subprodutos atóxicos (WARBURTON, 2014).

A combinação de métodos de desinfecção traz vantagens para a indústria de alimentos pois, em combinações sinérgicas, possibilita a utilização de parâmetros de processo mais brandos como menor liberação de energia pela LP e menores concentrações de ácido peracético, por exemplo. Além disso, esse efeito minimiza alterações das características físico-químicas originais do produto. A combinação dos métodos (LP e ácido orgânico) pode tornar os efeitos indesejados menores e facilitar a adequação aos limites permitidos na legislação (KHAN et al.2016). Ao combinar a LP com o ácido orgânico é esperado que se atinja um tratamento mais completo. Considerando um alimento com superfícies irregulares, por exemplo, que pode sofrer a interferência do efeito de sombra pela LP, a utilização combinada do ácido visa diminuir este efeito, entrando em contato com partes do alimento que a LP não atingiu. (CAO et al., 2025).

Este estudo visa analisar os efeitos de inativação de células de *Salmonella Typhimurium* inoculadas em peito de frango através da combinação de luz pulsada nas fluências de 1,91 e 12,22 J/cm², ácido orgânico em 1000 e 2000 ppm e ácido inorgânico em pH correspondente, assim como quantificar o efeito sinergismo da combinação dos métodos. Além disso nesse estudo foi feita análise de cor do peito de frango após tratamento de imersão e luz, afim de observar se a variação é perceptível e qual o comportamento.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a eficiência da luz pulsada, isolada ou combinada com ácido peracético, na inativação de *Salmonella* Typhimurium em peito de frango, bem como investigar as alterações de cor do produto utilizando o sistema CIELAB.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Quantificar a redução de *S. Typhimurium* em peito de frango submetido ao tratamento com luz pulsada e ácido peracético de forma isolada e combinada.
- Comparar o desempenho do ácido peracético com um ácido inorgânico
- Investigar o sinergismo entre luz pulsada e ácido peracético na inativação de *S. Typhimurium*.
- Mensurar as alterações de cor (L^* , a^* , b^*) do peito de frango após cada tratamento.
- Avaliar a percepção da variação de cor dos tratamentos, verificando possíveis impactos na qualidade visual do produto.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MERCADO DE CARNE DE FRANGO

No ano de 2025 o Brasil teve uma produção de 14.972 milhões de toneladas de frango, ocupando o primeiro lugar como maior exportador de carne de frango no mundo (ABPA, 2025). A região sul lidera a produção de carne de frango, sendo responsável por 78,14% do total nacional. Os principais estados produtores são o Paraná (42,10%), seguido por Santa Catarina (22,63%) e Rio Grande do Sul (13,41%). A carne de frango é a proteína mais consumida pelos brasileiros, com um consumo de 45,5 kg por habitante em 2024. Esse valor representa um aumento significativo em relação aos 42,8 kg registrados cinco anos antes (ABPA, 2025). O consumo de carne de frango tem apresentado crescimento contínuo ao longo dos anos. Nos Estados Unidos, por exemplo, houve um aumento de 67% nas vendas do setor de carne avícola entre 2021 e 2022 (USDA, 2025). Nos próximos dez anos estima-se um aumento de 17% da produção de aves para o consumo, correspondendo a 52% do crescimento global da produção de carnes. Esse avanço está relacionado a substituição da carne bovina e suína por aves como fonte de proteína na dieta, que é percebida pelos consumidores como uma alternativa mais saudável e com menor custo (OECD-FAO, 2021).

3.2 PEITO DE FRANGO

O peito de frango é um corte popular por apresentar 22 gramas de proteína, 3 gramas de lipídios e 75% de umidade, além de ser conveniente por não ter ossos (FRANCO, 2004). A etapa de cortes pode haver remoção de pele e ossos, é realizada em ambiente refrigerado à 12°C e é um ponto crítico para contaminações devido a manipulação do alimento, utensílios e superfícies. As fibras musculares são categorizadas em vermelhas, intermediárias e brancas, distinguindo-se pelo seu modo de contração. Notavelmente, o frango é singular por possuir músculos com cores acentuadamente diferentes, a carne do peito é de um rosa pálido, enquanto a coxa e a sobrecoxa exibem, em seu estado natural, um rosa acentuado. A tonalidade da carne de frango é um fator chave na percepção da qualidade sensorial e um dos atributos primordiais na decisão de compra do consumidor com a cor podendo variar do cinza claro ao rosado intenso, impactando diretamente na aceitação do produto. (VENTURINI et al., 2007). (MEAD, 2004). A cor da carne está relacionada a múltiplos fatores, intrínsecos e extrínsecos, mas

especialmente, a quantidade de mioglobina presente na espécie e músculo (SHIMOKOMAKI et al., 2006)

3.2.1 Etapas de produção

O processo de abate de aves no Brasil é regulamentado pelo Regulamento de Inspeção Industrial e Sanitária de Produtos de Origem Animal (RIISPOA), conforme o Decreto nº 9.013, de 29 de março de 2017, e pelas Portarias nº 210, de 10 de novembro de 1998, e nº 74, de 7 de maio de 2019. De modo geral, as indústrias brasileiras trabalham em um fluxo de abate no qual inicialmente as aves chegam vivas ao local e passam pelas etapas de insensibilização, sangria, escaldagem até a depenagem em local separado chamado área suja, após isso são transferidas para a área limpa, para reduzir os riscos de contaminação através de funcionários, equipamentos e ou ferramentas, lá passam por um chuveiro de lavagem de aves e seguem para as etapas de evisceração, resfriamento, separação em cortes, congelamento e embalagem (OLIVO, 2006), estas etapas serão detalhadas a seguir.

As aves são recebidas em caixas plásticas em caminhões e passam por um tempo de espera para redução de estresse, após isso elas são penduradas em ganchos pelos pés e encaminhadas à etapa de insensibilização elétrica e em seguida para a sangria, esse processo só pode variar se houver preceitos religiosos como o abate Halal, principalmente em casos de requisitos de países importadores. (OLIVO, 2006). No processo de escalda ocorre a imersão das carcaças em um tanque com água quente para facilitar a remoção das penas, essa etapa tem potencial preocupante para a contaminação cruzada, por submeter todas as carcaças em contato com o mesmo reservatório, colocando em risco o lote ou lotes subsequentes (ROTHROCK et al., 2015). Após a depenagem, as aves passam pela etapa de evisceração para a remoção e separação das vísceras, nessa fase realiza-se o corte da cloaca e a abertura do abdome, expondo as vísceras para exame e separação. A retirada costuma seguir a seguinte ordem: traqueia, cloaca, vísceras não comestíveis, vísceras comestíveis e pulmões (BRAR et al., 2021). Essa etapa é frequentemente considerada um ponto crítico do processamento, devido à elevada carga microbiana presente no trato digestivo das aves, que abriga diversas bactérias, inclusive patogênicas, por isso passam por pontos de inspeção sanitária, repasses e lavagem antes do resfriamento (HUE et al., 2011). As carcaças das aves são submetidas à imersão em tanques de resfriamento ou *chillers*, onde ocorre a redução da temperatura corporal, são

utilizados dois tanques: o primeiro destinado ao pré-resfriamento saindo com temperatura inferior a 16°C e o segundo ao resfriamento final, com o objetivo de atender às exigências da legislação sanitária em que a temperatura no centro do peito deve estar entre 0°C e 4°C (BRASIL, 1998). O resfriamento adequado das carcaças é fundamental para manter a qualidade e a segurança da carne, pois qualquer interrupção nesse processo pode acelerar o crescimento de microrganismos (NASCIMENTO, 2023).

Todo o processo é muito susceptível a contaminação microbiológica, uma vez que na própria linha de processamento desde o abate existem pontos críticos, como a escaldagem, depenagem, toda a linha de evisceração e os tanques de resfriamento em água (chillers), nos quais podem ocorrer contaminações cruzadas entre as carcaças (TORQUATO,2021).

Durante o abate e o processamento de aves é essencial a adoção de estratégias eficazes para o controle da contaminação microbiológica, visando à redução da carga microbiana no produto final. Essas estratégias devem fundamentar-se na aplicação rigorosa de procedimentos sanitários e higiênicos ao longo de toda a linha de produção. No entanto, sob condições típicas de abatedouros, as práticas higiênicas implementadas nem sempre são suficientes para impedir a contaminação das carcaças por microrganismos patogênicos. De acordo com dados do Centers for Disease Control and Prevention (CDC, 2021), nos Estados Unidos, 18,6% dos casos de salmonelose humana registrados em 2021 estavam associados ao consumo de carne de frango. Torna-se evidente a necessidade da aplicação de intervenções complementares para promover uma redução adicional e eficaz da carga microbiana presente nas carcaças (BUNCIC; SOFOS, 2012).

3.3 *Salmonella*

A *Salmonella*, é um gênero de bactérias gram negativas, possuem forma de bastonete, não produtoras de esporos. São anaeróbias facultativas, se adaptam em uma ampla faixa de temperaturas (5 a 47 °C), toleram grandes variações de pH (4,0 a 9,0) (L.; SORVILLO; KUO, 2012). Descoberta em 1855 por Theobald Smith isolada de porcos, e recebeu o nome de Dr. Daniel Elmer Salmon, médico veterinário patologista que trabalhava com Smith. Existem mais de 2500 sorotipos identificados, e de acordo com a nomenclatura, pertencem à família das Enterobactereacea. O gênero está constituído de duas espécies

geneticamente distintas: *S. enterica* e *S. bongori*. A *S. enterica*, de maior relevância para a saúde pública, sendo composta por seis subespécies (SEGUNDO et al. 2021).

A Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) estabelece ausência completa de *S. Enteritidis* e *S. Typhimurium* em carne de frango e seus derivados em 25 g de produto na Instrução Normativa 60/2019 (BRASIL, 2019). Muitos animais como gado, aves e répteis podem carregar a bactéria *Salmonella* naturalmente sem sintomas aparentes, por isso é comumente encontrada em alimentos derivados de animais contaminados, como leite não pasteurizado, carne de gado ou aves, ovos, e alimentos que não passaram por tratamento térmico necessário para inativação, sendo responsável pela maior parte das mortes e hospitalizações relacionadas ao consumo de alimentos contaminados nos Estados Unidos (FDA, 2023).

A salmonelose é a infecção gastrointestinal causada de forma direta ou indireta, por meio do contato com animais ou após consumir alimentos que estão contaminados com bactérias do gênero *Salmonella* spp. (OMS, 2018) e é categorizada como uma importante zoonose em saúde pública. Sua gravidade depende de fatores como o grau de imunidade do hospedeiro, presença de coinfeções, estresse, fatores de manejo e dose infectante (WIBISONO et al., 2020). O sorotipo mais relacionado à contaminação de aves e à incidência de Salmonelose em humanos é a *Salmonella* Typhimurium, causando inflamação no intestino, febre e diarreia. Esse sorotipo possui mecanismos de defesa para resistir a ambientes extremos como em pHs ácidos. Apesar disso, a *Salmonella* é sensível ao calor, sendo possível evitar a contaminação por alimentos através do cozimento completo. Outra forma de contaminação é por meio de utensílios compartilhados entre alimentos que seriam consumidos crus com alimentos contaminados (LUSTOSA et al., 2021).

Diante desse cenário, torna-se fundamental adotar estratégias eficazes para a redução da carga microbiana de *Salmonella* Typhimurium na carne de frango, a fim de garantir a segurança do alimento (GART et al., 2016; LÓPEZ-ROMERO et al., 2018). Em junho de 2025 foi reportado um surto de salmonelose causando 42 hospitalizações e uma morte associadas ao contato com aves de quintal (CDC,2025). Em 2018, uma empresa foi obrigada a realizar o recolhimento de aproximadamente 9.300 kg de saladas de frango prontas para o consumo, em decorrência da detecção de contaminação por *Salmonella* spp. que causou 94 hospitalizações (USDA,2018).

3.4 MÉTODOS NÃO TÉRMICOS DE REDUÇÃO DE CARGA MICROBIANA

A aplicação de calor em alimentos resulta na pasteurização ou esterilização, tratamentos térmicos muito utilizados na indústria e eficientes. Esse calor aplicado causa a inativação de microrganismos deteriorantes e patogênicos, e também acarreta o desenvolvimento de sabores, aromas, textura e cor, típicos de alimentos cozidos (SILVA; GIBBS, 2012). Tecnologias de processamento não térmico são uma alternativa eficiente para a descontaminação de alimentos sem utilização de calor. As tecnologias não térmicas são efetivas em temperatura ambiente e se mostram aplicáveis especialmente para os produtos à base de carne crua, que são vulneráveis à deterioração microbiana em um curto espaço de tempo e sofrem grande alteração física com a temperatura (VAN IMPE et al., 2018)

3.4.1 Luz pulsada

Em 1801, o cientista alemão Johan Ritter identificou um tipo de radiação além do espectro visível, localizada após a luz violeta, com capacidade de oxidar compostos como haletos de prata. Essa radiação foi posteriormente denominada luz ultravioleta (UV). O potencial germicida da radiação UV foi observado pela primeira vez em 1878. No entanto, as primeiras instalações industriais utilizando essa tecnologia só surgiram em 1955, na Suíça e na Áustria. Após anos essa tecnologia passou a ser empregada também na esterilização de embalagens. Recentemente, o uso da luz UV tem se expandido para o tratamento de superfícies de alimentos como frutas e hortaliças, contribuindo para a eliminação de microrganismos deterioradores e a extensão da vida útil dos alimentos (BINTSIS; LITOPOULOU-TZANETAKI; ROBINSON, 2000).

A luz pulsada é uma variante da luz UV contínua em que a luz é aplicada em pulsos com alta intensidade em curtos tempos. A luz pulsada também é conhecida como luz UV pulsada, luz pulsada intensa, luz pulsada de alta intensidade, luz UV de amplo espectro de alta intensidade e/ou luz branca pulsada (HEINRICH et al., 2016). A radiação eletromagnética não-ionizante ultravioleta não tem poder de penetração, sendo usada para descontaminar superfícies. Enquanto a luz UV compreende um comprimento de onda de 200 a 400 nm a LP pode variar de 200 à 1100 nm, abrangendo comprimentos de onda desde o UV até próximo ao infravermelho. O comprimento de onda de até 260 nm é o mais efetivo, que afeta a proteína e os ácidos nucleicos (DNA) dos microrganismos (MANDAL et al., 2020). Essa radiação causa mínimas alterações no produto, não produzindo resíduos ou subprodutos (ROWAN, 2019). O princípio tecnológico da luz

pulsada baseia-se no acúmulo de alta tensão em capacitores, que liberam a energia armazenada em pulsos ultracurtos por meio de uma fonte de luz intensa. Esses pulsos provocam danos oxidativos à membrana celular e ao DNA dos microrganismos, comprometendo sua viabilidade. Diversos parâmetros podem ser analisados na aplicação da luz pulsada, porém a fluência é, em geral, o parâmetro apropriado para descrever a eficácia, por permitir medir a quantidade de energia que atinge a área exposta do alimento, portanto, a inativação microbiana depende da fluência aplicada no local submetido ao pulso (ROWAN et al., 1999). Os componentes típicos de um equipamento de luz pulsada ilustrados na Figura 1

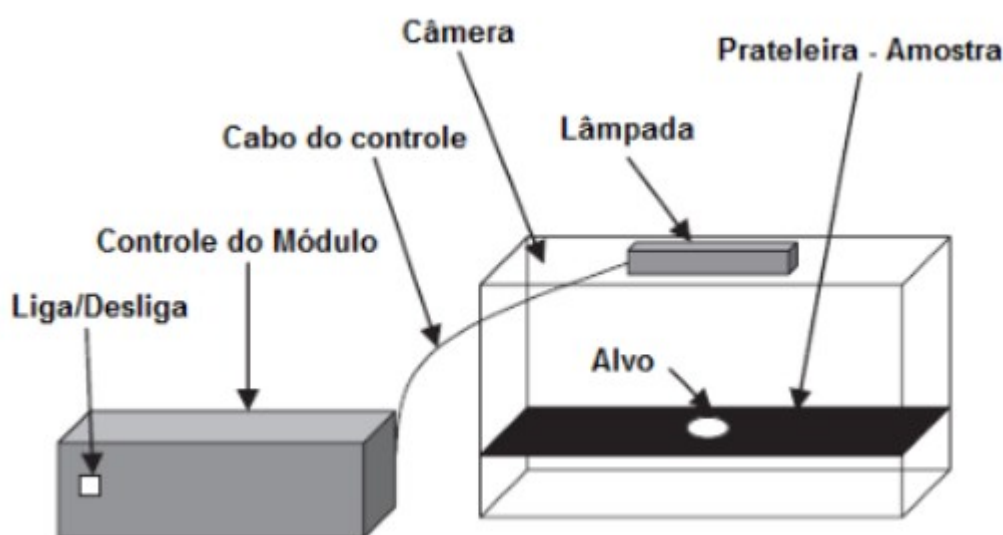


Figura 1- Representação Esquemática - unidade experimental de luz pulsada.

Fonte: Adaptado Xenon Corporation, 2015.

Em 1996 a Food and Drug Administration (FDA) aprovou nos EUA a utilização da LP no processamento de alimentos com limitações, a fluência de luz durante o tratamento não deve exceder 12 J/cm^2 , o espectro de emissão de luz deve permanecer na faixa de 200 a 1100 nm, duração do pulso menor ou igual a 0,2 segundos. No entanto, as pesquisas sobre LP têm avançado nos últimos anos, podendo questionar esses limites ao comprovar novos limites seguros (SCHOTTROFF et al., 2018). Sua eficácia está relacionada aos parâmetros de uso, características do produto tratado e microrganismo alvo (TORQUATO, 2021). A aplicação da LP em produtos cárneos pode resultar na redução de 1 a 3 logs na carga microbiana de patógenos presentes na superfície dos

alimentos, contribuindo para a extensão da vida de prateleira desses produtos (MAHENDRAN et al., 2019).

3.5 AGENTE MICROBIANO

Agentes antimicrobianos são utilizados na indústria de alimentos como estratégia para limitar o crescimento de bactérias, sendo a utilização de ácidos orgânicos uma das mais comuns. O mecanismo de ação desses agentes envolve a alteração do equilíbrio químico das células microbianas, especialmente através da modificação da estrutura das unidades da membrana celular e da permeabilidade, resultando no vazamento de metabólitos internos. Além disso, os ácidos podem penetrar na célula, afetando adversamente atividades intracelulares vitais como a replicação do DNA e a síntese proteica, culminando na morte celular (COBAN, 2020).

3.5.1 Ácido peracético

A indústria alimentícia utiliza ácidos como agentes microbianos, inibindo o crescimento de microrganismos patogênicos em superfícies e alimentos. Um dos ácidos utilizados é o ácido hipocloroso por ser de fácil aplicação e baixo custo, porém apesar de ter efeito contra bactérias, vírus e fungos seu uso excessivo resulta na formação de compostos organoclorados que são carcinógenos quando entram em contato com matéria orgânica (KITIS, 2004). O ácido peracético (PAA) é um ácido orgânico utilizado como desinfetante que apresenta diversas vantagens como baixa formação de compostos carcinogênicos quando em contato com matéria orgânica (Shen et al. 2013). O PAA forma radicais livres que danificam a membrana celular de microrganismos, além de não ser corrosivo e sendo eficaz em baixas concentrações (KIM; MIN, 2022). Kataria et al. (2020) observaram que a imersão de asas de frango em ácido peracético a 500 ppm por apenas 10 segundos foi eficaz na redução de *Salmonella Typhimurium*, demonstrando potencial para uso como intervenção antimicrobiana rápida na indústria avícola. Em agosto de 2024 o USDA publicou uma Diretriz do Serviço de Inspeção e Segurança Alimentar atualizando os limites permitidos de PAA em alimentos, sendo agora 2000 ppm o máximo para banhos de imersão em carcaças de frango.

3.6 MÉTODOS COMBINADOS PARA INATIVAÇÃO DE BACTÉRIAS PATOGÊNICAS

A combinação de métodos pode levar a efeitos aditivos ou sinergismo entre eles. O chamado método de barreira (*hurdle*) é definido como a combinação de métodos existentes e técnicas de conservação para estabelecer uma série de fatores preventivos que o microrganismo não seja capaz de superar. A combinação de métodos tem o objetivo de impedir o crescimento e atrapalhar a estabilidade do microrganismo por submetê-lo a estresses químicos, físicos ou ambientais (KHAN et al., 2019).

Quando o efeito antimicrobiano é aditivo, a redução microbiana corresponde apenas à soma dos efeitos individuais das técnicas aplicadas. No entanto, em casos de sinergismo, ocorre uma interação entre as técnicas que potencializa seu efeito, resultando em uma inibição significativamente maior do que a obtida pela simples adição dos efeitos isolados (LEISTNER, 2007). Estudos demonstraram que a sinergia entre tecnologias depende da combinação escolhida, da resistência do microrganismo, do produto e outros fatores como temperatura e metodologia do experimento (AALIYA et al., 2021). Em 2024 um estudo sobre a combinação de luz UV com ácido peracético observou uma contribuição de 23-65% da ação sinérgica no dano da membrana celular de esporos de fungo (CAO et al., 2025).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 MICRORGANISMOS

A cepa de *Salmonella* Typhimurium (ATCC 14028) utilizada neste estudo foi adquirida da American Type Culture Collection. A cepa foi armazenada em tubo Eppendorf contendo solução de glicerol a 30% (v/v) a -24 °C no ultra freezer do laboratório de engenharia biológica (LIEB-UFSC) da Universidade Federal de Santa Catarina. Procedeu-se com o fortalecimento através da reidratação e cultivo em caldo TSB (Trypticase Soy Broth) a 37 °C por 24 h. Após isso, prepararam-se cepas foram estriadas com alça bacteriológica na superfície do Ágar Triptona de Soja (TSA) e incubadas invertidas em estufa incubadora (B.O.D) a 37 °C por 24h. Após o crescimento, as placas foram armazenadas a 4 °C.

Com uma alça bacteriológica uma unidade formadora de colônia foi isolada e adicionada a um tubo falcon contendo 5ml de caldo TSB (Trypticase Soy Broth) a 37 °C por 16 h com aeração (220 rpm), alcançando a fase estacionária na ordem de 10⁹ CFU/mL.

Os tubos de cultura foram submetidos à centrifugação por 5 minutos a 5500 rpm, em seguida o sobrenadante foi removido e adicionado a 5ml de solução tampão fosfato, o inóculo foi submetido a agitação em vórtex por 30 segundos. O procedimento foi repetido mais duas vezes a fim de remover completamente o TSB da solução. Hsu e Moraru (2011) analisaram o efeito de diferentes substratos na absorção de luz pulsada e observaram que por causa de sua composição química a solução tampão fosfato (BPB) absorve menos luz UV do que TSB.

4.2 SISTEMA DE LUZ PULSADA

Os tratamentos de luz pulsada foram realizados utilizando o equipamento de luz pulsada de bancada (XENON Model X-1100, Xenon Corporation, Wilmington, MA, USA). Ele conta com um painel de controle no qual é possível ajustar a voltagem, o tempo de pulso e o número de pulsos, além de uma câmara de exaustão de aço inoxidável, com uma prateleira para a regulagem da distância entre a amostra e a lâmpada de xenônio.

Os tratamentos foram conduzidos em temperatura controlada de 21°C com a amostra disposta no centro da bandeja à 6,03 cm de distância da lâmpada. Previamente aos experimentos foram realizados testes de incidência da luz pulsada (LP) utilizando um

radiômetro (Ophir Optronics Inc., Nova II display, North Logan, UT, EUA) acoplado a uma cabeça piroelétrica (Ophir Optronics Inc., L40 150 A, North Logan, UT, EUA) para o mapeamento da radiação incidente sobre as amostras, a fim de mensurar a fluência aplicada nas amostras durante o experimento.



Figura 2 - Equipamento de luz pulsada da Xenon, modelo X-1100

Fonte: XENON Corporation, 2019

Para o experimento a tensão do equipamento foi definida em 3000 V com duração de 420 μ s, foi analisado nesse trabalho o desempenho para 1 pulso e 6 pulsos disparados manualmente. O equipamento foi higienizado com álcool 70% entre amostras para mitigar o risco de contaminação.

4.3 PREPARO DAS AMOSTRAS DE FRANGO

As amostras utilizadas no experimento consistiram em filés de peito de frango sem osso e sem pele congelados da marca Sadia do mesmo lote, adquiridos em estabelecimento comercial da rede Imperatriz - Florianópolis, SC. As amostras foram descongeladas em refrigerador à 4 °C por 24 h antes das análises. Os peitos ao serem removidos da embalagem original eram homogeneizados e randomizados antes de serem cortados de forma asséptica na cabine de segurança microbiológica com auxílio de uma faca e tábua de vidro estéreis nas dimensões das placas de petri (60x15mm) Figura 3.



Figura 3- Amostras de filé de peito de frango resfriados após cortados.

Fonte: elaborado pela autora (2025)

As amostras foram identificadas e agrupadas em três categorias de forma randômica: Amostras controle negativo que não receberam nenhum tipo de tratamento, imersão ou contaminação, foram analisadas com objetivo de avaliar a microbiota natural das amostras. Amostra controle que passaram por imersão em água filtrada com pH 6,26 para simular a mesma condição de imersão das demais amostras e contaminada com *S. Typhimurium*, sem nenhum tipo de tratamento de luz ou ácido. E amostras de grupos combinados os quais passaram por pelo menos um tipo de tratamento com LP ou imersão em solução ácida.

As soluções de imersão foram preparadas com 300 ml de água filtrada (Purificador de Água Consul Filtragem Classe A) em saco amostrador estéril da marca 3M, foi adicionada a quantidade necessária de ácido para os tratamentos de PAA foram calculadas utilizando a equação:

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

em que C_1 representa a concentração conhecida do ácido, C_2 a concentração desejada do ácido, V_1 o volume de ácido a ser adicionado e V_2 o volume total de água. As quantidades de HCl eram adicionadas até atingir o pH correspondente a solução de PAA para que obtivéssemos grupos de ácido inorgânico de mesmo pH afim de demonstrar que o efeito de inativação não está atrelado ao pH da solução de imersão e sim à natureza do PAA.

4.4 TRATAMENTO *S. Typhimurium* COM PAA/HCl E LP

As amostras de peito de frango foram colocadas dentro de placas de petri para padronizar a área de amostragem. Foram submersas por 10 segundos com auxílio de uma pinça estéril, após a imersão as amostras são dispostas invertidas em uma grade por um

minuto para remover o excesso de solução. Em seguida são inoculadas com 50 μ L da solução bacteriana de *S. Typhimurium* na parte superior do peito de frango, adicionando gotas do inóculo uniformemente utilizando uma micropipeta (Labmate PRO). As amostras ficam em repouso por 5 minutos para que ocorra a absorção da solução inoculada e são encaminhadas para a câmara de exaustão da LP onde é aplicado o número de pulsos definido para cada amostra à tensão de 3000 V por 420 μ s. Nascimento, 2013 demonstrou 5 minutos entre inoculação e tratamento com luz pulsada como o tempo com maior redução microbiana e por isso foi utilizado como parâmetro desse estudo.

Luz Pulsada / Solução de Imersão	Água (pH 6.26)	PAA (pH 3.29)	PAA (pH 3.13)	HCl (pH 3.29)	HCl (pH 3.13)
0 pulsos	Controle	P1	P2	H1	H2
1 pulso (1,91 J/cm ²)	L1	P1L1	P2L1	H1L1	H2L1
6 pulsos (12,22 J/cm ²)	L6	P1L6	P2L6	H1L6	H2L6

Tabela 1 - Planejamento experimental para inativação de *S. Typhimurium* por luz pulsada (1,91 e 12,22 J/cm²) e ácidos (PAA e HCl, pH 3,29 e 3,13) em peito de frango

Fonte: elaborado pela autora

Após o tratamento com LP as amostras eram encaminhadas novamente para a cabine de fluxo laminar onde eram removidas da placa de petri com auxílio de uma alça bacteriológica e colocadas em sacos de amostragem com 30 mL de água peptonada a 0,1% (APP). Posteriormente, as amostras foram homogeneizadas em Stomacher (Bag Mister ITR, Servilab) durante 60 segundos, a seguir foram realizadas diluições seriadas de 0,1 ml da solução em microtubos contendo 0,9 ml de solução tampão fosfato e a inoculação foi feita em Petrifilm para contagem de enterobactérias (Petrifilm™ Enterobacteriaceae (EB)) devidamente identificadas (Figura 5). As placas foram levadas para a incubadora B.O.D a 37 °C.

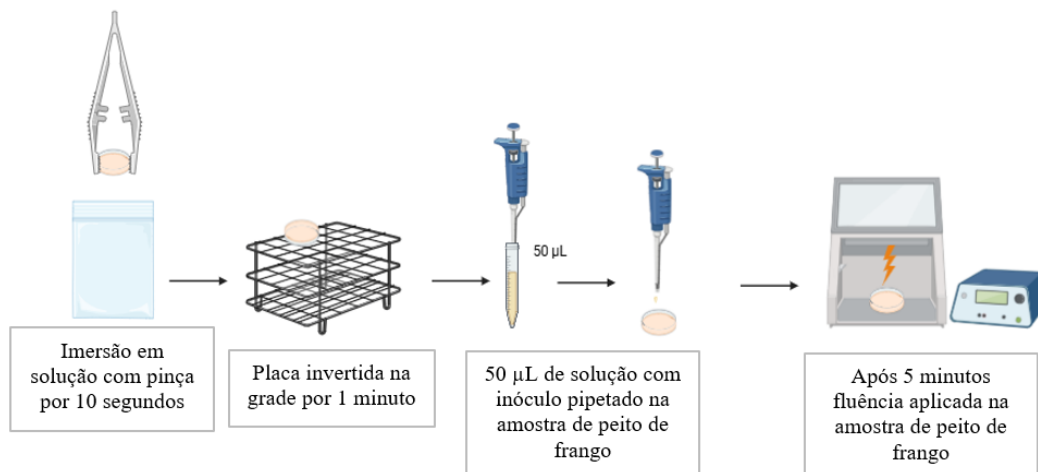


Figura 4 - Etapas do tratamento de amostras.

Fonte: elaborado pela autora (2025)

A contagem de células de *Salmonella* Typhimurium foi realizada por enumeração após o período de incubação de 24 horas. A concentração microbiana foi determinada multiplicando-se o número de unidades formadoras de colônia (UFC) pelo inverso do fator de diluição, dividindo-se o resultado pela área da amostra de frango analisada. Os resultados da redução da carga microbiana obtidos foram expressos em log (N/N_0), sendo N a população bacteriana (UFC/cm²) das amostras submetidas aos tratamentos com LP e/ou PAA e HCl, e N_0 a população inicial (UFC/cm²) correspondente à amostra controle que foi imersa somente em água filtrada, inoculada e não passou por tratamento com LP.

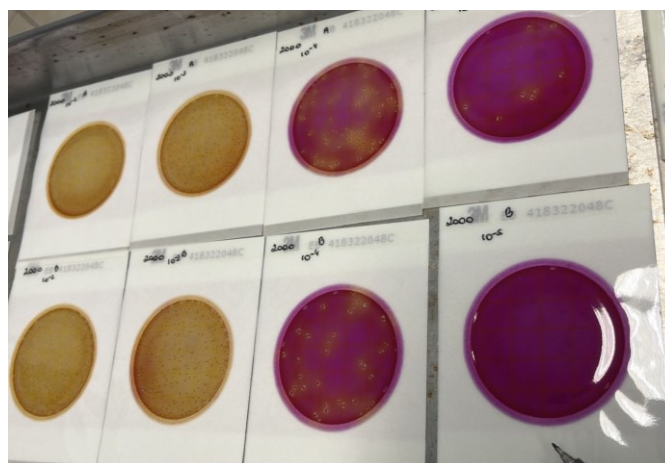


Figura 5 - Placas de contagem contaminadas em várias diluições

Fonte: elaborado pela autora

4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os valores de redução microbiana para cada grupo analisado foram submetidos à análise de variância (ANOVA) para verificar se havia diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos aplicados. Com os resultados da ANOVA, aplicou-se o teste de Tukey como procedimento de comparação múltipla entre grupos para identificar quais grupos diferem entre si. O índice de sinergismo é determinado através da Equação 1, como descrito por descrita por Yang et al. (2014):

$$S = \frac{\text{Log redução métodos combinados}}{\Sigma \text{Log redução métodos isolados}} \quad \text{Eq. 1}$$

Na qual Log redução métodos combinados foi obtido através dos dados experimentais obtidos para a inativação microbiana da combinação com ácido (PAA ou HCl) com LP, enquanto Log redução métodos isolados corresponde à soma da inativação microbiana promovida exclusivamente métodos isolados de ácido e LP somados.

4.6 ANÁLISE DE COR

A variação de cor das amostras de peito de frango foi medida por análise de cor em modelo CIELAB, através de colorímetro Delta Vista 450G (Delta Color, São Leopoldo, Brasil), configurado com iluminante D65, o colorímetro foi posicionado perpendicularmente à superfície da amostra, mantendo o sensor em contato próximo, a fim de minimizar a influência da luz ambiente e garantir a reprodutibilidade das leituras

As amostras foram submetidas a medidas durante três momentos, o controle é o primeiro momento em que a amostra não passou por nenhum tipo de tratamento. Após a primeira medição as amostras foram imersas em solução de PAA em concentrações de 1000, 1400 ou 2000 ppm por 10 segundos, após um minuto a cor foi medida novamente. Por fim as amostras são encaminhadas para o tratamento de LP com fluência 1,91 J/cm² (1 pulso de 420 μs a 3000 V) e foi feita a última medição, o procedimento foi realizado em triplicata para todos os grupos.

A análise de cor feita por modelo CIELAB quantifica e compara variação de cor em espectros de luminosidade (L*), tonalidade de verde-vermelho (a*) e tonalidade azul-amarelo (b*). A variação total de cor (ΔE) é calculada a partir dos valores de L*, a* e b* seguindo a seguinte Equação (2) (FRACARI et al., 2024).

$$\Delta E = \sqrt{[(L^2 - L^1)^2 + (a^2 - a^1)^2 + (b^2 - b^1)^2]} \quad \text{Eq. 2}$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 INATIVAÇÃO DE *S. Typhimurium* PELOS MÉTODOS COMBINADOS DE LP E ÁCIDOS (PAA E HCL)

O gráfico a seguir demonstra os resultados das reduções de *S. Typhimurium* em peito de frango. As barras brancas mostram o desempenho individual de cada ácido na inativação de *S. Typhimurium* em peito de frango, as barras texturizadas em cinza ilustram a combinação de cada solução após serem tratados com 1 pulso na LP e as barras cinza escuro mostram os grupos submetidos a 6 pulsos de LP.

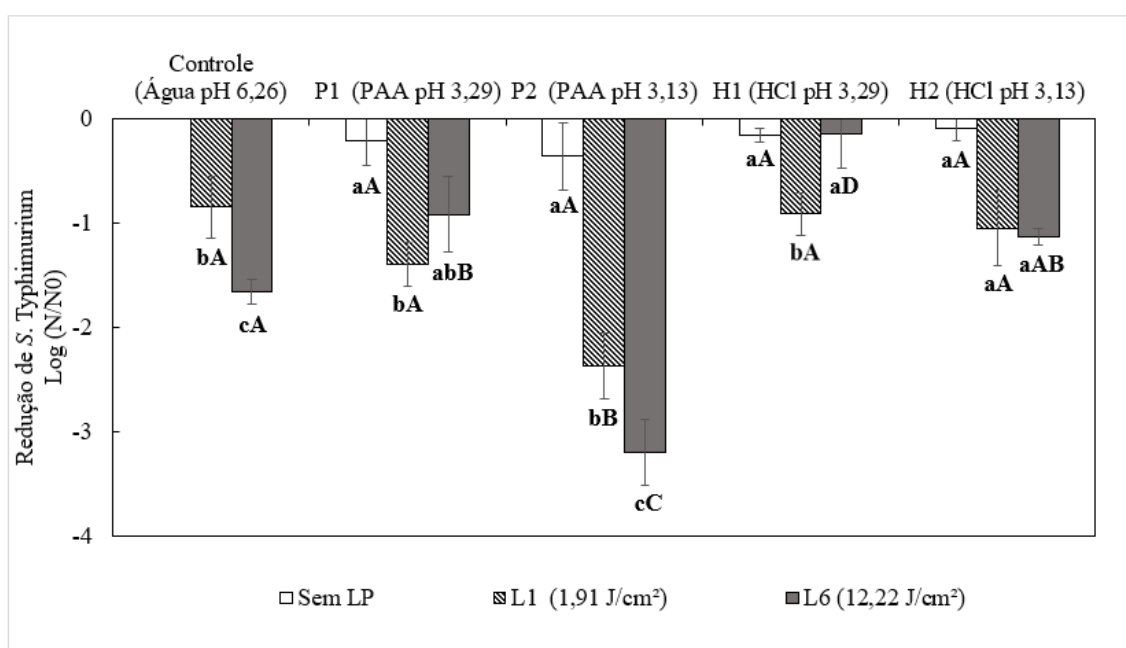


Figura 6 - Redução de *Salmonella Typhimurium* (Log N/N₀) em filés de peito de frango submetidos a diferentes tratamentos com ácido peracético (PAA) e ácido clorídrico (HCl), isoladamente e combinados com luz pulsada (LP). As barras representam as médias ± desvio-padrão das reduções observadas para os tratamentos: controle (água, pH 6,26), P1 (1000 ppm PAA, pH 3,29), P2 (2000 ppm PAA, pH 3,13), H1 (HCl pH 3,29) e H2 (HCl pH 3,13). As barras brancas representam os tratamentos apenas com ácido sem aplicação de luz, as barras texturizadas cinza representam amostras sob aplicação de 1 pulso (1,91 J/cm²) e as barras sólidas são amostras que passaram por 6 pulsos (12,22 J/cm²) de LP. Letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas entre os tipos de tratamento ($p < 0,05$), enquanto letras maiúsculas diferentes indicam diferenças entre as intensidades de luz pulsada aplicadas.

Luz pulsada/ Solução de imersão	Água (pH 6.26)	P1 PAA (pH 3.29)	P2 PAA (pH 3.13)	H1 HCl (pH 3.29)	H2 HCl (pH 3.13)
0 pulsos		-0,20 ± 0,09	-0,35 ± 0,32	-0,15 ± 0,04	-0,08 ± 0,06
1 pulso (1,91 J/cm ²)	-0,85 ± 0,26	-1,47 ± 0,12	-2,37 ± 0,26	-0,90 ± 0,20	-1,04 ± 0,36
6 pulsos (12,22 J/cm ²)	-1,65 ± 0,10	-0,91 ± 0,32	-3,20 ± 0,27	-0,13 ± 0,28	-1,10 ± 0,03

Tabela 3 – Reduções logarítmicas de *Salmonella* Typhimurium (Log N/N₀) em filés de peito de frango submetidos a diferentes tratamentos com ácido peracético (PAA) e ácido clorídrico (HCl), isoladamente e combinados com luz pulsada (LP).

A figura 6 mostra os grupos de tratamento exclusivamente com imersão em ácido ao comparar o desempenho na redução de *S. Typhimurium*. Os grupos de imersão de ácido isolados quando comparados não apresentam diferença significativa entre si, o P2 apresentou uma redução de $-0,35 \pm 0,32$ Log UFC/cm² em comparação com H2 reduziu $-0,08 \pm 0,06$ Log UFC/cm². No pH mais alto o P1 inativou $-0,20 \pm 0,09$ Log UFC/cm² enquanto o H1 reduziu $-0,15 \pm 0,04$ Log UFC/cm², não apresentando uma diferença significativa pelo teste de Tukey quando comparado ao PAA em mesmo pH. Os resultados demonstram que as concentrações testadas não apresentam diferença significativa quando aplicadas de forma isolada em tratamento de peito de frango para inativação de *S. Typhimurium*. A EFSA (Autoridade Europeia de Segurança Alimentar e o FSIS (United States Department of Agriculture's Food Safety and Inspection Service) estabeleceram em 2014 e 2024 respectivamente um limite máximo de ácido peracético de 2000 ppm para imersões de curto período em carcaça de frango, valor máximo que foi testado nesse experimento.

Para o grupo P2L6 resultou em uma redução de $-3,20 \pm 0,27$ Log UFC/cm² enquanto o grupo H2L6 obteve uma redução de $-1,10 \pm 0,03$ Log UFC/cm², evidenciando um efeito 3 vezes maior do ácido peracético em comparação ao ácido clorídrico em mesmas condições. Por outro lado, o grupo P1L6 as mesmas condições para o pH 3,29 demonstram outro resultado, a combinação com LP 12,22 J/cm² resultou em uma inativação de $-0,91 \pm 0,32$ Log UFC/cm² enquanto o H1L6 apresenta $-0,13 \pm 0,28$ Log UFC/cm². O resultado de redução para o grupo H1L6 foge do esperado do experimento, que deveria ser próximo a redução de L6 que é $-1,65 \pm 0,10$ Log UFC/cm². Isso se deve

provavelmente a alguma variabilidade da microbiota de amostra de carne de frango que causaram resultados divergentes, o que evidencia a complexidade de trabalhos com experimentos práticos envolvendo microrganismos vivos e meios de cultura não estéreis.

O resultado para tratamentos de ácido isolados demonstra uma maior eficiência de inativação de *S. Typhimurium* em peito de frango por imersão em ácido orgânico, como demonstrado, porém sem relação com o pH por não apresentar o mesmo resultado no tratamento com ácido inorgânico. O ácido peracético tem uma maior capacidade de penetração celular por possuir uma constante de dissociação (pKa) de 8,2 enquanto o HCl é aproximadamente 7,5. A constante de dissociação permite que ele mantenha sua forma dissociada com mais facilidade, aumentando a permeabilidade celular e acarretando em maior dano no metabolismo da bactéria por mudança de pH. Seu alto poder oxidativo altera a integridade da membrana celular, conforme demonstrado por estudos como o de Leggett et al., (2016). Ao entrar em contato com o meio contaminado o PAA gera espécies reativas de oxigênio (ROS) que causam estresse oxidativo acarretando em danos à membrana citoplasmática e oxidação de grupos sulfidríla e ligações de enxofre de proteínas. (Carletto et al., 2022). Segundo Mahamud, Nahar e Ha (2025), o ácido peracético (PAA) demonstrou ser mais eficaz que os desinfetantes à base de cloro na desinfecção de *S. Typhimurium* em pele de frango e superfícies, sustentando os resultados demonstrados e validando seu uso para desinfecção em ambientes de processamento de aves.

A imagem 6 demonstra o impacto da LP na inativação da *S. Typhimurium*. Neste trabalho foram observados os efeitos ao variar entre 1,91 J/cm² (1 pulso de 420 μs, 3000 V) para 12,22 J/cm² (6 pulsos de 420 μs) na distância de 6,03 cm entre a amostra e a lâmpada. No grupo L1 foi obtido uma redução de $-0,85 \pm 0,26$ Log UFC/cm² enquanto para L6 resultou em uma redução de $-1,65 \pm 0,10$ Log UFC/cm², uma redução de *S. Typhimurium* quase duas vezes maior ao multiplicar seis vezes o número de pulsos, evidenciando efeito do aumento da fluência da LP na redução microbiana.

Nos grupos de tratamento combinado é possível notar a eficácia na combinação com ácido orgânico. Quando comparamos grupos P2L1 resultou em redução de $-2,37 \pm 0,26$ Log UFC/cm² enquanto para P2L6 obtivemos $-3,20 \pm 0,27$ Log UFC/cm², uma diferença significativa ($p < 0,05$) de 35 %. Já para o P1L1 a diferença não é significativa ao comparar fluências, foi obtida a redução de $-1,47 \pm 0,12$ Log UFC/cm² enquanto para P1L6 reduziu $-0,96 \pm 0,32$ Log UFC/cm². Observou-se que para o pH 3,13, a combinação

de PAA com luz pulsada produz um efeito de inativação distinto e mais pronunciado em comparação ao pH 3,29.

Os achados deste estudo destacam a fluência total incidente sobre a superfície celular como o principal determinante da inativação microbiana por LP. Segundo Nascimento (2023), maiores tensões aplicadas, menor distância entre a lâmpada e a amostra e pulsos mais longos aumentam a energia entregue ao microrganismo, resultando em maior redução populacional. A sensibilidade microbiana à LP está diretamente relacionada ao dano irreversível causado ao DNA bacteriano devido à alta intensidade luminosa emitida em um intervalo extremamente curto, o que pode promover superaquecimento celular e alterar estruturas essenciais, como proteínas e ácidos nucleicos. Esses efeitos culminam na interrupção da replicação e, posteriormente, na ruptura e morte celular. Porém esses efeitos estão diretamente ligados a área da amostra suscetível à luz, dessa forma o tratamento por LP não é recomendado para superfícies irregulares que podem ter espaços com sombra que não tenham efeito esperado de inativação (TORQUATO,2021). Os resultados demonstraram o efeito de fluência maiores de LP aumentam diretamente a inativação quando combinado com ácido, indicando a importância do papel da fluência na combinação dos métodos.

Torquato (2021) obteve uma redução de *S. Typhimurium* de -1.22 ± 0.67 Log UFC/cm² para um pulso com fluência de 2.12 J/cm² de LP e -1.93 ± 0.94 Log UFC/cm² para 6 pulsos com fluência de 12.72 J/cm², resultados que corroboram com os obtidos neste trabalho para grupos isolados como L1 $-0,85 \pm 0,26$ Log UFC/cm² e L6 $-1,65 \pm 0,10$ Log UFC/cm² nas fluências 1,91 J/cm² e 12,22 J/cm² respectivamente.

5.2 SINERGISMO

Sinergismo ± erro			
Tratamentos			
LP	pH	PAA	HCl
L1 (1,91 J/cm ²)	3,29	1,24 ± 0,42	1,00 ± 0,38
	3,13	1,23 ± 0,54	0,92 ± 0,39
L6 (12,22 J/cm ²)	3,29	0,46 ± 0,08	0,08 ± 0,06
	3,13	1,17 ± 0,31	0,61 ± 0,09

Tabela 2 - Índice de sinergia para a inativação de *S. Typhimurium* por tratamentos combinados entre PAA + LP e HCl + LP, considerando diferentes fluências de LP (1,91 e 12,22 J/cm²) e

diferentes concentrações de ácido com valores de pH para mesma concentração entre os diferentes ácidos (3,13 e 3,29).

O sinergismo ocorre quando a combinação de dois ou mais agentes promovem um efeito superior à soma dos efeitos individuais de cada tratamento isolado. No contexto da inativação microbiana, essa interação pode resultar de mecanismos complementares de ação, como o dano oxidativo promovido por compostos químicos e o estresse fotoquímico induzido por tratamentos físicos, a exemplo da luz pulsada (LP) (Zhang et al. (2020)). A presença de sinergismo é especialmente relevante em tecnologias de preservação não térmica, pois permite atingir níveis mais elevados de segurança microbiológica com menor intensidade de cada agente, reduzindo impactos negativos sobre as características sensoriais e nutricionais do alimento. Na tabela 2 o índice $S > 1$ indica um efeito sinérgico, ao seja ao combinar os métodos seus efeitos são potencializados e superiores a soma dos efeitos individuais. O grupo P2L6 é uma demonstração desse sinergismo, o efeito sinérgico calculado para o grupo é de $1,17 \pm 0,31$ apresentando uma redução de $-3,20 \pm 0,27$ Log UFC/cm² enquanto o grupo isolado L6 apresentou redução de $-1,65 \pm 0,10$ Log UFC/cm² e o grupo isolado de P2 reduziu $-1,09 \pm 0,48$ Log UFC/cm².

No presente estudo, a observação de reduções microbianas superiores nos tratamentos combinados indica um efeito sinérgico entre o PAA e a LP, potencializando a eficácia antimicrobiana sendo possível diminuir parâmetros de tratamento como concentração de ácido ou fluência de luz afim de preservar as características do alimento e reduzir custos.

Foi observado por Koivunen & Heinonen-Tanski (2005) o efeito sinérgico dos tratamentos de PAA e luz UV na inativação de *Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis*, e *Salmonella enteritidis*. Os autores apontam que os diferentes mecanismos de ação dos métodos de tratamento contribuem para o efeito sinérgico ao afetar a capacidade de recuperação da bactéria.

5.3 COMPARAÇÃO DA VARIAÇÃO DE COR PELO TRATAMENTO COMBINADO DE PAA E LP

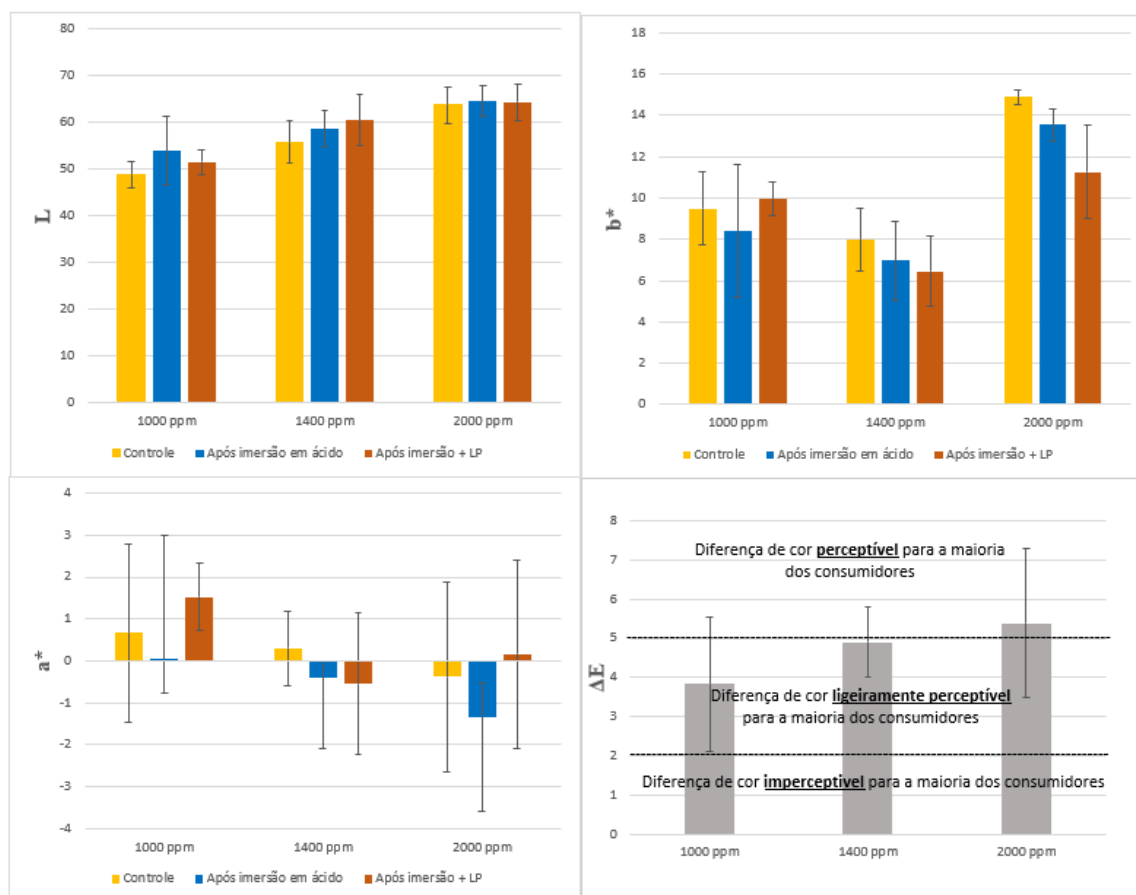


Figura 7 - Variação dos parâmetros colorimétricos L* (luminosidade), b* (intensidade de amarelo), a* (intensidade de vermelho) e ΔE diferença total de cor nas amostras de filé de peito de frango submetidas aos diferentes tratamentos, em concentrações de 1000, 1400 e 2000 ppm e 1,91 J/cm² (1 pulso de 420 μ s a 3000 V). As barras representam as médias e as linhas verticais o desvio-padrão.

As figuras 7a, 7b e 7c demonstram a variação de cor em parâmetros L*, a* e b*, L* representa a variação de luminosidade que quanto mais alta indica uma cor mais clara, sendo 100 a cor branca e 0 cor preta, os dados do experimento indicam valores entre 50 e 60 nos grupos. O fator b* ilustra a variação de cores no eixo amarelo-azul, trazendo valores positivos para tonalidade amarela e negativos para azul, neste experimento todos os grupos apresentaram valores positivos indicando uma tonalidade amarelada como esperado no peito de frango pela presença de gordura oxidada. Por fim, o parâmetro a* representa o eixo verde-vermelho com valores positivos para tonalidades vermelhas e verdes para valores negativos, as amostras apresentaram valores baixos oscilando no eixo zero indicando tonalidade neutra. Os resultados obtidos são satisfatórios corroborarem com os resultados encontrados por Rosario-Pérez et al. (2023) que obteve resultados em

amostra de peito de frango em imersão de solução salina próximos a 60 no parâmetro L*, valores positivos acima de 15 para os grupos no parâmetro b* e resultados neutros em a*. Foi observado que não houve mudança significativa de cor entre a cor natural do peito de frango sem tratamentos e a cor após tratamentos de imersão em PAA e LP para nenhuma das intensidades, indicando que estatisticamente os tratamentos não tem diferença de cor entre si nos eixos de cor analisados.

O gráfico 7d demonstra a variação de cor dos grupos analisados e a percepção de variação de cor demonstrada por ΔE , a variação abaixo de 2 é considerada imperceptível para a maior parte do público, entre 2 e 5 essa percepção é considerada ligeiramente perceptível, acima de 5 a variação de cor passa a ser considerada perceptível para maioria dos consumidores (FRACARI et al., 2024). A primeira barra demonstra a variação de cor do grupo que passou por imersão com 1000 ppm de PAA e um pulso de LP (1,91 J/cm²) resultando em um ΔE $3,83 \pm 1,71$, considerado ligeiramente perceptível. O grupo de imersão em 1400 ppm com um pulso de LP resultou em um ΔE de $4,90 \pm 0,89$ e o grupo de 2000 ppm também com um pulso apresentou um ΔE $5,39 \pm 1,89$, ambos os grupos apresentando uma variação de cor perceptível entre a maioria dos consumidores. No gráfico é possível notar uma relação entre a concentração de ácido e o valor da variação de cor das amostras, demonstrando que o aumento da concentração impacta diretamente a percepção visual da cor do peito de frango. Esse comportamento pode ser explicado pela influência do ácido na desnaturação das proteínas e oxidação lipídica do peito de frango como demonstrado por Mahamud, Nahar e Ha (2025) e pode influenciar negativamente o consumidor no momento da compra por ter a aparência diferente do produto sem tratamento, causando estranhamento.

6 CONCLUSÃO

Os resultados deste trabalho demonstram que a combinação entre tratamentos com mecanismos distintos pode representar uma estratégia eficaz para a redução de *S. Typhimurium* em peito de frango. O ácido peracético (PAA) apresentou maior capacidade de inativação quando comparado ao ácido clorídrico (HCl) evidenciando que sua maior constante de dissociação contribui a ação oxidativa de forma mais expressiva para o dano celular bacteriano. A aplicação de luz pulsada (LP), por sua vez, mostrou-se eficiente como tecnologia não térmica capaz de promover reduções microbianas relevantes, apresentando resultados mais expressivos em fluências maiores. Além disso, quando combinada com PAA, observou-se um efeito sinérgico o qual foi comprovado e quantificado e evidencia a efetividade dos métodos combinados, resultando em reduções superiores às obtidas pelos tratamentos aplicados isoladamente somados. O mesmo não ocorreu na combinação de HCl e LP.

As análises colorimétricas evidenciaram que as variações em L^* , a^* e b^* não apresentaram diferenças de cor estatisticamente relevantes entre tratamentos de imersão e aplicação de luz pulsada em relação ao grupo controle, demonstrando que os tratamentos não alteram parâmetros de cor significativamente em relação aos parâmetros iniciais. Os valores de ΔE indicaram alterações perceptíveis com variação correlacionada à concentração de ácido, acarretando diferenças visuais detectáveis que podem afetar o desempenho do método na comercialização.

Diante disso, conclui-se que o uso combinado de ácido peracético e luz pulsada surge como uma alternativa para a descontaminação de carne de peito de frango, oferecendo inativação de *S. Typhimurium* mais eficiente em comparação com tratamentos isolados, possibilitando menores concentrações e fluência afim de preservar características do produto e reduzir custos. O estudo reforça o potencial da luz pulsada como tecnologia emergente e destaca a relevância do estudo de métodos combinados. Recomenda-se que pesquisas futuras explorem tempos de pulso e imersão em diferentes matrizes alimentares, a fim de ampliar a aplicabilidade industrial desta tecnologia combinada.

7 REFERÊNCIAS

AALIYA, B. et al. Recent trends in bacterial decontamination of food products by hurdle technology: A synergistic approach using thermal and non-thermal processing techniques. *Food Research International*, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL, A. Relatório Anual. Associação Brasileira de Proteína Animal, p. 31, 2025.

BINTSIS, T., LITOPOULOU-TZANETAKI, E. and Robinson, R.K. Existing and potential applications of ultraviolet light in the food industry – a critical review. *J. Sci. Food Agric.*, 80: 637-645, 2000.

BRAR, P. S. et al. Value Addition of Milk and Meat: A Push to Entrepreneurship [E-book]. [s.l: s.n.].

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Portaria nº.210, de 10 de novembro de 1998. Brasília: Regulamento Técnico de Inspeção Tecnológica e Higiênico Sanitária de Carnes de Aves, 1998.

BRASIL. Portaria n.74, de 4 de maio de 2019. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Brasília: 2019.

BUNCIC, S.; SOFOS, J. Interventions to control Salmonella contamination during poultry, cattle and pig slaughter. *Food Research International*, v. 45, n. 2, p. 641–655, 2012.

CAO, Ruihua et al. Synergistic mechanism of combined UV-LEDs and peracetic acid treatment on inactivation of fungal spores. *Separation and Purification Technology*, [s. l.], v. 357, p. 130161, 1 maio 2025

CARLETTO, Danilo *et al.* Mode of application of peracetic acid-based disinfectants has a minimal influence on the antioxidant defences and mucosal structures of Atlantic salmon (*Salmo salar*) parr. *Frontiers in Physiology*, v. 13, 2022.

CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION (CDC). Multistate outbreak of Salmonella Mbandaka infections linked to contact with backyard poultry—United States, 2005–2006. CDC, 1 maio 2007

COBAN, Hasan Bugra. Organic acids as antimicrobial food agents: applications and microbial productions. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, [s. l.], v. 43, p. 569-591, 2020.

FRACARI, Priscila Rossato; MASSIA, Ana Guimarães; LAROQUE, Denise Adamoli; SANTOS, Bibiana Alves dos; CICHOSKI, Alexandre José; CARCIOFI, Bruno Augusto Mattar; CAMPAGNOL, Paulo Cezar Bastianello. *Pulsed light treatment effect on color, oxidative stability, and Listeria monocytogenes population of sliced mortadella*. *Foods*, v. 13, n. 18, p. 2976, 2024.

FRANCO, G. Tabela de composição química dos alimentos. São Paulo: Editora Atheneu, 9 ed., 2004

GART, E. V. et al. Salmonella typhimurium and multidirectional communication in the gut. *Frontiers in Microbiology*, v. 7, n. NOV, p. 1–18, 2016.

HUE, O. et al. Campylobacter contamination of broiler caeca and carcasses at the slaughterhouse and correlation with Salmonella contamination. *Food Microbiology*, v. 28, n. 5, p. 862–868, 2011.

KATARIA, J.; VADDU, S.; NOVOA RAMA, E.; SIDHU, G.; THIPPAREDDI, H.; SINGH, M. Evaluating the efficacy of peracetic acid on Salmonella and Campylobacter on chicken wings at various pH levels. *Poultry Science*, Champaign, v. 99, n. 10, p. 5137–5142, out. 2020.

Khan I, Tango CN, Chelliah R, Oh DH. Development of antimicrobial edible coating based on modified chitosan for the improvement of strawberries shelf life. *Food Sci Biotechnol*. 2019

KIM, J. H.; MIN, S. C. Efficacy of peracetic acid and its combination with UV-C or pulsed light for inactivation of *Escherichia coli* O157. *International Journal of Food Microbiology*, v. 361, p. 109455, 2022.

KITIS, M. Disinfection of wastewater with peracetic acid: A review. *Environment International*, v. 30, n. 1, p. 47–55, 2004.

Koivunen, J., & Heinonen-Tanski, H. (2005). Inactivation of enteric microorganisms with chemical disinfectants, UV irradiation and combined chemical/UV treatments. *Water Research*, 39(8), 1519–1526.

LEISTNER, L. Update on hurdle technology for mild and effective preservation of foods. In: RAHMAN, M. S. (Ed.). *Handbook of Food Preservation*. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2007.

LUSTOSA, Alane Gomes et al. Aspectos gerais de infecções por bactérias do gênero Salmonella, um problema de saúde pública e animal. *Research, Society and Development*. v. 10, n. 4, p. e12610413656, 2021.

LÓPEZ-ROMERO, J. C. et al. Effects and interactions of gallic acid, eugenol and temperature on thermal inactivation of Salmonella spp. in ground chicken. *Food Research International*, v. 103, n. August 2017, p. 289–294, 2018

L., P.; SORVILLO, F.; KUO, T. The Burden of Salmonellosis in the United States. [s.l: s.n.].

MAHAMUD, A. G. M. Sofi Uddin; NAHAR, Shamsun; HA, Sang-Do. Peracetic acid (PAA) exhibits higher antimicrobial efficacy compared to chlorine-based disinfectants against *Salmonella* Typhimurium on chicken skin and food-contact surfaces. *Poultry Science*, v. 104, n. 9, e105450, set. 2025.

MAHENDRAN, R. et al. Recent advances in the application of pulsed light processing for improving food safety and increasing shelf life. *Trends in Food Science and Technology*, v. 88, n. December 2018, p. 67–79, 2019

MANDAL, Ronit; MOHAMMADI, Xanyar; WIKTOR, Artur; SINGH, Anika; SINGH, Anubhav Pratap. Applications of Pulsed Light Decontamination Technology in Food Processing: An Overview. *Applied Sciences*, Basel, v. 10, n. 10, art. 3606, 2020.

MEAD, G. C. Shelf-life and spoilage of poultry meat. Woodhead Publishing Limited. 2004.

NASCIMENTO, Taís Aparecida do. Influência dos parâmetros do processo de luz pulsada e interação substrato-microrganismos na inativação de Salmonella em peito de frango. 2023.

OECD-FAO. OECD-FAO Agricultural Outlook 2021–2030. [s.l: s.n.].

OLIVO. O mundo do frango: cadeia produtiva da carne de frango. Ed. do Autor, 2006.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. Salmonella (non-typhoidal). Genebra: Organização Mundial da Saúde, 2025

ROSARIO-PÉREZ, P. J. et al. Neutral electrolyzed water in chicken breast—A preservative option in poultry industry. *Foods*, v. 12, n. 9, p. 1829, 2023.

ROTHROCK, M. J. et al. The characterization of *Salmonella enterica* serotypes isolated from the scalding tank water of a commercial poultry processing plant: Recovery of a multidrug-resistant Heidelberg strain. *Poultry Science*, v. 94, n. 3, p. 467–472, 2015.

ROWAN, N J, MACGREGOR, S. J., Anderson, J. G., FOURACRE, R. A., MCILVANEY, L., & Farish, A. O. Pulsed-Light Inactivation of Food-Related Microorganisms. *Applied and environmental microbiology*, 1312-1315, 1999.

ROWAN, Neil J. Pulsed light as an emerging technology to cause disruption for food and adjacent industries – Quo vadis? *Trends in Food Science and Technology*, 316–332, 2019.

SCHOTTROFF, Felix et al. Sublethal injury and Viable but Non-culturable (VBNC) state in microorganisms during preservation of food and biological materials by non-thermal processes. *Frontiers Media S.A.*, 2018.

SEGUNDO, Rogério Ferreira. *Salmonelose ocasionada por produtos de origem animal e suas implicações para saúde pública: revisão de literatura.* 2020.

SERVIÇO DE INSPEÇÃO E SEGURANÇA ALIMENTAR (FSIS) – USDA. FSIS Directive 7120.1: Safe and Suitable Ingredients Used in the Production of Meat, Poultry, and Egg Products. Revisão 56, 1 set. 2021. Washington, DC. 70 p.

SHEN, C. et al. Dynamic effects of free chlorine concentration, organic load, and exposure time on the inactivation of *Salmonella*, *Escherichia coli* O157:H7, and Non-O157 shiga toxin-producing *E. coli*. *Journal of Food Protection*, v. 76, n. 3, p. 386–393, 2013.

SHIMOKOMAKI, M.; OLIVO, R. *Carnes PSE em frangos. Atualidades em Ciência e Tecnologia de Carnes*, ed. Varela, São Paulo, p. 95-104, 2006.

TORQUATO, Daniela ; BUOSI, Mengarda. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA CENTRO TECNOLÓGICO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS. [2021]

UESUGI, Aaron R; HSU, Lillian ; MORARU, Carmen I. Effect of Pulsed Light Treatments on the Growth and Resistance Behavior of *Listeria monocytogenes* 10403S, *Listeria innocua*, and *Escherichia coli* ATCC 25922 in a Liquid Substrate. *Journal of Food Protection*, v. 76, n. 3, p. 435–439, 2013.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA, Food Safety and Inspection Service (FSIS). Triple T Specialty Meats, Inc. recalls chicken salad products due to possible *Salmonella* contamination. Washington, DC, 21 fev. 2018

U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Economic Research Service. *Poultry & Eggs: Sector at a Glance*. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, 2 jul. 2024.

U.S. FOOD AND DRUG ADMINISTRATION. *Get the Facts About Salmonella*. Silver Spring, MD: U.S. Food and Drug Administration, 25 jun. 2024.

VAN IMPE, J. et al. *State of the art of nonthermal and thermal processing for inactivation of microorganisms*. Blackwell Publishing Ltd, 2018.

VENTURINI, Katiani Silva; SARCINELLI, Miryelle Freire; SILVA, LC da. Características da carne de frango. *Boletim Técnico-Pie-Ufes*, v. 1307, 2007.

WIBISONO, F. M. et al. A review of salmonellosis on poultry farms: Public health importance. *Systematic Reviews in Pharmacy*, v. 11, n. 9, p. 481–486, 2020.

Yang, R., Jang, H., Stocker, R., Gleason, K. K., Yang, R., Gleason, K. K., Jang, H., & Stocker Ralph Parsons Laboratory, R. M. (2014). Synergistic Prevention of Biofouling in Seawater Desalination by Zwitterionic Surfaces and Low-Level Chlorination. *Advanced Materials*, 26(11), 1711–1718.

Zhang, T., Wang, T., Mejia-Tickner, B., Kissel, J., Xie, X., & Huang, C. H. (2020). Inactivation of Bacteria by Peracetic Acid Combined with Ultraviolet Irradiation: Mechanism and Optimization. *Environmental Science and Technology*, 54(15), 9652–9661.