

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

DISSERTAÇÃO

**RESÍDUOS GRAXOS DA COCÇÃO DE HAMBÚRGUERES: EFEITOS DO
PREPARO E IMPLICAÇÕES NO RISCO DE INCÊNDIO EM COZINHAS
PROFISSIONAIS**

ALINE DE SOUZA ZAMARREÑO HERNANDEZ

Seropédica, RJ

Setembro, 2025



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**RESÍDUOS GRAXOS DA COCÇÃO DE HAMBÚRGUERES: EFEITOS DO
PREPARO E IMPLICAÇÕES NO RISCO DE INCÊNDIO EM COZINHAS
PROFISSIONAIS**

ALINE DE SOUZA ZAMARREÑO HERNANDEZ

Sob orientação do Professora Dra.

Renata Nunes Oliveira

Sob coorientação do Professor Dra

Maria Ivone Martins Jacintho Barbosa

Dissertação submetida como requisito parcial
para obtenção do grau de **Mestre em
Engenharia Química** no Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Química, na área
de concentração em Tecnologia Química.

Seropédica, RJ
Setembro, 2025

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

H557r Hernandez, Aline de Souza Zamarreño , 1995-
Resíduos graxos da cocção de hamburgueres: efeitos
do preparo e implicações no risco de incêndio em
cozinhas profissionais / Aline de Souza Zamarreño
Hernandez. - Rio de Janeiro, 2025.
81 f.

Orientador: Renata Nunes Oliveira.
Coorientador: Maria Ivone Martins Jacintho Barbosa.
Dissertação(Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, PPGEQ, 2025.

1. cozinhas industriais. 2. inflamabilidade. 3.
risco de incêndio. 4. cocção. 5. resíduos graxos. I.
Oliveira, Renata Nunes, 1984-, orient. II. Barbosa,
Maria Ivone Martins Jacintho, 1977-, coorient. III
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. PPGEQ.
IV. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

ALINE DE SOUZA ZAMARREÑO HERNANDEZ

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, área de concentração em Tecnologia Química

APROVADA em 09 de setembro de 2025.

Renata Nunes Oliveira
Orientadora

Antonieta Middea, D.Sc. – CETEM

Ormindo Domingues Gamallo, D.Sc. – DTA/UFRRJ

Luís Américo Calçada, D.Sc. – DEQ/IT/UFRRJ



HOMOLOGAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 57/2025 - PPGEQ (12.28.01.00.00.00.42)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 04/11/2025 14:40)

LUIS AMERICO CALCADA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DEQ (12.28.01.00.00.00.00.45)
Matricula: ###816#9

(Assinado digitalmente em 04/11/2025 11:28)

ORMINDO DOMINGUES GAMALLO
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DTA (12.28.01.00.00.00.00.46)
Matricula: ###808#5

(Assinado digitalmente em 03/11/2025 08:39)

RENATA NUNES OLIVEIRA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DEQ (12.28.01.00.00.00.00.45)
Matricula: ###987#0

(Assinado digitalmente em 04/11/2025 09:37)

ANTONIETA MIDDEA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.317-##

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrj.br/documentos/> informando seu número: 57, ano: 2025, tipo: **HOMOLOGAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**, data de emissão: 03/11/2025 e o código de verificação: **bcc0f73ef1**

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, aos meus pais, David Hernandez e Marli Hernandez, pelo amor incondicional, pelo apoio em todos os momentos e por acreditarem sempre em mim. Ao meu namorado, Caio Souza, com quem escolhi compartilhar a vida, que mesmo à distância esteve presente, me incentivando, fazendo gráficos e fortalecendo minha caminhada, me fazendo acreditar na importância e no valor desta conquista.

Ao meu cachorro, Thor, pela companhia, por ser um refúgio nos momentos de estresse e por transformar as adversidades em instantes de leveza, mostrando que seus beijinhos têm o poder de resolver qualquer problema. À minha irmã, Anne e ao Oliver, pelo incentivo constante e por acreditarem sempre em mim.

Sou profundamente grata a Ricardo Machado e Anderson Prado, cuja ajuda com as amostras foi essencial para a realização deste trabalho. Sem a contribuição de vocês nada disso teria sido possível, e desejo que alcancem todo o sucesso profissional que merecem.

À minha avó, Zélia Brito, e aos meus tios, Marilza Brito e Francisco Januário, pela acolhida carinhosa, pela hospedagem e pelas refeições sempre preparadas com tanto cuidado, que tornaram mais leves as longas jornadas e me deram conforto nos momentos de maior cansaço.

Aos meus amigos da Turma B, pela amizade e companheirismo que transformaram os dias em experiências mais leves e alegres, deixo meu sincero agradecimento. Ao Rafael Leite, parceiro de trajetória e de objetivos, que mesmo diante das adversidades seguiu firme ao meu lado, sempre com palavras de incentivo e motivação.

À minha orientadora, professora Renata Nunes, pela paciência, dedicação e confiança, fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa. Ao professor Luis Américo Calçada, por acreditar no projeto desde o início e possibilitar que ele se tornasse realidade. E ao professor Ormino Gamallo, do Departamento de Alimentos, cuja presença foi uma descoberta valiosa, que trouxe clareza ao projeto e permitiu conectar pontos que antes pareciam dispersos em minha mente.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PPGEQ) pela oportunidade de aprendizado e pela infraestrutura,. Em especial, à secretária Renata, pelo auxílio prestado em inúmeros momentos e pela paciência e atenção.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Inovação em Alimentos (POGCTA), pela oportunidade de desenvolvimento científico, pelas contribuições acadêmicas, pelo laboratório e pelo ambiente de troca de conhecimentos que enriqueceram este estudo.

À Central Analítica Multiusuário do Programa de Pós-Graduação em Química (CAM/UFRRJ), laboratório multiusuário e interdisciplinar localizado no Instituto de Química da UFRRJ, pela disponibilização da infraestrutura e dos equipamentos fundamentais à realização das análises.

Ao Centro de Tecnologia Mineral (CETEM/UFRJ), pela infraestrutura laboratorial e pelo suporte técnico, que contribuíram de forma essencial para a consolidação desta pesquisa.

À FTR Inspeções, à OLZ Engetech e aos meus sócios, dedico minha vida profissional. Foram nessas empresas que me construí como a profissional que sou hoje, aprendendo o valor da responsabilidade, do comprometimento e da busca constante pela excelência. Cada etapa desta pesquisa reflete também o desejo de evoluir e adquirir conhecimento para ser sempre a melhor versão de mim mesma, agregando mais valor, inovação e resultados às empresas que tanto me inspiram.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta dissertação. Cada gesto de apoio, incentivo e colaboração fez diferença nesta caminhada, e a todos deixo registrada minha profunda e eterna gratidão.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. *"This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001".*

RESUMO

HERNANDEZ, Aline de Souza Zamarreño. **Resíduos graxos da cocção de hambúrgueres: efeitos do preparo e implicações no risco de incêndio em cozinhas profissionais. 2025.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Instituto de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2025.

Resíduos graxos acumulados em sistemas de exaustão de cozinhas industriais representam um fator relevante de risco de incêndio, visto que podem atingir condições de ignição mesmo durante o funcionamento regular dos equipamentos de cocção. Apesar da importância do tema, ainda são limitadas as pesquisas que relacionam diretamente os processos de preparo de alimentos com a formação e o comportamento desses depósitos. Neste trabalho, foi realizada a avaliação da fração graxa presente em resíduos coletados em cozinhas destinadas à produção de hambúrgueres, considerando diferentes métodos de cocção empregados em estabelecimentos do setor. O objetivo foi compreender de que maneira as condições de preparo influenciam a degradação lipídica e, consequentemente, a inflamabilidade do material depositado nos dutos de exaustão. Para isso, utilizaram-se diferentes técnicas analíticas, que possibilitaram tanto a identificação de constituintes graxos quanto a observação do comportamento térmico dos resíduos. Os resultados indicaram que o tipo de equipamento empregado no preparo exerce influência direta sobre as transformações químicas dos lipídios, resultando em depósitos com distintos limites de ignição. Esses achados ressaltam a importância de considerar as práticas de cocção como variável determinante na análise do risco de incêndio em cozinhas industriais, além de fornecer subsídios técnicos que podem orientar ações de prevenção, limpeza e manutenção dos sistemas de exaustão, contribuindo para a segurança em ambientes de alimentação coletiva.

Palavras-chave: resíduos graxos; cozinhas industriais; risco de incêndio; cocção; inflamabilidade.

ABSTRACT

HERNANDEZ, Aline de Souza Zamarreño. **Grease residues from hamburger cooking: effects of preparation and implications for fire risk in professional kitchens.** 2025. Dissertation (Master in Chemical Engineering). Institute of Technology. Department of Chemical Engineering, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2025.

Grease residues accumulated in industrial kitchen exhaust systems represent a relevant fire risk factor, as they can reach ignition conditions even during the regular operation of cooking equipment. Despite the importance of the subject, research directly relating food preparation processes to the formation and behavior of these deposits is still limited. In this study, the fatty fraction present in residues collected in kitchens dedicated to hamburger production was evaluated, considering different cooking methods employed in commercial establishments. The objective was to understand how cooking conditions influence lipid degradation and, consequently, the flammability of the material deposited in exhaust ducts. Different analytical techniques were used, enabling both the identification of fatty constituents and the observation of the thermal behavior of the residues. The results indicated that the type of equipment used in cooking directly influences the chemical transformations of lipids, resulting in deposits with distinct ignition limits. These findings emphasize the importance of considering cooking practices as a determining variable in the analysis of fire risk in industrial kitchens, in addition to providing technical support that may guide prevention, cleaning, and maintenance actions in exhaust systems, contributing to safety in collective food service environments.

Keywords: grease residues; industrial kitchens; fire risk; cooking; flammability.

LISTA DE FIGURA

Figura 1 – Interiores de cozinhas do século XVI.....	5
Figura 2 – Sistema de exaustão de cozinha	14
Figura 3 – Esquema de um sistema de exaustão	15
Figura 4 – Estrutura molecular do ácido cáprico (C10:0)	24
Figura 5 – Estrutura molecular do ácido láurico (C12:0).....	24
Figura 6 – Estrutura molecular do ácido mirístico (C14:0).....	25
Figura 7 - Estrutura molecular do ácido palmítico (C16:0)	25
Figura 8 – Estrutura molecular do ácido palmitoleico (C16:1).....	26
Figura 9 – Estrutura molecular do ácido esteárico (C18:0)	26
Figura 10 – Estrutura molecular do ácido oleico (C18:1c)	27
Figura 11 – Estrutura molecular do ácido eláidico (C18:1t)	27
Figura 12 – Estrutura molecular do ácido linoleico (C18:2).....	28
Figura 13 – Acúmulo de gordura em diferentes dutos de exaustão em cozinhas reais.....	29
Figura 14 – Representação de um sistema de exaustão de cozinha durante um incêndio	33
Figura 15 – Aspecto visual das amostras provenientes da chapa metálica	40
Figura 16 – Aspecto visual das amostras provenientes do charbroiler.....	41
Figura 17 – Espectro de FTIR proveniente da cocção por chapa metálica.....	42
Figura 18 – Espectro de FTIR proveniente da cocção por charbroiler.....	43
Figura 19 – Perfil lipídico do hambúrguer cru e do resíduo da chapa metálica e do charbroiler	44
Figura 20 – Difração de Raios X (a) chapa metálica (b) <i>charbroiler</i>	49
Figura 21 – Imagens MEV da amostra de resíduo proveniente de loja com produção charbroiler	51
Figura 22 – Imagens MEV da amostra de resíduo proveniente de loja com chapa metálica....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Perfil de ácidos graxos em hambúrgueres bovinos	23
Tabela 2 - Cromatografia gasosa hambúrguer cru	46
Tabela 3 – Cromatografia gasosa resíduo	47
Tabela 4 – Resultados do ensaio de saponificação para resíduos em diferentes equipamentos	52
Tabela 5 – Faixas de temperatura de ignição observadas nos ensaios térmicos	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ACGIH	<i>American Conference of Governmental Industrial Hygienists.</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.</i>
ATR	Refletância Total Atenuada (modo FTIR).
BRE	<i>Building Research Institution</i> (Instituto de Pesquisa em Construção).
CG	Cromatografia Gasosa.
VOCs	Compostos Orgânicos Voláteis.
DRX	Difração de Raios X.
FOG	Gordura, Óleo e Graxa (<i>Fats, Oils and Grease</i>).
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier.
HVAC	Sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado (<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i>).
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura.
NFPA	<i>National Fire Protection Association.</i>
PAHs	Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos.
PM	Material Particulado (<i>Particulate Matter</i>).
PM_{2,5}	Partículas com diâmetro aerodinâmico $\leq 2,5 \mu\text{m}$.
PM₁₀	Partículas com diâmetro aerodinâmico $\leq 10 \mu\text{m}$.
SOAs	Aerossóis Orgânicos Secundários.
UV	Ultravioleta.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa	2
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo Geral	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Histórico das Cozinhas Industriais	4
2.2 Evolução da Cocção	7
2.2.1 Impactos Físicos e Químicos da Cocção	8
2.2.2 Transformações Térmicas	9
2.2.3 Emissão de Partículas De Cozinha: PM _{2,5} E PM ₁₀	10
2.2.4 Impacto da Temperatura na Emissão de Partículas	11
2.2.5 Estilos de Culinária e Suas Emissões	12
2.3 Sistema de Exaustão	13
2.3.1 Captadores	15
2.3.2 Rede de Dutos	16
2.3.3 Extratores de Gordura	17
2.3.3.1 Filtro Eletrostático	17
2.3.3.2 Lavador de Gases	18
2.3.3.3 Coifas Lavadoras e Coifas Ultravioleta	20
2.3.4 Ventiladores	20
2.4 Perfil de Ácidos Graxos de Hambúrgueres Bovinos	22
2.5 Degradação Térmica de Resíduos Graxos e Formação de Depósitos em Sistema de Exaustão	28
2.6 Técnicas Analíticas Aplicadas à Avaliação de Resíduos Graxos	29
2.7 Propriedades Térmicas e Riscos de Inflamabilidade Associados a Resíduos Graxos	30
2.8 Riscos do Acúmulo de Gordura, Óleo e Graxa em Sistema de Exaustão de Cozinhas	31
3. METODOLOGIA	35
3.1 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)	36
3.2 Análise por Cromatografia Gasosa	36
3.3 Ensaio de Saponificação	37
3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	37
3.5 Difração de Raios X	37

3.6. Ensaio de Inflamabilidade com Simulador de Duto.....	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1 Análise por FTIR - Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier	41
4.2 Cromatografia Gasosa	44
4.3 Difração de Raios X	49
4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	50
4.5 Ensaio de Saponificação.....	52
4.6 Teste de Inflamabilidade	53
5. CONCLUSÃO.....	56
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1 INTRODUÇÃO

O setor de alimentação fora do lar tem apresentado crescimento expressivo nas últimas décadas, acompanhado pela expansão e modernização das cozinhas profissionais. Esses ambientes tornaram-se cada vez mais automatizados e especializados, visando atender à elevada demanda por refeições rápidas e de custo acessível. Nesse contexto, métodos de cocção a altas temperaturas, como a chapa metálica e o *charbroiler*, são amplamente empregados na preparação de hambúrgueres, assegurando agilidade e reprodutibilidade nos processos.

Entretanto, tais métodos também estão associados à liberação de vapores, aerossóis e partículas finas, que ao atingirem os sistemas de exaustão condensam-se e formam depósitos graxos aderidos aos dutos. Esse acúmulo compromete a eficiência operacional, aumenta custos de manutenção e, sobretudo, constitui um risco relevante de incêndio, já que os resíduos podem atuar como combustível em situações críticas. Apesar da importância prática do tema, a maior parte dos estudos concentra-se nos impactos das emissões sobre a qualidade do ar e a saúde ocupacional, com menor atenção aos resíduos sólidos que permanecem nos sistemas de exaustão.

Além disso, a composição e o comportamento térmico desses materiais ainda são pouco compreendidos, especialmente quando se consideram diferentes métodos de cocção. Processos como o uso de chapa metálica e *charbroiler*, embora semelhantes em finalidade, operam sob regimes distintos de transferência de calor e podem gerar resíduos com características químicas e de inflamabilidade diferentes.

Nesse cenário, este trabalho busca avançar na compreensão da formação e do comportamento de resíduos graxos depositados em dutos de exaustão de cozinhas profissionais. Para isso, adotou-se uma abordagem experimental baseada em diferentes técnicas de caracterização, incluindo espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), cromatografia gasosa (CG), difração de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e determinação do índice de saponificação, além da realização de ensaios térmicos em simulador de duto. Os resultados mostraram que os resíduos oriundos da chapa metálica apresentam maior preservação de lipídios e temperaturas de ignição mais elevadas, enquanto aqueles formados no *charbroiler* evidenciam maior degradação dos ácidos graxos e menor estabilidade térmica. Dessa forma, a pesquisa contribui para o avanço do conhecimento sobre os riscos de

inflamabilidade associados a diferentes processos de cocção, oferecendo subsídios técnicos para a prevenção de acidentes em cozinhas industriais.

1.1 Justificativa

Os incêndios em cozinhas profissionais continuam a representar um desafio recorrente na segurança de empreendimentos comerciais. Dados da *National Fire Protection Association* (NFPA) apontam que, nos Estados Unidos, ocorrem anualmente cerca de 5.900 incêndios em estabelecimentos de alimentação, resultando em mais de 170 milhões de dólares em prejuízos, além de dezenas de feridos a cada ano. A maioria desses eventos tem início em equipamentos de cocção, especialmente em locais onde há acúmulo de resíduos graxos não removidos com frequência adequada.

No Reino Unido, um levantamento realizado pela *Building Research Establishment* (BRE) e pelos bombeiros de Londres revelou que cerca de 80% dos incêndios urbanos em cozinhas comerciais têm origem nos sistemas de cocção, sendo o acúmulo de gordura nos dutos a segunda causa mais frequente de propagação do fogo, ficando atrás apenas de falhas nos equipamentos de cocção.

Esses resíduos se formam a partir da condensação de vapores e partículas liberadas durante o preparo de alimentos ricos em gordura, especialmente em processos que envolvem temperaturas elevadas. Quando acumulados em superfícies metálicas, filtros ou paredes internas de dutos, esses materiais podem atuar como combustível altamente energético, favorecendo a propagação do fogo.

Apesar da relevância prática do tema, são escassos os estudos que abordam a composição e o comportamento térmico desses resíduos, o mais comum são as regulamentações técnicas existentes que se limitam a recomendar periodicidade de limpeza, sem avaliar a natureza do material acumulado. Soma-se a isso o fato de que o comportamento dos resíduos varia conforme o tipo de alimento, o equipamento utilizado e as condições térmicas envolvidas. Métodos como o *charbroiler* e a chapa metálica, comuns na produção de hambúrgueres em estabelecimentos comerciais, operam sob diferentes regimes de aquecimento e provocam emissões com características distintas.

Essas diferenças reforçam a necessidade de estudos comparativos que analisem como cada método de cocção influencia na formação dos resíduos e em seu comportamento frente ao calor. A realização de análises em amostras coletadas em ambientes reais, aliadas a ensaios

laboratoriais, pode fornecer subsídios importantes para o desenvolvimento de estratégias preventivas baseadas em evidências.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Investigar a formação e as propriedades físico-químicas de resíduos graxos gerados por diferentes métodos de cocção na produção de hambúrgueres, com base em análises comparativas do perfil lipídico e na avaliação dos materiais formados.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Comparar a composição lipídica dos resíduos graxos provenientes de cocção por chapa metálica e *charbroiler*;
- Comparar o perfil lipídico de hambúrgueres crus e dos resíduos gerados após cocção, por meio de cromatografia gasosa (CG);
- Investigar as propriedades químicas, estruturais e morfológicas dos resíduos por meio das técnicas de FTIR, DRX e MEV;
- Estimar a fração graxa presente nos resíduos;
- Avaliar o comportamento dos resíduos sob diferentes cenários de ignição, utilizando um simulador térmico de duto;
- Discutir a relação entre os resultados obtidos e os fatores que influenciam o risco de inflamabilidade em sistemas de exaustão de cozinhas comerciais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Histórico das Cozinhas Industriais

A história das cozinhas industriais reflete as transformações socioeconômicas e culturais ao longo dos séculos (COLLAÇO, 2004): desde o domínio do fogo, há cerca de 1,8 a 2,3 milhões de anos, quando se possibilitou a transição de uma dieta baseada em alimentos crus para a preparação de refeições cozidas, até as modernas e sofisticadas cozinhas industriais (LI; KOSONEN, 2020). Esse progresso significativo foi impulsionado por diversos fatores, como necessidades militares, mudanças na estrutura social, avanços tecnológicos e alterações nos hábitos alimentares (COLLAÇO, 2004).

As primeiras cozinhas industriais surgiram na Roma Antiga, destinadas a fornecer alimentação em larga escala para soldados e cidadãos necessitados. Nessas cozinhas, a eficiência e a capacidade de produzir grandes quantidades de comida eram fundamentais. Elas foram projetadas para maximizar a utilização de recursos limitados e para garantir a alimentação de grandes contingentes de pessoas (SMITH, 2004).

Durante a Idade Média, mosteiros e castelos desenvolveram cozinhas complexas para preparar banquetes e refeições para grandes grupos. Essas cozinhas eram equipadas com grandes lareiras, caldeirões e outras ferramentas culinárias que permitiam a produção de alimentos em grande escala. Os mosteiros, em particular, tornaram-se centros de inovação culinária, onde monges experimentavam novas técnicas de preparo de alimentos e armazenamento (COLLAÇO, 2004). As cozinhas medievais, embora caóticas e sujas, foram os primeiros espaços a organizar de forma funcional o serviço de alimentação em larga escala. No decorrer do tempo, essas cozinhas sofreram uma revolução, deixando de ser uma simples reunião ao redor do fogo para grandes banquetes.

No século XVI, as cozinhas passaram a ser projetadas com maior atenção à segurança e ao espaço, sendo construídas em áreas afastadas das salas de jantar ou em anexos separados, devido ao risco de incêndios (WOOLGAR, 2016). Esses ambientes eram geralmente amplos, com lareiras de grande porte, fornos de alvenaria e caldeirões suspensos, elementos que refletiam tanto a funcionalidade quanto a centralidade da cozinha na vida doméstica, conforme Figura 1 (MONTANARI, 2013).



Figura 1 – Interiores de cozinhas do século XVI. (a) Pieter Brueghel; (b) Marten van Cleve.

Fonte: Kunsthistorisches Museum (2024); Skokloster (2024).

Com a Revolução Industrial, a urbanização e o surgimento das fábricas aumentaram a demanda por cozinhas industriais para que fosse possível alimentar os trabalhadores em massa. A urbanização trouxe um aumento na população das cidades, que necessitavam de soluções eficientes para alimentação. As cozinhas industriais começaram a se expandir em resposta a essa demanda (COWAN, 1983). No Brasil, a economia passou por uma grande transformação a partir da década de 1930, passando de um foco em atividades agrícolas para um processo de industrialização (FONSECA, 2016). Esse movimento redesenhou os espaços geográficos, promovendo o êxodo rural e o crescimento das áreas urbanas. Com isso, novas demandas por serviços surgiram, incluindo a alimentação coletiva. A década de 1940 trouxe o início da estruturação da produção de alimentos para coletividades, especialmente no setor de saúde, com a criação das primeiras cozinhas industriais em hospitais (PROENÇA, 1996).

A Segunda Guerra Mundial desempenhou um papel crucial no desenvolvimento das cozinhas industriais. A necessidade de alimentar grandes exércitos e populações deslocadas levou ao desenvolvimento de novas técnicas de produção e armazenamento de alimentos, impactando significativamente a indústria alimentícia (HOROWITZ, 2006). Houve também a restrição da importação de equipamentos estrangeiros, o que impulsionou o desenvolvimento de equipamentos nacionais para cozinhas industriais. Isso levou a uma maior autossuficiência e inovação dentro do setor (PROENÇA, 1996).

Em 1976, para combater os problemas relacionados à má qualidade da alimentação, foi implementado o Programa de Alimentação do Trabalhador (PAT), que transferiu às empresas

a responsabilidade pela alimentação de seus funcionários. Essa medida visava melhorar tanto a disponibilidade para o trabalho quanto o estado nutricional dos trabalhadores. Inicialmente, as empresas instaladas fora dos centros urbanos adotaram o uso das marmitas, muitas vezes com sobras das refeições anteriores. Estudos da Organização Internacional do Trabalho (OIT) e da Organização Mundial da Saúde (OMS) indicaram que um aumento de 1,0% na ingestão calórica dos trabalhadores resultava em um aumento de produtividade de 2,3%. Em resposta, as empresas começaram a instalar grandes cozinhas industriais nos locais de trabalho, porém fora do prédio principal, para garantir a produção das refeições de forma segura (ROCHA, 2007).

Nos anos 1980, com a expansão dos shopping centers, as praças de alimentação começaram a ganhar destaque, oferecendo uma grande variedade de opções gastronômicas em um único local. Durante as décadas seguintes, esses espaços evoluíram para centros de entretenimento, atraindo consumidores pela combinação de opções de comida e lazer (RODRIGUES, 2006). O acesso a mais informações fez com que os consumidores passassem a exigir novidades e personalização, desejando ser tratados de forma única e ter suas necessidades atendidas. As empresas, portanto, aperfeiçoaram suas habilidades de ouvir os clientes e focaram cada vez mais no atendimento ao cliente, proporcionando maior variedade de escolhas (PINE, 1999).

Durante os anos 2000, as cozinhas industriais enfrentaram desafios e inovações significativas, com uma crescente preocupação com a sustentabilidade, o que levou à adoção de práticas mais ecológicas, como a redução do consumo de energia e a minimização do desperdício alimentar (HOROWITZ, 2006). A pandemia de COVID-19, iniciada em 2020, trouxe desafios inéditos, exigindo uma reavaliação rigorosa das práticas de segurança alimentar e promovendo uma maior dependência de tecnologias digitais e automação para minimizar a intervenção humana e reduzir o risco de contaminação (FOOD STANDARDS AGENCY, 2020; NGUYEN et al., 2021; FERNANDES et al., 2021). As tendências atuais indicam que a sustentabilidade e a flexibilidade dos equipamentos são agora prioridades nas cozinhas comerciais. Equipamentos multifuncionais, que possuem diversas funções, têm ganhado destaque, refletindo a necessidade de otimizar espaço e reduzir o consumo de energia (NKBA, 2023).

A busca contínua por eficiência, segurança e qualidade na preparação dos alimentos impulsiona a constante inovação nas cozinhas industriais, embora também traga desafios, como o aumento de incidentes de incêndio devido à aceleração dos serviços (DESATNICK, 1995). Assim, as cozinhas industriais continuam a evoluir, incorporando tecnologias avançadas para

otimizar a produção e garantir elevados padrões de higiene e segurança alimentar, que se tornaram ainda mais críticos no cenário pós-pandemia (TECHNAVIO, 2020; WORLD ECONOMIC FORUM, 2021).

2.2 Evolução da Cocção

Os processos de cocção passaram por uma evolução significativa ao longo dos séculos, refletindo avanços tecnológicos e mudanças nos hábitos alimentares. Desde os métodos rudimentares de assar sobre o fogo direto até o desenvolvimento de técnicas mais sofisticadas. A evolução dos métodos de cocção foi guiada pela necessidade de eficiência e melhoria na qualidade dos alimentos preparados (COLLAÇO, 2004).

Inicialmente, o fogo era o principal meio de cocção, com técnicas simples como assar e grelhar sendo amplamente utilizadas. Com o tempo, a introdução de utensílios de cozinha como panelas e caldeirões permitiu a adoção de métodos como fervura e cozimento a vapor, que preservavam melhor os nutrientes dos alimentos. A Revolução Industrial trouxe consigo a introdução de fogões a gás e elétricos, facilitando o controle de temperatura e permitindo cada vez mais a diversificação das técnicas culinárias (TOMAN, 2010).

A industrialização não só transformou os equipamentos de cozinha, mas também os processos culinários. Técnicas como a fritura profunda e o uso de fornos combinados, que combinam vapor e calor seco, foram desenvolvidas para atender à demanda por alimentos rápidos e de alta qualidade. A automatização e a introdução de equipamentos modernos, como processadores de alimentos e linhas de produção automatizadas, permitiram a produção em massa de refeições, mantendo critérios de excelência (PROENÇA, 1996). A evolução dos processos de cocção também abriu caminho para uma melhor compreensão das reações que envolvem a preparação de alimentos, proporcionando uma base científica para o desenvolvimento de novas técnicas, equipamentos e segurança (ROCHA, 2007).

Entre os avanços mais recentes, destacam-se os fornos combinados, que integram calor seco e vapor, oferecendo maior versatilidade e eficiência na cocção de alimentos, com a capacidade de realizar várias funções, como assar, grelhar e cozinhar a vapor simultaneamente (MODERN RESTAURANT MANAGEMENT, 2022). Airfryers, que utilizam a tecnologia de circulação de ar quente para cozinhar os alimentos com pouca ou nenhuma gordura, também se popularizaram, permitindo uma cocção mais saudável e rápida (NKBA, 2023). Além disso, os

charbroilers, que proporcionam uma cocção com alta temperatura e marcas de grelha semelhantes às de um churrasco, continuam a ser fundamentais em cozinhas comerciais para preparar carnes e vegetais com rapidez e sabor característico (TECHNAVIO, 2020). No entanto, essa transformação culinária vai além da simples modificação dos alimentos. Ela desencadeia uma série de eventos físicos e químicos na cozinha, incluindo a formação de plumas térmicas e aerossóis (BELITZ, 2009).

2.2.1 Impactos Físicos e Químicos da Cocção

Acima de fogões, fornos e outros aparelhos que geram calor, forma-se uma coluna ascendente de ar quente chamada pluma térmica. Impulsionada pela diferença de densidade entre o ar quente e frio, essa corrente vertical transporta calor para o ambiente, influenciando a temperatura e a qualidade do ar na cozinha (YANG et al., 2009). O calor da cocção também vaporiza a água presente nos alimentos, liberando-a na forma de vapor. Esse vapor, juntamente com outros compostos voláteis, como óleos e fumaça, se condensa em minúsculas partículas, formando aerossóis (CHENG et al., 2005).

A cocção, a pluma térmica e os aerossóis interagem. A pluma térmica dispersa os aerossóis, que, por sua vez, podem influenciar o fluxo de ar e a distribuição de calor na cozinha, com importantes implicações para a qualidade do ar e a eficiência da ventilação (MUKHOPADHYAY et al., 2016). A composição dos aerossóis de cozimento é ainda mais intrincada do que se pensava, contendo centenas de componentes químicos, incluindo compostos orgânicos voláteis e aerossóis orgânicos secundários, que se formam durante os processos de combustão e degradação térmica dos alimentos. Além disso, elementos inorgânicos, como sódio, potássio, cloro e magnésio, oriundos dos ingredientes e da água utilizada no cozimento, também estão presentes nos Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs) (WALLACE et al., 2004; ABDULLAHI et al., 2013; ZHAO et al., 2019). Componentes como ácidos graxos e outros compostos orgânicos podem persistir no ambiente por períodos prolongados, contribuindo para a poluição do ar tanto interna quanto externamente (NGUYEN et al., 2021; FERNANDES et al., 2021).

Os Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos (PAHs) são compostos orgânicos que contêm dois ou mais anéis de benzeno. Eles representam uma pequena parte das partículas do cozimento e suas proporções na matéria orgânica quantificada não excedem 2,07% (SCHAUER et al., 2002; ZHAO et al., 2007). Durante o cozimento, os PAHs são derivados da combustão

incompleta ou da pirólise de ácidos graxos insaturados em altas temperaturas (DANY et al., 2009; TFOUNI et al., 2009; CHEN et al., 2019). A interação dos PAHs com outros poluentes em ambientes urbanos pode agravar problemas de qualidade do ar, aumentando os riscos de saúde associados a essas partículas (ZHAO et al., 2021).

Os Compostos Carbonílicos têm como principal fonte a combustão incompleta de materiais compostos à base de carbono. Nas atividades culinárias, tanto a combustão do combustível quanto o aquecimento do óleo de cozinha produzem compostos carbonílicos. Formaldeído (gasoso), acetaldeído, acroleína e aldeído pelargônico são os compostos carbonílicos mais comuns produzidos durante o cozimento (SCHAUER et al., 2002; KATRAGADDA et al., 2010). Recentemente, novas técnicas de detecção e mitigação foram desenvolvidas para monitorar esses compostos em tempo real, permitindo uma melhor gestão dos riscos à saúde associados à exposição prolongada (WANG et al., 2023).

Os ácidos graxos são considerados o principal componente das partículas de cozimento, com estudos anteriores mostrando que a proporção de ácidos graxos em produtos orgânicos quantificados varia de 73,4% a 95,7%. Durante o cozimento, os glicerídeos liberam ácidos graxos livres por hidrólise e oxidação térmica (ROGGE et al., 1991). Esses ácidos graxos liberados participam do processo de formação de aerossóis e na contribuição para a poluição atmosférica (NGUYEN et al., 2021).

Os ácidos dicarboxílicos provêm da decomposição oxidativa de dialdeídos durante a auto-oxidação de gorduras insaturadas (SCHAUER et al., 1999). Em geral, a concentração de ácido dicarboxílico produzido durante o cozimento é uma a duas ordens de grandeza inferior à concentração de ácidos graxos (HE et al., 2004; PEI et al., 2016). A presença desses ácidos pode estar associada a reações químicas secundárias, que ocorrem durante a evolução dos aerossóis na atmosfera (YUAN et al., 2022).

Os n-alcanos representam apenas uma pequena fração das partículas do cozimento. De acordo com estudos anteriores, a proporção de n-alcanos em produtos orgânicos quantificados varia de 0,32% a 5,97%, esses compostos, embora presentes em menor quantidade, desempenham um papel importante na química atmosférica associada aos aerossóis de cozimento (ROGGE et al., 1991; OROS et al., 2001; ZHAO et al., 2015).

2.2.2 Transformações Térmicas

Os resíduos de gordura acumulados nos sistemas de exaustão de cozinhas comerciais passam por intensos processos químicos devido à exposição contínua ao calor e ao oxigênio.

Essa condição altera sua composição original e aumenta progressivamente o potencial tóxico, corrosivo e inflamável do material (EPA, 2007; NSW EPA, 2007; ZHANG et al., 2021). Constituídos principalmente por triglicerídeos, ácidos graxos livres, aerossóis e fragmentos de alimentos vaporizados, esses resíduos se condensam nas superfícies internas dos dutos, formando uma camada aderente e viscosa (CHEN et al., 2018).

Entre 100 °C e 200 °C ocorre a oxidação lipídica, processo no qual a quebra térmica das cadeias graxas gera radicais livres que reagem com o oxigênio, originando peróxidos lipídicos. Esses compostos são instáveis e se decompõem em aldeídos, como formaldeído e acroleína, além de cetonas, álcoois e outros subprodutos voláteis (EPA, 2012; ZHANG et al., 2021; MUDIE; VAHDATI, 2017).

Em temperaturas superiores a 250 °C, especialmente em regiões próximas a superfícies aquecidas, instala-se o processo de pirólise. Nessa fase, a decomposição térmica da gordura ocorre sem combustão direta, resultando na formação de fuligem graxa e partículas finas ricas em carbono, acompanhadas de PAHs. A película formada nesse estágio é escura, espessa e altamente inflamável, podendo atingir condições de ignição espontânea mesmo na ausência de chama externa (NSW EPA, 2007; ZHANG et al., 2021).

2.2.3 Emissão de Partículas de Cozinha: PM_{2,5} E PM₁₀

As partículas de matéria (PM) são classificadas de acordo com seu diâmetro aerodinâmico, com PM₁₀ referindo-se a partículas com diâmetro de 10 micrômetros ou menos e PM_{2,5} a partículas com diâmetro de 2,5 micrômetros ou menos. O material particulado é definido como a massa de uma mistura de partículas sólidas e gotículas líquidas de vários tamanhos (variando de alguns nanômetros a dezenas de micrômetros) suspensas em um volume de ar, representando uma ampla classe de substâncias química e fisicamente diversas (SEINFELD et al., 2006).

O cozimento é uma das fontes significativas de emissão de PM_{2,5} e PM₁₀ em ambientes internos. Diferentes métodos de cozimento influenciam a quantidade e composição dessas partículas. O uso de fogões a gás para cozinhar resulta em concentrações de PM_{2,5} significativamente maiores em comparação com fogões elétricos (WALLACE et al., 2004).

Restaurantes com métodos de cozimento intensivos, como fritar e grelhar, apresentam

níveis elevados de PM10. Esses métodos não apenas aumentam a concentração de partículas no ar, mas também a quantidade de PAHs (LEE et al., 2001; LIU et al., 2021). A fritura profunda, em particular, continua a ser identificada como uma das maiores fontes de PM2,5 em cozinhas domésticas e comerciais (HE et al., 2004; LI et al., 2023). Além disso, a composição das partículas varia dependendo dos ingredientes e do tipo de óleo utilizado. O uso de óleos com altos pontos de fumaça pode reduzir a formação de partículas finas, embora não elimine completamente a emissão de PM2,5 e PM10. A queima de alimentos ricos em gordura, como carne vermelha, tende a liberar mais partículas finas do que alimentos com baixo teor de gordura (BUONANNO et al., 2009; ZHANG et al., 2022).

2.2.4 Impacto da Temperatura na Emissão de Partículas

A geração de partículas durante o cozimento é significativamente influenciada pela temperatura, que afeta tanto a taxa de degradação térmica dos alimentos quanto a formação de compostos voláteis. Cozinhar em alta temperatura aumenta não apenas o número de partículas emitidas, mas também a concentração de massa, o diâmetro modal e o fator de emissão (BUONANNO et al., 2009; ZHANG et al., 2022). Esse aumento na temperatura facilita a intercoagulação das partículas, resultando em partículas maiores e mais densas, que podem ter impactos mais severos na qualidade do ar interior e na saúde humana (YEUNG, 2008; LIU et al., 2021).

Ao aquecer óleos entre 180°C e 200°C, como na fritura profunda, são liberadas partículas ultrafinas com diâmetros entre 50 e 100 nm. Já em temperaturas superiores a 240°C, a emissão tende a gerar partículas maiores, na faixa de 100 a 200 nm, devido à condensação de compostos voláteis e à coalescência das partículas (SANKHYAN et al., 2022; NGUYEN et al., 2022).

Além disso, a alta temperatura intensifica a pirólise de ácidos graxos e outros compostos orgânicos nos alimentos, levando à formação de uma variedade de PAHs, aldeídos e produtos da pirólise de ácidos graxos. Estudos recentes demonstraram que as emissões de PAHs, como benzo[a]pireno, aumentam significativamente com a temperatura, representando um risco potencial à saúde devido à sua natureza cancerígena (CHIANG et al., 1999; HAO et al., 2016; FERNANDES et al., 2020).

Especificamente, a fritura em altas temperaturas pode liberar compostos como acroleína

e formaldeído. A pirólise de proteínas e carboidratos também pode resultar na formação de compostos de Maillard, que contribuem para a formação de partículas ultrafinas (50-100 nm) e compostos voláteis durante o cozimento em alta temperatura (KATRAGADDA et al., 2010; ZHANG et al., 2022).

A variabilidade na emissão de partículas e compostos voláteis devido às diferenças de temperatura mostra a importância de controlar as condições de cozimento para minimizar a exposição a poluentes nocivos. Usar técnicas de cozimento de baixa temperatura e escolher óleos com pontos de fumaça mais altos podem ajudar a reduzir a formação de partículas finas e compostos voláteis prejudiciais (BUONANNO et al., 2009; LIU et al., 2021).

2.2.5 Estilos de Culinária e suas Emissões

Os estilos de culinária variam significativamente em suas técnicas e no tipo de emissões geradas. A cozinha mista, que utiliza várias técnicas de cozinha simultaneamente, pode gerar uma ampla gama de poluentes devido à combinação de métodos de alta e baixa temperatura. O churrasco, que abrange técnicas como defumar, assar, refogar e grelhar, é conhecido por produzir altas concentrações de PAHs e partículas finas devido à exposição prolongada ao calor e à combustão de gorduras (MING-TSANG, 2019).

Grelhar, que aplica calor seco diretamente à superfície dos alimentos, é conhecido por gerar altas emissões de PAHs e partículas finas devido à carbonização das superfícies dos alimentos e à combustão de gorduras (SEE e BALASUBRAMANIAN, 2008). Cozinhar no vapor e ferver, geralmente produzem menos partículas finas e PAHs, mas ainda podem liberar compostos voláteis e elementos inorgânicos dependendo dos ingredientes utilizados (CHEN et al., 2018).

O cozimento, que utiliza calor seco prolongado, geralmente no forno, tende a emitir menos partículas finas e PAHs em comparação com métodos de fritura profunda ou grelhar, mas ainda pode liberar compostos carbonílicos devido à degradação térmica de proteínas e carboidratos (HE et al., 2004). A fritura em óleo, por outro lado, gera altas emissões de aldeídos e PAHs devido à decomposição térmica de óleos e gorduras (ABDULLAHI et al., 2013).

Essas emissões não se limitam às partículas finas e PAHs. Métodos como fritar e grelhar em altas temperaturas também são responsáveis por desencadear a formação de aerossóis

orgânicos secundários (SOAs), que permanecem no ambiente por longos períodos, aumentando a exposição humana a compostos nocivos (SONG et al., 2022).

A culinária chinesa, que frequentemente envolve a técnica de fritar em uma wok com pequenas quantidades de óleo quente, pode gerar menos partículas finas em comparação com a fritura profunda, mas ainda resulta em emissões significativas de PAHs e compostos carbonílicos (ZHANG et al., 2010). A fritura em frigideira, caracterizada pelo uso mínimo de óleo, tende a produzir menos partículas finas, mas ainda pode liberar compostos voláteis e PAHs dependendo dos ingredientes e da temperatura de cozimento (LEE et al., 2001).

Qualquer estilo de culinária emite compostos químicos e a ventilação mecânica é crucial para a mitigação da concentração de material particulado em ambientes internos. Sistemas de exaustão eficientes podem reduzir significativamente a concentração de partículas finas durante o cozimento no ambiente interno (CHEN et al., 2018).

2.3 Sistema de Exaustão

A exaustão mecânica em cozinhas industriais, Figura 2, desempenha um papel vital na manutenção da qualidade do ar interno, segurança e eficiência operacional. Esses sistemas são projetados para remover vapores, gases, fumaça, odores e partículas gerados durante a cocção, garantindo um ambiente de trabalho seguro e confortável para os funcionários (ASHRAE, 2016).



Figura 2 - Sistema de Exaustão de cozinha.

Fonte: Gerada por IA (2025).

A exaustão mecânica é essencial em cozinhas industriais devido à quantidade significativa de contaminantes gerados durante o preparo dos alimentos. Sistemas de exaustão eficientes capturam os efluentes contaminados diretamente na fonte, evitando que se espalhem pelo ambiente e zonas indesejáveis (MORTEZA et al., 2013).

Além disso, a exaustão mecânica contribui para o conforto térmico, removendo o calor excessivo gerado pelos equipamentos de cozinha. Sistemas de exaustão devem operar continuamente durante a produção para garantir que calor, fumaça, odores e gases sejam efetivamente removidos, mantendo o ambiente da cozinha livre de poluentes (ABNT, 2019).

Um sistema de exaustão típico em cozinhas industriais é composto por quatro elementos principais: os captores, a rede de dutos, os despoluidores e o ventilador (ACGIH, 2013), conforme demonstrado na Figura 3. Implementar sistemas de exaustão mecânica em cozinhas industriais envolve enfrentar vários desafios. A variabilidade nos tipos e volumes de efluentes gerados durante diferentes processos de cocção exige sistemas flexíveis e adaptáveis. A captura dos contaminantes na fonte é crucial para evitar sua dispersão pelo ambiente (COSTA, 2005).

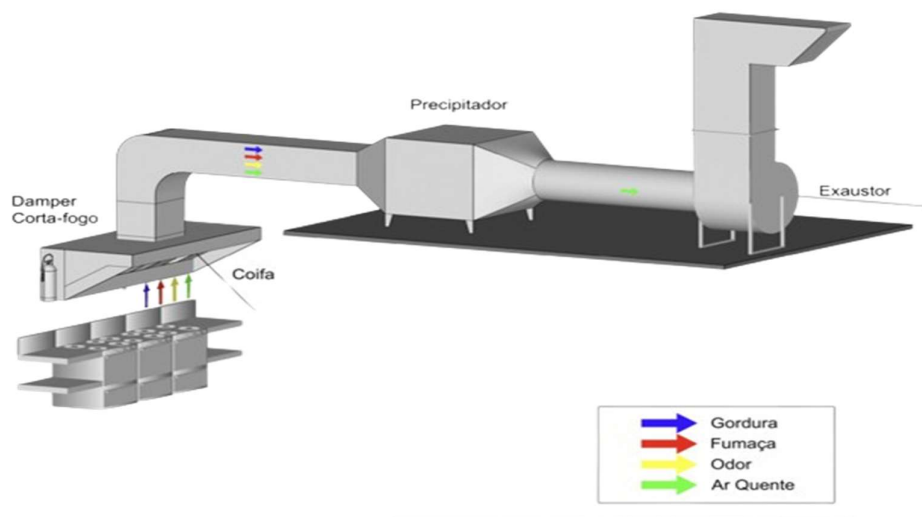


Figura 3 - Esquema de um sistema de exaustão.

Fonte: Exaustores RenovAR. Disponível em: <https://www.exaustor.com.br>. Acesso em: 12 dez. 2024

2.3.1 Capttores

São dispositivos que capturam contaminantes diretamente na fonte. Eles são projetados para serem altamente eficientes na coleta de vapores e partículas. A eficácia de um sistema de exaustão depende muito da escolha e do desempenho dos capttores e coifas, que são responsáveis pela captura inicial dos contaminantes (MACINTYRE, 1990).

Os capttores, também conhecidos como coifas, são dispositivos que capturam efluentes diretamente na fonte onde são gerados. Os capttores funcionam por meio da diferença de pressão entre o ar atmosférico e o ar dentro do sistema, estabelecendo uma corrente de ar que transporta os contaminantes através da tubulação até o exaustor. A vazão de ar do capttor deve ser suficiente para garantir que os poluentes gerados sejam efetivamente removidos (OLIVEIRA, 2013).

Para escolher um capttor ideal, é necessário considerar variáveis como espaço disponível, equipamentos utilizados, condições de operação e a toxicidade dos efluentes (ASSUNÇÃO, 1989). Além disso, a localização dos capttores em relação às fontes de emissão e a presença de correntes de ar, como aquelas provenientes de portas e janelas, podem afetar o desempenho do sistema de exaustão (MACINTYRE, 1990). A eficiência dos capttores vem

sendo aprimorada com o uso de novas tecnologias. Captadores mais modernos incluem sensores de temperatura para monitoramento contínuo da operação (HALTON, 2024).

A velocidade de captura é crucial para a eficácia do sistema de exaustão. A eficiência do sistema diminui à medida que aumenta a distância do captor em relação à fonte de emissão. Portanto, os captadores devem ser posicionados o mais próximo possível da fonte de poluição para maximizar a captura dos efluentes (ACGIH, 2013).

A primeira etapa a se avaliar em um projeto de exaustão é quais equipamentos estarão presentes na cozinha. As dimensões da coifa em relação aos equipamentos de cozinha são cruciais para garantir seu desempenho eficaz. A coifa deve cobrir toda a extensão linear dos equipamentos de cozinha para capturar adequadamente as correntes de calor por convecção geradas pelos equipamentos, com exceção das coifas de captação frontal (ABNT, 2020).

Quando a operação futura do local não é conhecida, recomenda-se prever pelo menos 60 renovações de ar por hora para o volume da área de cocção da cozinha. No entanto, em cozinhas equipadas com ar-condicionado e coifas que desempenham funções tanto de exaustão quanto de insuflação, essa exigência mínima de 60 renovações horárias não se aplica (ABNT, 2020).

2.3.2 Rede de Dutos

A rede de dutos é um componente crucial nos sistemas de exaustão de cozinhas industriais, responsável pelo transporte dos contaminantes capturados pelos captadores até o ponto de exaustão final. A eficiência e segurança do sistema de exaustão dependem significativamente do design, instalação e manutenção. A eficiência do sistema de dutos é crucial para minimizar a resistência ao fluxo de ar e evitar acúmulo de resíduos (HEISLER, 2015).

A rede de dutos de exaustão é responsável pela condução do ar e poluentes desde o ponto de geração do contaminante até o local de liberação para a atmosfera. Os dutos devem conectar os captadores aos despoluidores e, posteriormente, ao exaustor, garantindo a remoção eficaz dos contaminantes. Uma rede de dutos deve ser instalada de acordo com o projeto do recinto, sendo o mais curta possível em termos de comprimento e apresentando a menor quantidade de curvas, reduções, cotovelos e junções, para minimizar variações na velocidade, aumento de turbulências e perdas de carga no sistema (OLIVEIRA, 2013).

A rede de dutos deve ser projetada de forma que mudanças nas seções e conexões com os equipamentos dinâmicos não favoreçam o acúmulo de gordura em determinados pontos. Além disso, deve incluir portas de inspeção para permitir acesso adequado para manutenção e limpeza completa da rede de dutos. A velocidade mínima nos dutos de exaustão deve ser de 2,54 m/s, e a máxima não deve exceder 12,5 m/s, para atender aos níveis de ruído, vibrações e perdas de carga. E a velocidade ideal seria em torno de 7,5 m/s (ABNT, 2020).

Outros aspectos importantes no dimensionamento da rede de dutos incluem a presença de portas de inspeção. Os escoamentos com presença de contaminantes particulados, como em uma cozinha profissional, apresentam a tendência de acúmulo dessas partículas nos pontos de obstrução ou mudança de direção, podendo gerar entupimentos e aumento da perda de carga. Assim, as portas de inspeção devem ser estrategicamente localizadas para facilitar a limpeza e manutenção dos dutos (CLEZAR, 2009).

2.3.3 Extratores de Gordura

O ar tem uma composição específica, e quando elementos estranhos são identificados, é necessário submetê-lo a processos de filtração para remover essas impurezas. Apenas após esse tratamento de descontaminação, o ar pode ser liberado na atmosfera. Esse processo de filtração é essencial para garantir que o ar liberado esteja livre de contaminantes prejudiciais à saúde e ao meio ambiente (MACINTYRE, 1990).

Os sistemas de depuração, ou despoluidores, devem ser capazes de limpar seus componentes de forma autônoma. Isso significa que todos os poluentes coletados, que poderiam interferir na eficiência do equipamento, devem ser removidos regularmente. Esse processo de autolimpeza é crucial para manter a eficácia do sistema e prevenir o acúmulo de resíduos que podem obstruir o fluxo de ar ou causar danos ao equipamento (ABNT, 2020).

2.3.3.1 Filtro Eletrostático

A precipitação eletrostática é um processo em que as partículas no fluxo de ar são eletricamente carregadas e, sob a influência de um campo elétrico, são separadas do fluxo gasoso. O precipitador eletrostático, é composto por placas coletoras e fios de pequeno diâmetro, conhecidos como eletrodos de descarga. As partículas carregadas se movem em direção às placas coletoras devido às forças elétricas (MACINTYRE, 1990).

Os filtros eletrostáticos são dispositivos utilizados para remover partículas finas do ar, aproveitando princípios eletrostáticos para capturar e eliminar contaminantes. Esses filtros funcionam fornecendo uma carga elétrica às partículas através da ionização do ar pelo efeito corona. Quando o ar contaminado entra no despoluidor, as partículas são submetidas a um campo elétrico e direcionadas para a placa coletora, também conhecida como eletrodo de coleta. As impurezas são, então, coletadas nas placas e posteriormente descartadas (EPA, 1985).

O efeito corona é uma descarga elétrica que ocorre entre a placa coletora e o eletrodo de descarga. Essa descarga pode ser identificada por uma luz azul ao redor do eletrodo explica que o efeito corona ocorre quando os eletrodos são submetidos a uma diferença de potencial, o que carrega as partículas gerando a precipitação eletrostática (SCHNELLE, 2002).

As partículas são depositadas nas placas coletoras devido a forças elétricas e de Van der Waals. À medida que as partículas se acumulam, elas formam uma camada que aumenta de espessura. Quando essa camada se torna suficientemente espessa, ela é removida por um impacto mecânico conhecido como "pancada seca". Esse impacto provoca o descolamento da camada sólida das placas coletoras, fragmentando-a em pedaços menores que são então direcionados para uma tremonha (MEIRA, 2009).

As tremonhas são caixas inclinadas, geralmente com uma inclinação de cerca de 50°, projetadas para coletar o material fragmentado e direcioná-lo para um ponto de coleta. Esse design evita o acúmulo de material que poderia servir de combustível para incêndios, garantindo que o material coletado seja removido regularmente para manter a segurança e eficiência do sistema (WANG, 2004).

2.3.3.2 Lavador de Gases

O modelo mais comum de despoluidor é o lavador de gases convencional, onde o ar contaminado entra na região dos bicos pulverizadores e sofre impactação com a água pulverizada logo ao entrar no sistema (MACINTYRE, 1990). Lavadores de gases são dispositivos que utilizam um líquido para remover poluentes do ar. Eles são especialmente eficazes na remoção de gases ácidos, odores e partículas finas. O processo envolve o contato íntimo entre o fluxo de ar contaminado e o líquido de lavagem, que pode ser água ou uma solução química específica (PERRY, 1980). Os bicos pulverizadores devem atingir elevada atomização e cobrir todo o perímetro interno do equipamento, minimizando o depósito de

gordura e garantindo a eficiência do processo. Para evitar que o líquido seja arrastado para dentro da tubulação, recomenda-se uma velocidade máxima de 3,5 m/s na seção do despoluidor (ABNT, 2019).

O equipamento deve distribuir uniformemente as gotas para aumentar a probabilidade de que a gordura colida com as gotas (SHIFFTNER, et al., 1996). A principal dificuldade é produzir gotas pequenas e distribuí-las uniformemente para evitar trajetórias sem obstáculos. O processo de lavagem consiste na entrada do ar contaminado, impulsionado pela força do exaustor, que é então impactado por um líquido injetado através de orifícios, formando jatos. Normalmente, a água é utilizada como líquido de lavagem, mas podem ser adicionados detergentes biodegradáveis para melhorar a eficiência (GONÇALVES, 2002).

Existem diversos mecanismos que permitem que as partículas se desprendam do fluxo de ar e sejam capturadas pelo líquido de lavagem, incluindo impactação inercial, interceptação direta, deposição gravitacional e difusão browniana. Partículas com diâmetros maiores que 0,5 μm são principalmente removidas por impactação inercial, enquanto partículas menores são capturadas por difusão browniana (PILAT, 2000).

O mecanismo de impactação inercial ocorre devido à maior quantidade de movimento das moléculas maiores, que não conseguem desviar das gotas de líquido e colidem com elas. Partículas maiores são coletadas mais rapidamente porque não podem seguir as trajetórias das linhas de corrente que defletem ao redor das gotas, sendo, assim, mais propensas a colidir com as gotas e ficarem retidas no meio filtrante. A interceptação direta é semelhante, mas é mais eficiente para partículas menores que 10 μm , que podem seguir as trajetórias das linhas de corrente mais facilmente e são coletadas quando a linha de corrente está a uma distância da gota menor ou igual ao raio da própria partícula (GAMA, 2008).

Aborda-se também a deposição gravitacional, que ocorre quando partículas maiores se movem lentamente e acabam caindo na corrente de ar, sendo então coletadas. A eficiência desse mecanismo depende de várias variáveis, incluindo o diâmetro das partículas e das gotas, condições dos bicos aspersores e a turbulência do sistema (MEILE, 2006). A difusão browniana ocorre quando a energia cinética das moléculas de gás é transferida para as partículas, causando sua deflexão. Partículas muito pequenas se movem de forma randômica e, em um espaço restrito, acabam colidindo com as gotas de líquido (GAMA, 2008). Complementa-se que esse movimento provoca a migração das partículas para fora do fluxo de ar, onde elas colidem e

ficam retidas no meio filtrante devido às forças intermoleculares (Van der Waals) (OLIVEIRA, 2013).

2.3.3.3 *Coifas Lavadoras e Coifas Ultravioleta*

As coifas lavadoras são projetadas para combinar a captura eficiente de vapores e partículas com um sistema interno de lavagem que remove contaminantes. Este tipo de coifa é especialmente útil em ambientes com alta produção de gordura e vapor, reduzindo a necessidade de manutenção manual frequente. Ao contrário de coifas tradicionais, as coifas lavadoras utilizam jatos de água para limpar as superfícies internas enquanto operam, evitando o acúmulo de resíduos e minimizando o risco de incêndio (LI et al., 2021). Essas coifas incluem sistemas automáticos de detecção e ativação de ciclos de lavagem, garantindo eficiência contínua e mantendo o desempenho do sistema de exaustão (NGUYEN et al., 2022).

As coifas com radiação ultravioleta (UV) empregam tecnologia de luz UV para decompor os compostos orgânicos voláteis e eliminar gordura e odores presentes no ar exaurido. A radiação UV reage com o oxigênio e vapor d'água, gerando radicais livres que quebram as moléculas de gordura em partículas menores e menos nocivas (SONG et al., 2022). Essa tecnologia não apenas melhora a qualidade do ar interno, mas também reduz a necessidade de limpeza manual e manutenção, uma vez que evita o acúmulo de gordura nos dutos e nos próprios filtros (HU et al., 2023). As coifas UV são recomendadas em cozinhas de alta demanda, pois além de aumentarem a segurança contra incêndios, prolongam a vida útil dos sistemas de exaustão e garantem eficiência energética (FERNANDES et al., 2020).

2.3.4 Ventiladores

Os ventiladores são turbomáquinas projetadas para promover o deslocamento dos gases. Esse movimento é resultado da transferência de energia mecânica, fornecida pelo motor elétrico, para os gases, convertendo-se em energia cinética e potencial de pressão (ANDRADE, 2021).

Os sistemas de exaustão necessitam de ventiladores para criar o gradiente energético necessário para o escoamento do ar. Esses ventiladores, acionados por motores geralmente elétricos, transformam a energia mecânica do rotor em formas de energia que o fluido pode

assumir, permitindo o fluxo através dos dutos e superando as resistências ao deslocamento (MACINTYRE, 1990).

Um ventilador centrífugo é um equipamento simples, composto por poucos componentes principais: rotor, carcaça de conversão de pressão e motor. O funcionamento deste tipo de ventilador ocorre da seguinte forma: o ar entra pelo centro do rotor em movimento, é acelerado pelas palhetas e, em seguida, é impulsionado da periferia do rotor para a descarga (OLIVEIRA, 2013). Os ventiladores centrífugos podem variar em construção devido ao formato das pás do rotor, apresentando três principais classificações: pás radiais, pás inclinadas para frente e pás inclinadas para trás (CHAVES, 2012).

Os ventiladores de pás radiais são robustos e têm a capacidade de transportar grandes concentrações de poeira seca e corrosiva, embora apresentem menor eficiência (CHAVES, 2012). Quando se opta por ventiladores com pás inclinadas para frente, observa-se um ganho em eficiência e maior capacidade de exaustão em baixas velocidades. No entanto, esse tipo não é adequado para exaustão de ar contendo material particulado, devido a problemas potenciais de corrosão (OLIVEIRA, 2013). Já os ventiladores com pás inclinadas para trás, apresentam as maiores velocidades de rotação, melhor eficiência e menor emissão de ruídos. Além disso, são capazes de autolimitar sua potência, evitando sobrecarga se corretamente dimensionados (CLEZAR et al., 2009).

Os ventiladores usados em exaustão de cozinha devem ser certificados para essa aplicação e é recomendado o tipo centrífugo, de construção metálica com rotor de pás inclinadas para trás ou radiais. O sistema de transmissão pode ser direto ou por polia-correia, e o ventilador deve resistir ao fogo por uma hora de operação a 400°C (ABNT, 2019).

Os parâmetros técnicos de desempenho dos ventiladores devem ser fornecidos pelo fabricante por meio de tabelas ou curvas características (FOX et al., 2014). o ventilador deve ser capaz de vencer a perda de carga total do sistema (incluindo rede de dutos, captos e filtros), garantindo a pressão estática e cinética necessárias para manter o fluxo do fluido (BURGESS et al., 2004).

Nos sistemas de exaustão de cozinhas industriais, a interação da gordura com os ventiladores representa um desafio para a eficiência do equipamento. Durante a exaustão, vapores e partículas de gordura nos efluentes aderem às pás e ao rotor do ventilador, o que pode

comprometer o desempenho. A formação de uma camada de gordura sobre as pás altera o perfil aerodinâmico do rotor, prejudicando a movimentação do ar e reduzindo a eficiência do ventilador (LI et al., 2021).

O acúmulo irregular de gordura pode provocar desbalanceamento do rotor, resultando em vibrações excessivas e aumentando o desgaste prematuro dos componentes mecânicos (SONG et al., 2022). Outro risco associado é o de incêndios, já que a gordura acumulada pode se inflamar sob altas temperaturas, especialmente em ventiladores que operam continuamente em ambientes de cozinhas industriais (HU et al., 2023). Esse acúmulo também pode exigir que o ventilador trabalhe sob maior carga, elevando o consumo de energia para manter a vazão de ar necessária, aumentando assim os custos operacionais (NGUYEN et al., 2022).

2.4 Perfil de Ácidos Graxos de Hambúrgueres Bovinos

A composição lipídica de hambúrgueres bovinos exerce influência direta sobre o comportamento térmico e físico desses produtos durante a cocção, afetando aspectos como ponto de fusão, viscosidade e estabilidade oxidativa. Esses fatores, por sua vez, têm impacto na formação de resíduos graxos carbonizados em superfícies aquecidas, como grelhas e chapas metálicas, e potencialmente nos sistemas de exaustão de cozinhas comerciais (RIBEIRO et al., 2020; MELGAR-LALANNE et al., 2022; LEE et al., 2021).

Diversos estudos vêm caracterizando o perfil de ácidos graxos presentes em hambúrgueres comerciais e experimentais. Em geral, os principais ácidos graxos saturados identificados são o ácido palmítico (C16:0) e o ácido esteárico (C18:0), enquanto os insaturados mais comuns incluem o ácido oleico (C18:1) e o ácido linoleico (C18:2) (POPOVA et al., 2023; ESMERINO et al., 2023; SANTIAGO et al., 2017). A predominância relativa desses compostos varia conforme a formulação do hambúrguer e a origem da gordura empregada. Hambúrgueres formulados com gordura bovina tendem a apresentar maior concentração de ácidos graxos saturados, ao passo que produtos enriquecidos com óleos vegetais, como chia, canola ou girassol, apresentam aumento significativo na fração de insaturados (ESMERINO et al., 2023; LEE et al., 2021).

A Tabela 1 apresenta dados compilados de estudos recentes sobre a composição média de ácidos graxos em hambúrgueres bovinos, incluindo os percentuais dos principais compostos lipídicos e a proporção total entre ácidos graxos saturados e insaturados.

Tabela 1 – Perfil de ácidos graxos em hambúrgueres bovinos

Artigo	C10:0 (%)	C12:0 (%)	C14:0 (%)	C16:0 (%)	C16:1 (%)	C18:0 (%)	C18:1c (%)	C18:1t (%)	C18:2 (%)
Araújo et al. (2022)	0,20	0,44	3,38	28,22	2,29	13,07	37,70		14,71
Esmerino et al. (2023)				23,49		10,45	42,89		23,17
Hamerlaine et al. (2024)		0,46	3,43	28,84	2,44	12,57	37,72	0,33	14,21
Lee et al. (2021)				20,37		10,30	44,91		24,42
McDonald's (2019)			1,36	27,38	1,99	14,73	38,14	1,57	14,84
Melgar-Lalanne et al. (2022)				30,92		15,40	35,47		18,20
Popova et al. (2023)				27,30		16,03	38,43		20,67
Ribeiro et al. (2020)				29,85		13,36	37,98		18,82
Santiago et al. (2017)				31,95		15,38	35,50		17,16
Scientific Reports (2025)				29,29		18,44	38,62	1,40	12,25

Fonte: Autoria própria (2025)

Produtos com maior teor de saturados tendem a gerar resíduos mais espessos e carbonizados, enquanto formulações mais ricas em insaturados, embora mais suscetíveis à oxidação térmica, costumam deixar depósitos menos aderentes quando a cocção é controlada. As diferenças no perfil entre ácidos graxos saturados e insaturados refletem-se diretamente no comportamento térmico dos hambúrgueres. Formulações com maior teor de saturados apresentam lipídios mais estáveis ao calor, mas favorecem a formação de resíduos compactos e carbonizados em superfícies aquecidas, contribuindo para o acúmulo nos sistemas de exaustão (MELGAR-LALANNE et al., 2022; RIBEIRO et al., 2020). Em contrapartida, hambúrgueres com maior proporção de insaturados, apesar da maior vulnerabilidade à oxidação térmica, tendem a produzir resíduos menos espessos e mais fáceis de remover (LEE et al., 2021).

O tipo de preparo também influencia diretamente o comportamento da gordura. A fritura promove maior retenção de lipídios superficiais e gera maiores quantidades de subprodutos da oxidação lipídica, enquanto grelhar preserva com maior eficácia os ácidos graxos insaturados, gerando resíduos menos aderentes e menos propensos à degradação térmica. Essa gordura, ao ser aquecida e vaporizada, dá origem a resíduos que se depositam nos sistemas de exaustão (RIBEIRO et al., 2020; CHMIEL et al., 2021).

O ácido cáprico (C10:0), também conhecido como ácido decanoico, Figura 4, é um

ácido graxo saturado de cadeia média com 10 carbonos, raramente presente em carnes bovinas, mas encontrado em laticínios e óleos vegetais exóticos, como óleo de coco. Seu ponto de fusão gira em torno de 31,6 °C, sendo líquido em temperaturas corporais, o que o torna útil em formulações com liberação rápida de energia (HERNÁNDEZ-CÁZARES et al., 2020; ORKUSZ et al., 2023). Apesar de ser detectado em traços em alguns hambúrgueres industriais, ele geralmente não ultrapassa 0,2% do perfil lipídico total (ARAÚJO et al., 2022).

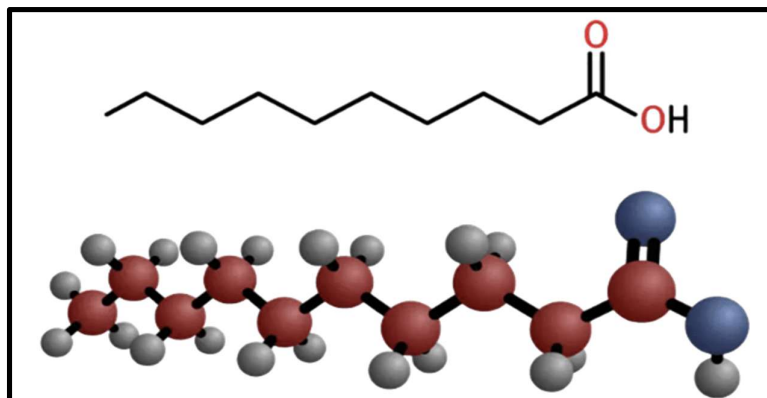


Figura 4 – Estrutura molecular do ácido cáprico (C10:0).
Fonte: Adaptado de Dreamstime (2025).

O ácido láurico (C12:0), Figura 5, é outro ácido saturado de cadeia média, contendo 12 carbonos e com ponto de fusão em torno de 44 °C (SCIENCEDIRECT TOPICS, 2023). Ele é mais comum em produtos lácteos e óleos tropicais do que em carnes vermelhas, sendo encontrado apenas em traços em hambúrgueres bovinos. Mesmo em quantidades reduzidas, ele contribui para a estrutura e estabilidade da gordura (CHOE et al., 2019). Não há registro experimental amplamente divulgado de seu ponto de ignição, mas como regra, ácidos graxos de cadeia curta a média tende a ter menor resistência térmica.

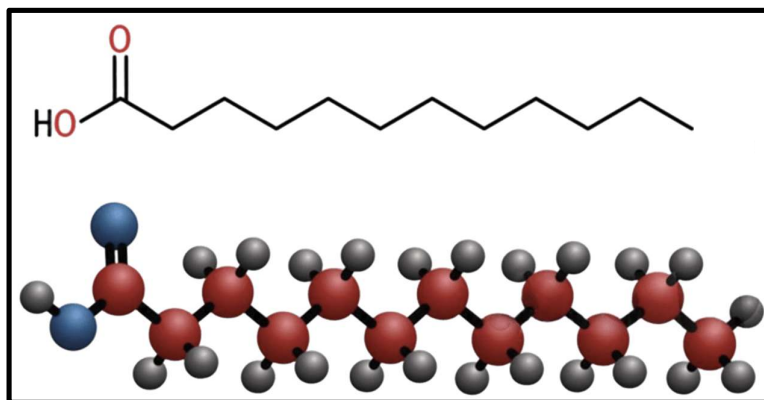


Figura 5 – Estrutura molecular do ácido láurico (C12:0).
Fonte: Adaptado de Dreamstime (2025).

cadeia média comum em lipídios animais. Ele apresenta ponto de fusão em torno de 54,4 °C, sendo sólido à temperatura ambiente e contribuindo para a consistência firme das gorduras animais (POPOVA et al., 2023). Está presente em carnes em concentrações que variam de 1% a 3%, e é mais relevante para estabilidade térmica do produto do que para aroma ou sabor (SANTIAGO et al., 2017; HAMERLAINE et al., 2024).

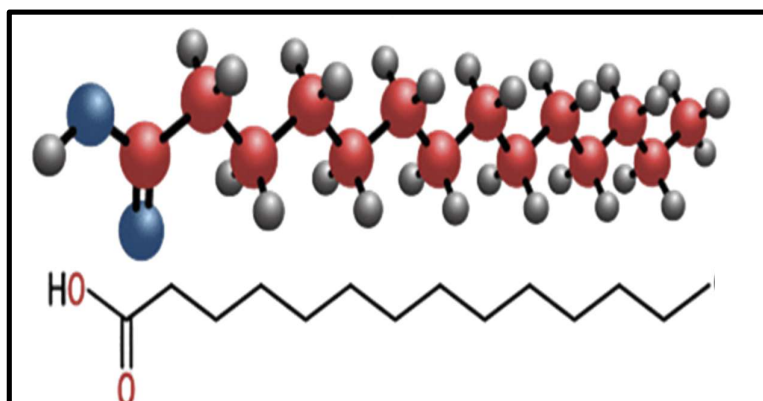


Figura 6 – Estrutura molecular do ácido mirístico (C14:0).
Fonte: Adaptado de Dreamstime (2025).

O ácido palmítico (C16:0), Figura 7, é o ácido graxo saturado mais abundante nos lipídios animais, incluindo hambúrgueres bovinos, podendo atingir até 27% do total de ácidos graxos. Seu ponto de fusão é de aproximadamente 63 °C, o que o torna sólido em temperatura ambiente (DÍAZ et al., 2019; MELGAR-LALANNE et al., 2022). Sua estrutura permite empacotamento eficiente das cadeias lipídicas, influenciando diretamente a dureza da gordura (LIBRETEXTS CHEMISTRY, 2023). Embora seu ponto de ignição exato seja raramente relatado, sua resistência térmica é considerada alta entre os ácidos graxos saturados.

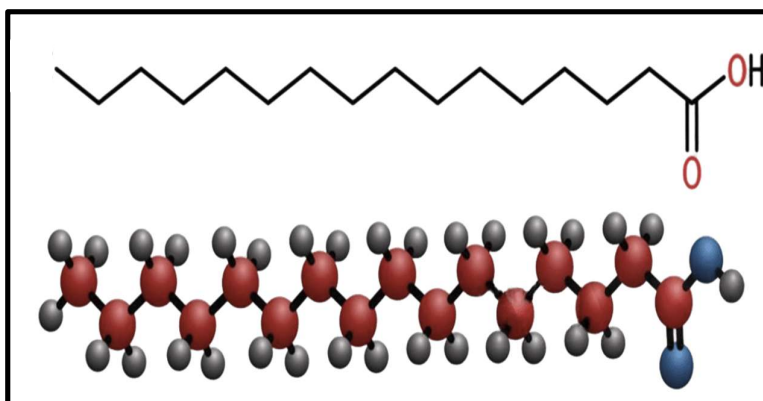


Figura 7 – Estrutura molecular do ácido palmítico (C16:0).
Fonte: Adaptado de Dreamstime (2025).

O ácido palmitoleico (C16:1), Figura 8, é um ácido graxo monoinsaturado menos comum, representando entre 1% e 2% nos hambúrgueres. Tem ponto de fusão em torno de 0,5 °C, o que o torna líquido em temperaturas frias. É biossintetizado a partir do ácido palmítico e sua presença está associada a carnes de maior teor de gordura intramuscular (HAMERLAINE et al., 2024; LEE et al., 2021).

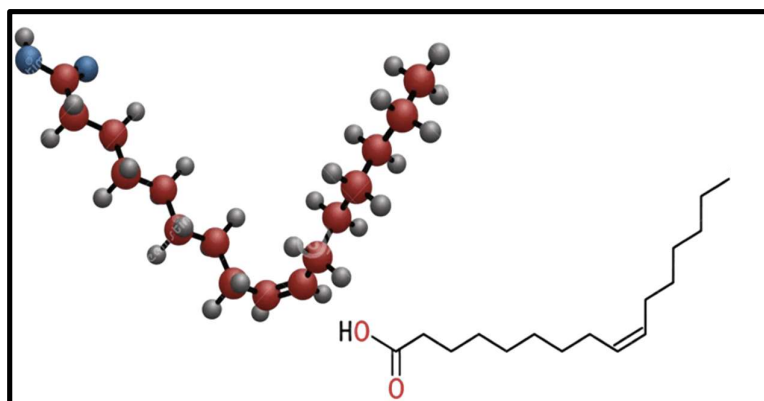


Figura 8 – Estrutura molecular do ácido palmitoleico (C16:1).
Fonte: Adaptado de Dreamstime (2025).

O ácido esteárico (C18:0), ou ácido octadecanoico, Figura 9, é um ácido graxo saturado com 18 carbonos e ponto de fusão elevado (~69 °C). Em hambúrgueres, ele é o segundo ácido saturado mais comum, com teores entre 10% e 15% (RIBEIRO et al., 2020; ZHOU et al., 2025). Sua elevada temperatura de fusão o torna resistente ao calor, e seu ponto de ignição está estimado acima de 250 °C, o que o torna ideal para estabilidade térmica em frituras e grelhados (LUMEN LEARNING, 2023).

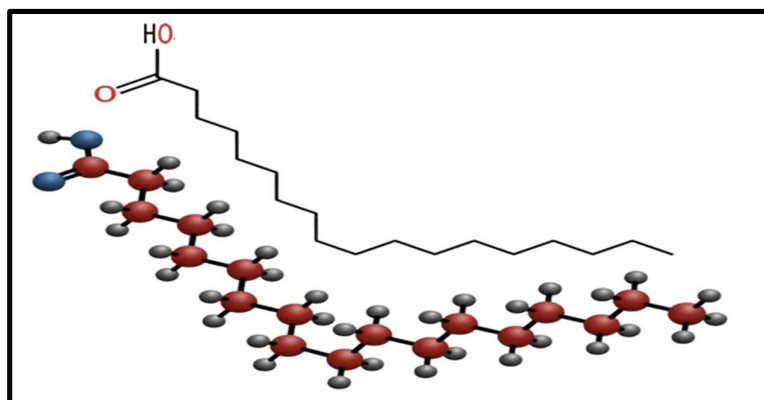


Figura 9 – Estrutura molecular do ácido esteárico (C18:0).
Fonte: Adaptado de Dreamstime (2025).

encontrado na carne bovina, frequentemente compondo até 40% da fração lipídica total (ESMERINO et al., 2023; DÍAZ et al., 2019). Ele apresenta ponto de fusão de cerca de 13 – 14 °C e é líquido em temperatura ambiente, influenciando positivamente na textura dos hambúrgueres (POPOVA et al., 2023).

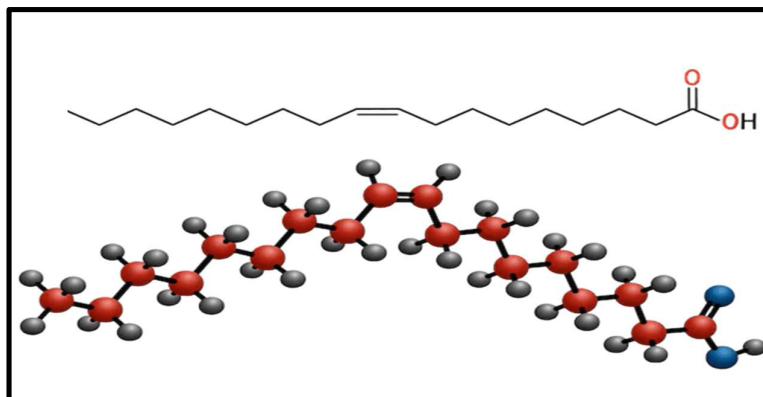


Figura 10 – Estrutura molecular do ácido oleico (C18:1c).
Fonte: Adaptado de Dreamstime (2025).

O ácido elaídico (C18:1t), Figura 11, é o isômero trans do ácido oleico e ocorre naturalmente em pequenas quantidades em carnes de ruminantes, como os bovinos. Está presente em níveis de até 1,5% nos hambúrgueres (ZHOU et al., 2025; HAMERLAINE et al., 2024). Seu ponto de fusão é mais alto que o do isômero cis (aproximadamente 44 °C), o que reflete maior rigidez estrutural das gorduras que o contêm. É considerado termicamente estável, mas em excesso, está associado a características negativas de processamento (ARAÚJO et al., 2022).

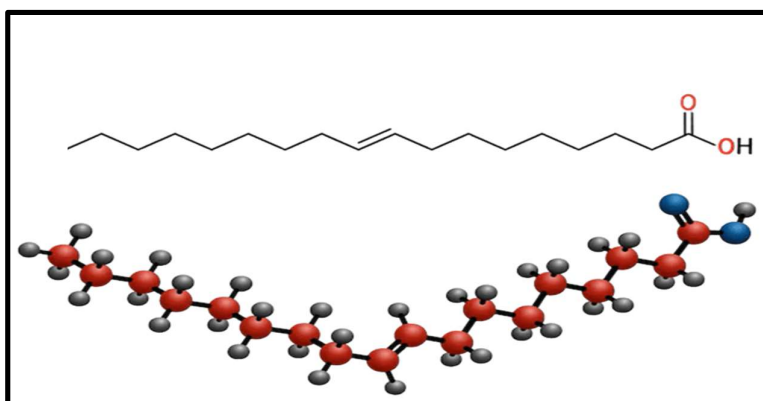


Figura 11 – Estrutura molecular do ácido elaídico (C18:1t).
Fonte: Adaptado de Dreamstime (2025).

O ácido linoleico (C18:2), Figura 12, é o principal poli insaturado encontrado em carnes

vermelhas, especialmente em animais alimentados com grãos. Seu ponto de fusão é de cerca de -5°C , e ele é responsável por parte da fluidez da gordura a temperaturas mais baixas (SANTIAGO et al., 2017; ESMERINO et al., 2023). Em hambúrgueres, sua concentração varia de 10% a 20%, sendo fundamental para a composição nutricional e estabilidade oxidativa da gordura (POPOVA et al., 2023).

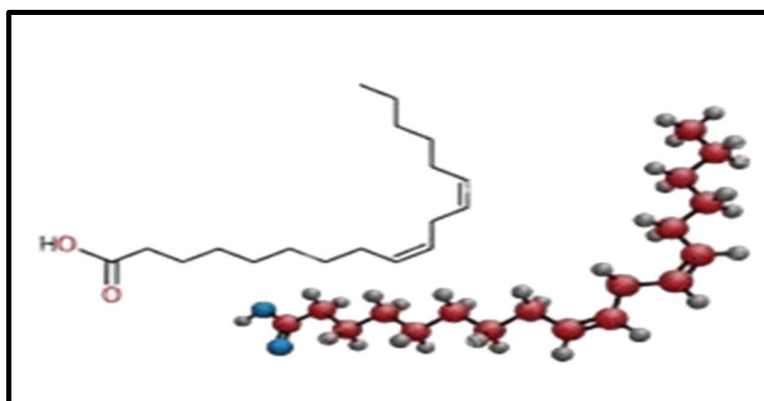


Figura 12 – Estrutura molecular do ácido linoleico (C18:2).
Fonte: Adaptado de Dreamstime (2025).

2.5 Degradação Térmica de Resíduos Graxos e Formação de Depósitos em Sistemas de Exaustão

Durante o preparo de alimentos ricos em gordura, como hambúrgueres, é comum a liberação de vapores e partículas graxas para o ambiente, especialmente em cozinhas comerciais. Uma parte significativa dessas emissões acaba sendo direcionada para os sistemas de exaustão, onde pode ocorrer deposição em superfícies metálicas internas dos dutos, Figura 13, devido ao resfriamento e à condensação dos compostos orgânicos presentes (FERNANDES et al., 2020; MCDONALD et al., 2003).



Figura 13 – Acúmulo de gordura em diferentes dutos de exaustão em cozinhas reais.

Fonte: Autoria Própria (2025)

A formação e o acúmulo de resíduos graxos nos dutos estão associados à degradação térmica dos lipídios, influenciados diretamente pelas temperaturas atingidas durante o processo de cocção. A emissão de partículas ultrafinas tende a aumentar com a elevação da temperatura, reforçando a importância das condições térmicas no comportamento desses resíduos (BUONANNO et al., 2009). As características dessas partículas e suas implicações na operação dos sistemas de ventilação têm sido objeto de atenção devido a sua aderência e potencial risco operacional (LI et al., 2023).

A oxidação térmica é particularmente elevada em lipídios com altos teores de ácidos graxos insaturados, como os presentes em óleos vegetais, resultando em produtos de oxidação como aldeídos e outros compostos voláteis (KATRAGADDA et al., 2010). Essa degradação contribui para a formação de resíduos com menor estabilidade química (LEE et al., 2001; NGUYEN et al., 2022). O acúmulo progressivo desses resíduos em ambientes com circulação forçada de ar pode representar risco de ignição caso não sejam adotadas medidas preventivas adequadas (FARRELL et al., 2011).

2.6 Técnicas Analíticas Aplicadas à Avaliação De Resíduos Graxos

A análise de resíduos graxos gerados em processos térmicos exige técnicas que permitam compreender suas propriedades químicas, estruturais e morfológicas. Para isso,

diferentes métodos instrumentais podem ser utilizados.

A espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier é amplamente utilizada na identificação de grupos funcionais em compostos orgânicos, como carbonilas, ésteres, ácidos carboxílicos e ligações insaturadas. Essa técnica permite avaliar a presença de oxidações e transformações térmicas em resíduos graxos (COATES, 2000; SMITH, 2011).

A cromatografia gasosa (CG) é uma técnica de separação eficiente para determinar o perfil de ácidos graxos presentes em amostras. Mudanças no perfil lipídico, como redução de ácidos graxos insaturados, servem como indicativo indireto de degradação térmica (RIBEIRO et al., 2020).

A difração de raios X (DRX) é usada para avaliar a presença de fases cristalinas ou amorfas nos resíduos sólidos, sendo útil na investigação de processos como carbonização e reorganização molecular (CULLITY; STOCK, 2001). Já a microscopia eletrônica de varredura permite observar a morfologia superficial dos resíduos, fornecendo informações sobre textura, porosidade, presença de crostas e sinais visuais de carbonização (PECHARSKY; ZAVALIJ, 2009).

2.7 Propriedades Térmicas e Riscos de Inflamabilidade Associados a Resíduos Graxos

Resíduos resultantes de processos com alta carga térmica costuma apresentar maior densidade, compactação e presença de compostos oxidados e carbonizados. A formação de compostos polimerizados e crostas graxas pode favorecer a propagação de chamas em caso de ignição acidental (FARRELL et al., 2011).

A composição lipídica influencia diretamente o ponto de fulgor do resíduo. Ácidos graxos insaturados, por exemplo, são mais suscetíveis à oxidação térmica, formando produtos voláteis que aumentam o risco de inflamabilidade (KATRAGADDA et al., 2010). Resíduos altamente degradados podem apresentar menor reatividade química, mas maior retenção de calor e aderência às superfícies internas do sistema, dificultando a limpeza e ampliando o risco de ignição prolongada (MCDONALD et al., 2003).

Os riscos de inflamabilidade em cozinhas comerciais variam conforme o equipamento de cocção e o tipo de resíduo gerado. Nas fritadeiras, o resíduo predominante é o óleo vegetal vaporizado e posteriormente polimerizado. Esse material apresenta temperaturas médias de ignição elevadas, acima de 350 °C, o que dificulta o início da combustão. Contudo, uma vez

inflamado, o fogo tende a ser prolongado e intenso, liberando grande quantidade de energia térmica (ZIDONG; YONG, 2017; GRIFFIN; MORGAN, 2014).

De forma semelhante, a chapa metálica também gera resíduos oleosos e parcialmente carbonizados, com ponto de ignição em torno de 300 °C. O risco associado está menos na ignição precoce e mais na propagação sustentada do incêndio após sua deflagração, já que a chama, uma vez estabelecida, é de difícil extinção (OLSON et al., 2009; ZIDONG; YONG, 2017).

Por outro lado, os *charbroilers* apresentam características distintas. O gotejamento de gordura animal sobre a chama resulta na formação de fuligem carbonizada, composta por partículas de carbono elementar e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos. Esse resíduo apresenta ignição precoce em temperaturas mais baixas, acima de 250 °C, e funciona como um gatilho inicial para incêndios súbitos. O fogo, nesse caso, pode se propagar em cascata: a fuligem inflama primeiro e, em seguida, aquece os depósitos oleosos, desencadeando uma combustão mais intensa (ZIDONG; YONG, 2017; OLSON et al., 2009; HORTON, 2015).

Por fim, em fornos a carvão ou lenha, observa-se a combinação da gordura animal com a fuligem proveniente da combustão incompleta do combustível sólido. Esse tipo de resíduo apresenta temperaturas médias de ignição ainda mais baixas, acima de 200 °C, e resulta em chamas instáveis e violentas, com alta vulnerabilidade à ignição precoce (DIES, 1997; GRIFFIN; MORGAN, 2014).

Dessa forma, nota-se que, enquanto fritadeiras e chapas metálicas oferecem risco de incêndios de longa duração e alta energia térmica, os *charbroilers* e fornos a combustível sólido estão mais associados a ignições rápidas e repentinas, diretamente relacionadas à formação e acúmulo de fuligem nos dutos. Formulações com maior teor de saturados aumentam a necessidade de manutenção preventiva em sistemas de exaustão, pelo acúmulo de resíduos carbonizados, o que impacta diretamente os custos operacionais e a segurança alimentar (ZHANG et al., 2024).

2.8 Riscos do Acúmulo de Gordura, Óleo e Graxa em Sistemas de Exaustão de Cozinhas.

O acúmulo de gordura, óleo e graxa (FOG) nos dutos de ventilação de cozinhas comerciais é uma área de preocupação significativa no setor há muitas décadas (FARRELL et

al., 2011). A manutenção regular desses sistemas não só aumenta a segurança como também diminui o valor de seguros contra incêndios. Em 2005, o *Building Research Institution* (BRE) examinou dados do Corpo de Bombeiros de Londres e encontrou 700 incêndios envolvendo sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (HVAC), sendo que a ignição de FOG nos dutos foi a segunda maior causa de incêndios de ventilação (BRE, 2005). Nos Estados Unidos, incêndios de gordura resultam em mais de 100 milhões de dólares em danos diretos à propriedade anualmente em cozinhas comerciais (NFPA, 2005). A organização internacional de referência relata que restaurantes são os mais suscetíveis à propagação de incêndios nas condutas devido ao acúmulo de gordura (BRE, 2005).

O acúmulo de graxa dentro do sistema de exaustão representa um risco potencial de incêndio, que pode ser acionado por chama aberta, é uma das mais críticas, visto que o contato direto com depósitos de gordura é suficiente para iniciar a combustão e provocar a rápida propagação do fogo através dos dutos (FIRECODE, 2023). Além disso, mesmo uma faísca ou pico de calor oriundo de superfícies aquecidas ou mau funcionamento de equipamentos pode desencadear o processo de ignição, ampliando o risco de que o incêndio se espalhe de forma descontrolada pela rede de exaustão (STEAMATIC, 2023).

Uma vez iniciado, o fogo pode se espalhar rapidamente através do sistema de exaustão, causando danos extensos. Além disso, um sistema obstruído com gordura restringe o fluxo de ar, resultando em ineficiências no cozimento. Incêndios de graxa em cozinhas comerciais são frequentemente causados por uma combinação de fatores, incluindo altas temperaturas de cozimento, respingos e derramamentos de óleo, acúmulo de graxa, técnicas de cozimento inadequadas e manutenção negligenciada, Figura 14. Esses incêndios podem resultar em danos significativos à estrutura física do estabelecimento, bem como afetar sua estabilidade financeira, reputação e segurança dos funcionários e clientes (RAMESH, 2010).



Figura 14 – Representação de um sistema de exaustão de cozinha durante um incêndio.

Fonte: Adaptada por IA (2025)

A velocidade mínima recomendada para o escoamento em dutos de exaustão é de aproximadamente 2,54 m/s, pois esse valor reduz significativamente o acúmulo de FOG. A deposição de partículas depende de fatores como diâmetro e densidade das partículas, número de Reynolds e rugosidade do material dos dutos (SIPPOLA et al., 2005). Estudos mostram que a redução da velocidade de exaustão pode diminuir a taxa de deposição nas paredes, mas também comprometer a qualidade do ar interno, aumentando a exposição de ocupantes a poluentes (GRESTER et al., 1998; RIM; NOVOSELAC, 2010).

O design do sistema influencia diretamente esse processo: dutos com curvas apresentam deposição consideravelmente maior devido ao desenvolvimento de turbulência, enquanto dutos retos tendem a acumular menos material (SIPPOLA et al., 2005). A rugosidade também exerce papel relevante, sendo relatado que dutos com isolamento térmico acumulam mais partículas que dutos não isolados, embora esse efeito ainda não tenha sido explorado de forma quantitativa. Por outro lado, reduzir o isolamento para minimizar a deposição pode prejudicar a eficiência na recuperação de calor (SIPPOLA et al., 2005).

As emissões de cozimento variam amplamente conforme o tipo de equipamento, características da carne, teor de gordura e condições de preparo. Para hambúrgueres com 25% de gordura, a faixa de emissão relatada é de 15,0 g a 40,0 g de FOG/kg de carne (MCDONALD et al., 2003; SCHAUER et al., 1999). A maior parte da massa graxa liberada na pluma de

exaustão está associada a partículas maiores que $10\text{ }\mu\text{m}$, especialmente em grelhadores a combustível sólido e *woks*. Contudo, dentro da rede de dutos, a fração predominante encontra-se em fase de vapor ou ligada a partículas ultrafinas ($< 1\text{ }\mu\text{m}$) (KUEHN et al., 2008). Além disso, partículas transportadas em fase líquida podem reduzir a turbulência do fluxo, diminuindo tanto a velocidade de exaustão quanto a taxa de deposição nas paredes (GERSTLER et al., 1999).

3 METODOLOGIA

O presente estudo possui caráter experimental-descritivo, conduzido com o objetivo de avaliar a composição e o comportamento térmico de resíduos graxos acumulados em sistemas de exaustão de cozinhas industriais, com ênfase na inflamabilidade e na degradação das frações lipídicas.

As amostras foram coletadas em condições reais de preparo, diretamente dos dutos de exaustão de duas categorias de cozinhas comerciais. O Grupo 1 corresponde às cozinhas que utilizam *charbroiler*, sistema de cocção por chama direta que opera em torno de 350 °C. O Grupo 2 abrange aquelas que utilizam chapa metálica, baseada em condução térmica, com temperaturas médias próximas de 218 °C. Essa diferença significativa no regime térmico dos equipamentos foi considerada uma variável central para compreender os mecanismos de degradação dos resíduos ao longo do preparo dos alimentos.

A coleta foi realizada por raspagem manual dos depósitos graxos aderidos às paredes internas dos dutos, preservando a integridade do material. Posteriormente, as amostras foram devidamente acondicionadas, separadas e encaminhadas a laboratórios especializados. Nem todas as amostras foram submetidas a todos os ensaios, uma vez que sua utilização variou conforme a disponibilidade de massa e a adequação às exigências analíticas.

Foram realizadas a determinação do perfil de ácidos graxos e a avaliação de inflamabilidade dos resíduos graxos. Essa abordagem integrou a representatividade prática das condições reais de cocção com a precisão dos métodos laboratoriais, oferecendo uma visão aplicada e abrangente sobre a composição lipídica e o comportamento térmico dos resíduos acumulados em sistemas de exaustão de cozinhas comerciais.

Para a avaliação integral, foram selecionadas técnicas analíticas complementares, cada uma direcionada a aspectos específicos da amostra:

- Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR): identificação dos principais grupos funcionais presentes;
- Cromatografia Gasosa (CG): determinação e comparação do perfil de ácidos graxos nos alimentos crus e nos resíduos coletados;
- Ensaio de Saponificação: quantificação da fração lipídica saponificável ainda disponível nos depósitos graxos;
- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV): análise da morfologia, porosidade e

evidências de carbonização superficial;

- Difração de Raios X (DRX): identificação de fases cristalinas após exposição térmica;
- Ensaio de Inflamabilidade em Simulador de Duto: verificação da ocorrência de ignição espontânea ou induzida.

A integração desses métodos assegura uma compreensão detalhada do comportamento químico, estrutural e térmico dos resíduos, fornecendo subsídios técnicos para a prevenção de riscos associados à sua acumulação em sistemas de ventilação.

3.1 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier é um método analítico eficiente para identificar ligações químicas em moléculas por meio da produção de um espectro vibracional na região do infravermelho. Nesse processo, as amostras são colocadas no espectrômetro, onde a fonte de luz infravermelha atravessa diferentes comprimentos de onda, permitindo a detecção e avaliação de grupos funcionais e ligações covalentes presentes na amostra (MACEDO, 2015). Para este estudo, as análises foram realizadas no espectrômetro BRUKER® VERTEX 70 (CAM/UFRRJ), no modo de Refletância Total Atenuada (ATR), abrangendo a faixa espectral de 4000 a 400 cm^{-1} , com 16 varreduras por amostra e resolução de 4 cm^{-1} . A FTIR é amplamente utilizada para análises qualitativas de lipídeos e componentes orgânicos, permitindo identificar grupos químicos como carbonilas, hidroxilas, ésteres e outros, essenciais para compreender a composição estrutural das gorduras de resíduos (SMITH, 2011; COATES, 2000)

3.2 Análise por Cromatografia Gasosa

A cromatografia gasosa (CG) foi aplicada tanto aos resíduos graxos coletados nos dutos de exaustão quanto às amostras de hambúrguer cru provenientes das mesmas lojas, visando comparar o perfil lipídico original ao perfil final depositado no sistema. As análises foram realizadas em um cromatógrafo modelo 2010 Plus, equipado com detector por ionização em chama (FID) e coluna capilar Supelco SP-2560 (100 m $\times$ 0,25 mm $\times$ 0,20 μm). As amostras foram preparadas e injetadas no modo split com razão 1:20, volume de injeção de 1,0 μL e injetor a 250 $^{\circ}\text{C}$. O gás de arraste foi hidrogênio em fluxo constante de 0,60 mL min^{-1} (velocidade linear de 17,8 cm s^{-1}). O detector FID operou a 280 $^{\circ}\text{C}$, com vazões de hidrogênio,

ar sintético e nitrogênio (make up), 40, 400 e 30 mL min⁻¹, respectivamente. As condições de temperatura do forno foi: 140 °C por 5 min; rampa de 3 °C min⁻¹ até 220 °C (patamar de 8 min); seguida de rampa de 3 °C min⁻¹ até 240 °C (patamar de 13 min), totalizando os 59 min de corrida. Essas condições permitiram a identificação e a comparação dos ácidos graxos predominantes e seus níveis de transformação entre as matrizes avaliadas.

3.3 Ensaio de Saponificação

O ensaio de saponificação foi realizado com o objetivo de estimar a fração graxa presente nos resíduos. Inicialmente, as amostras foram submetidas à extração por Soxhlet, utilizando hexano como solvente, em sistema de refluxo por 6 horas para obtenção do material lipídico. Em seguida, procedeu-se à saponificação dessa fração, promovendo a reação dos ácidos graxos livres e triglicerídeos. Após o resfriamento e separação de fases, a fração saponificável foi recuperada por evaporação do solvente em evaporador rotativo. O material obtido foi pesado, e os resultados expressos como porcentagem da massa original da amostra.

3.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As análises morfológicas foram realizadas no Microscópio Eletrônico de Varredura do CETEM (Centro de Tecnologia Mineral, RJ), utilizando o detector de elétrons retroespalhados (BSED). As amostras foram aderidas in natura sobre um suporte de alumínio com fita de carbono adesiva dupla face e recobertas com prata em sputter BalTech SCD 050, sob vácuo de argônio e corrente de 30 mA aplicada durante 250 segundos, garantindo condutividade elétrica adequada. As imagens foram obtidas com tensão de aceleração de 20 kV, distância de trabalho (WD) de 9,9 mm e spot size de 5,0. Foram utilizadas duas ampliações principais: 400x (campo de visão de 746 µm) e 800x (campo de visão de 373 µm). As micrografias obtidas permitiram avaliar características morfológicas como porosidade, compactação, estrutura superficial e evidências de carbonização.

3.5 Difração de Raios X (DRX)

A DRX foi realizada com o equipamento Bruker-AXS D8 Advance Eco, operando a 40 kV e 25 mA, com radiação Cu K α (CETEM/UFRJ). Os difratogramas foram obtidos entre 2 θ = 5° e 80°, com passo de 0,02°, utilizando o detector LynxEye. A técnica permitiu identificar

fases cristalinas ou amorfas, contribuindo para a avaliação do grau de reorganização estrutural dos resíduos térmicos (CULLITY; STOCK, 2001; PECHARSKY; ZAVALIJ, 2009).

3.6. Ensaio de Inflamabilidade com Simulador de Duto

Com o intuito de avaliar a inflamabilidade dos resíduos graxos acumulados em sistemas de exaustão, foi desenvolvido um experimento térmico utilizando um simulador de duto. O aparato buscou reproduzir, em escala laboratorial, as condições críticas que podem ocorrer em cozinhas industriais, especialmente em situações de acúmulo de gordura e falha no sistema de ventilação.

O simulador foi construído a partir de um cubo metálico com estrutura interna em chapa de aço carbono n.º 18 e revestimento externo em chapa galvanizada. Entre essas camadas foi inserida uma manta de fibra cerâmica, com função isolante, a fim de reduzir perdas térmicas e manter o calor concentrado no interior da câmara. A parte superior do cubo foi projetada com aberturas ajustáveis, permitindo simular diferentes níveis de ventilação, desde fluxo livre até ambientes praticamente confinados.

No centro da base interna do cubo foi posicionada uma placa de aço inoxidável, sobre a qual os cadinhos metálicos contendo os resíduos foram acomodados. A fonte de calor consistiu na chama de um fogão a gás, ajustada para aquecer indiretamente a placa e, por consequência, os cadinhos — dessa forma, o calor foi transmitido por condução e convecção, simulando um superaquecimento localizado sem contato direto com a chama. A instrumentação térmica incluiu:

- Um termopar tipo K, posicionado sob o cadinho, entre a base metálica e o recipiente com o resíduo, para registrar a temperatura de aquecimento na região de maior contato térmico;
- Um termômetro infravermelho a laser, utilizado na região superior interna do cubo, próximo à saída de ar, com o objetivo de acompanhar a evolução da temperatura no ambiente confinado.

Cada ensaio foi conduzido com 20 g de amostra, previamente pesada e acondicionada em cadinhos metálicos padronizados. Os resíduos utilizados foram coletados em dutos de exaustão de cozinhas que operam com dois métodos de cocção distintos: chapa metálica (cerca de 218 °C) e *charbroiler* (em torno de 350 °C). Duas hipóteses experimentais foram testadas:

- Hipótese A – Ignição com chama externa: O sistema foi previamente aquecido até atingir temperaturas crescentes, em seguida, aplicou-se uma chama controlada sobre a superfície da amostra. O objetivo era avaliar a suscetibilidade do resíduo à ignição induzida, observando o momento exato da combustão. A ignição foi considerada positiva quando a chama persistiu por mais de cinco segundos após a retirada da fonte externa.
- Hipótese B – Ignição espontânea por aquecimento contínuo: Neste cenário, a ventilação da câmara foi severamente restringida e o aquecimento foi mantido de forma progressiva, sem aplicação de qualquer chama ou centelha. O intuito foi verificar se as amostras seriam capazes de entrar em combustão espontânea apenas pelo acúmulo de calor e liberação de vapores inflamáveis. A observação foi feita continuamente, e a ignição foi identificada visualmente por clarões ou chamas.

Durante os ensaios, notou-se um fenômeno importante: em algumas amostras, após a extinção manual da chama, o sistema voltou a entrar em combustão poucos segundos depois, sem qualquer novo estímulo externo. Esse comportamento, classificado como reignição espontânea, foi atribuído à manutenção de temperaturas elevadas no interior do simulador e à liberação contínua de compostos voláteis como ácidos graxos oxidados, aldeídos e cetonas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos a partir da caracterização dos resíduos graxos acumulados em sistemas de exaustão de cozinhas industriais permitiram avaliar como o tipo de cocção influencia diretamente a composição físico-química e o comportamento térmico desses materiais.

Os resíduos apresentaram diferenças visuais marcantes em função do processo térmico empregado. Nas amostras da chapa metálica (218 °C), observou-se material com aspecto oleoso, brilho superficial e superfície relativamente uniforme, características que indicam preservação parcial da fração lipídica. Em contrapartida, os resíduos oriundos do *charbroiler* (350 °C) mostraram-se mais rígidos, fragmentados e com superfície irregular, aspectos compatíveis com uma degradação térmica mais acentuada. Essas distinções macroscópicas, ilustradas nas Figuras 15 e 16, constituem evidências preliminares da influência do método de cocção sobre a estabilidade térmica e a composição química dos resíduos analisados.

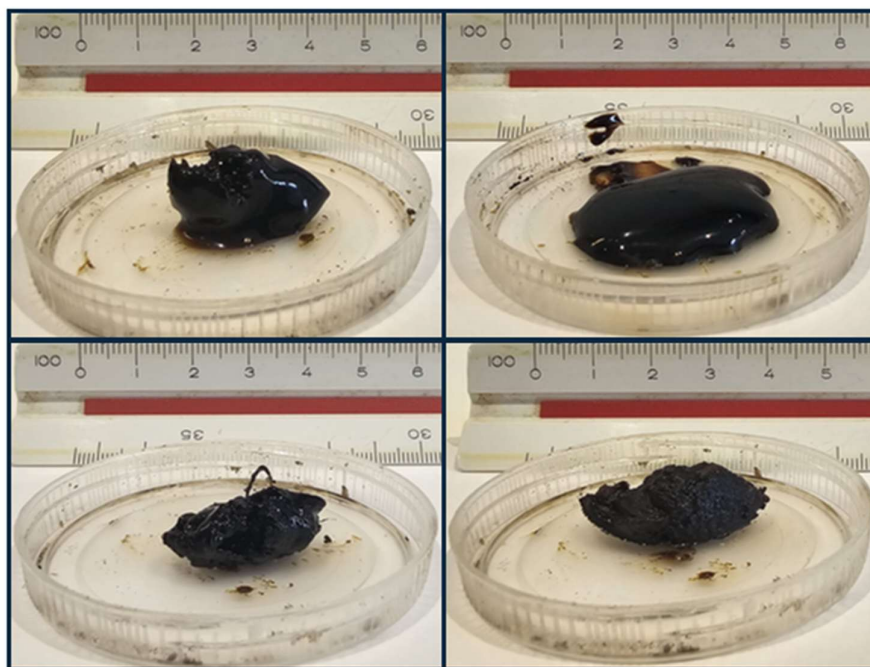


Figura 15 - Aspecto visual das amostras provenientes da chapa metálica.

Fonte: Autoria Própria (2024)

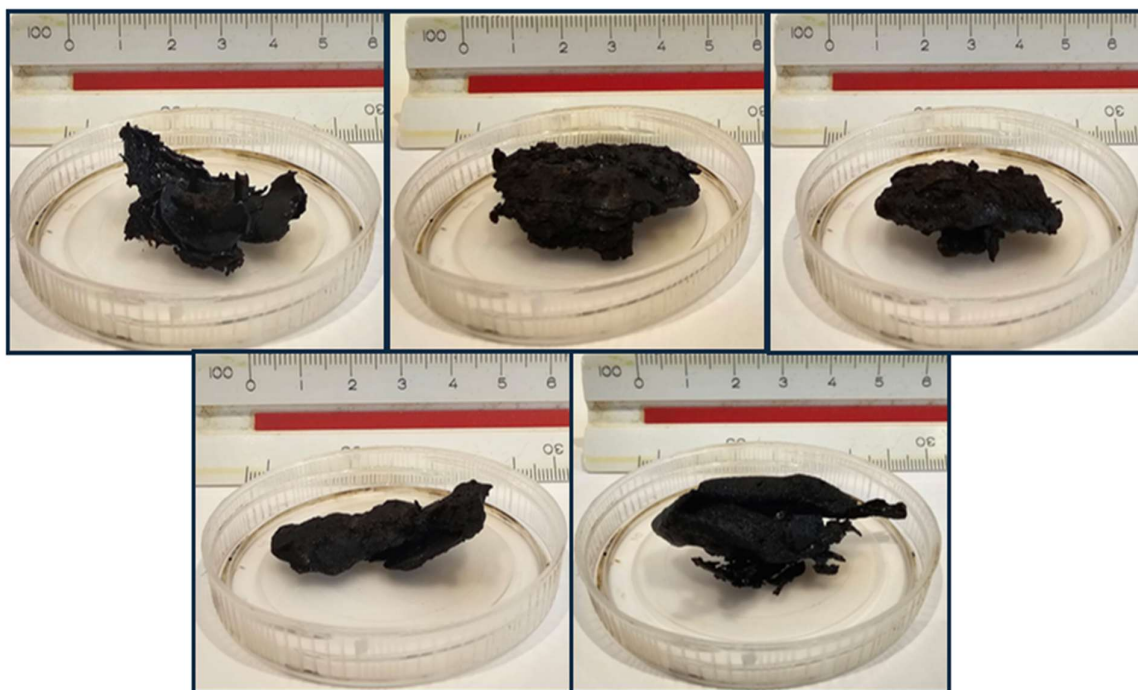


Figura 16 - Aspecto visual das amostras provenientes do *charbroiler*.

Fonte: Autoria Própria (2024)

Essa diferença de regime térmico entre os sistemas impacta não apenas a quantidade de gordura residual gerada, mas também sua estrutura química, o grau de degradação, o perfil lipídico e o risco associado à inflamabilidade. A seguir, cada técnica analítica aplicada é discutida individualmente, considerando as características específicas dos resíduos de cada sistema e explorando as implicações desses achados no contexto da segurança e da manutenção de cozinhas comerciais.

4.1 Análise por FTIR – Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier

A espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) é uma técnica que permite identificar grupos funcionais a partir da absorção seletiva de radiação infravermelha, associada às vibrações moleculares das ligações químicas. Essa abordagem fornece informações relevantes sobre a composição e o grau de degradação térmica dos materiais analisados.

No espectro da chapa metálica (Figura 17), observou-se uma banda em $3673,9\text{ cm}^{-1}$, associada ao estiramento O–H livre. Entretanto, essa atribuição deve ser feita com cautela, pois a baixa intensidade dessa absorção indica a presença restrita de umidade superficial, coerente

com o caráter predominantemente apolar do sistema (SMITH, 2011). Também foram registradas as bandas em $3276,7\text{ cm}^{-1}$ e $3234,2\text{ cm}^{-1}$, associadas ao O–H de ácidos carboxílicos (SMITH, 2011). A região de $2937,2\text{ cm}^{-1}$ indicou estiramento assimétrico de CH_2 , relacionado às cadeias alifáticas de ácidos graxos (SILVERSTEIN et al., 2014). Além disso, verificou-se a presença de aldeídos e oxidantes intermediários em $2684,6\text{ cm}^{-1}$, bem como de peróxidos e cetonas voláteis em $2655,7\text{ cm}^{-1}$ (PEREIRA; CAVALCANTI, 2014). Outras bandas relevantes incluíram $1546,7\text{ cm}^{-1}$, atribuída a carbonilas conjugadas, e $1477,3\text{ cm}^{-1}$, associada a grupos metila ($-\text{CH}_3$) (ZHUANG et al., 2022).

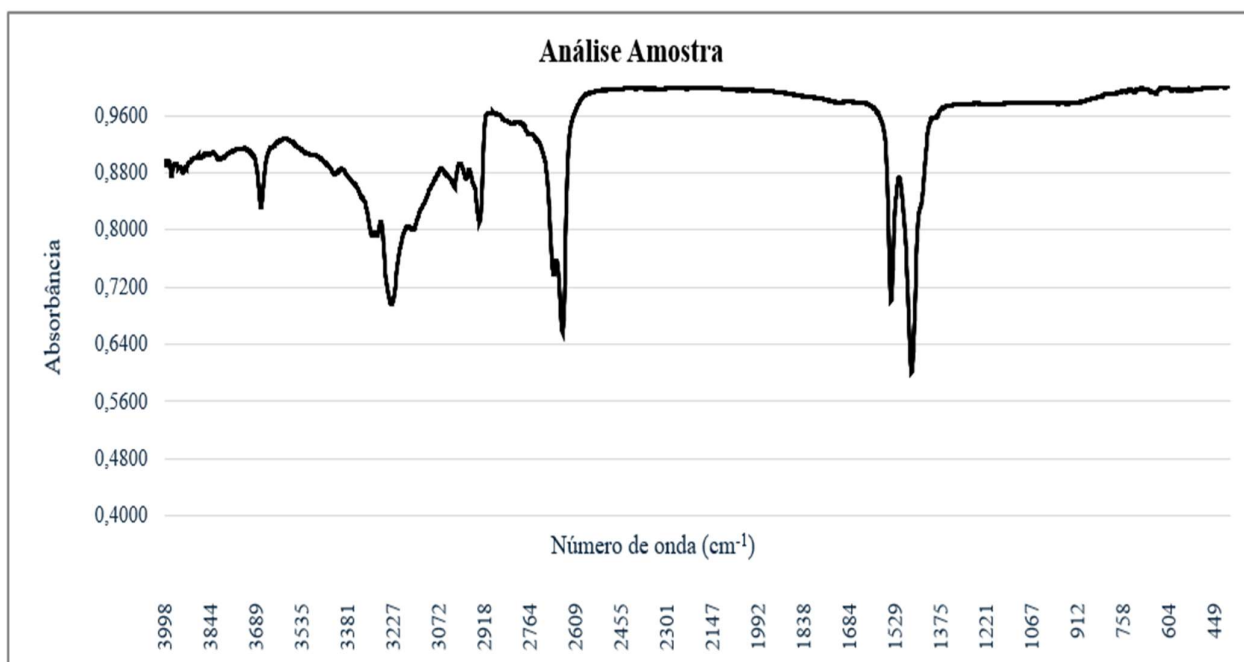


Figura 17 – Espectro de FTIR proveniente da cocção por chapa metálica

Fonte: Autoria própria (2025)

Já o espectro do *charbroiler* (Figura 18) apresentou menor número de bandas e intensidades reduzidas. Foram identificadas a banda em $3673,9\text{ cm}^{-1}$, relacionada ao estiramento O–H livre (SMITH, 2011), e outra em $3301,7\text{ cm}^{-1}$, atribuída ao O–H de ácidos carboxílicos (SMITH, 2011). O estiramento assimétrico de CH_2 foi registrado em $2935,3\text{ cm}^{-1}$, confirmando a presença de cadeias alifáticas de ácidos graxos (SILVERSTEIN et al., 2014). Além disso, observaram-se bandas associadas a processos oxidativos, como em $2686,5\text{ cm}^{-1}$, atribuída a aldeídos e oxidantes intermediários (PEREIRA; CAVALCANTI, 2014). Por fim, verificaram-se as bandas em $1546,7\text{ cm}^{-1}$, correspondente a carbonilas conjugadas, e $1475,4\text{ cm}^{-1}$, associada a grupos metila ($-\text{CH}_3$) (ZHUANG et al., 2022).

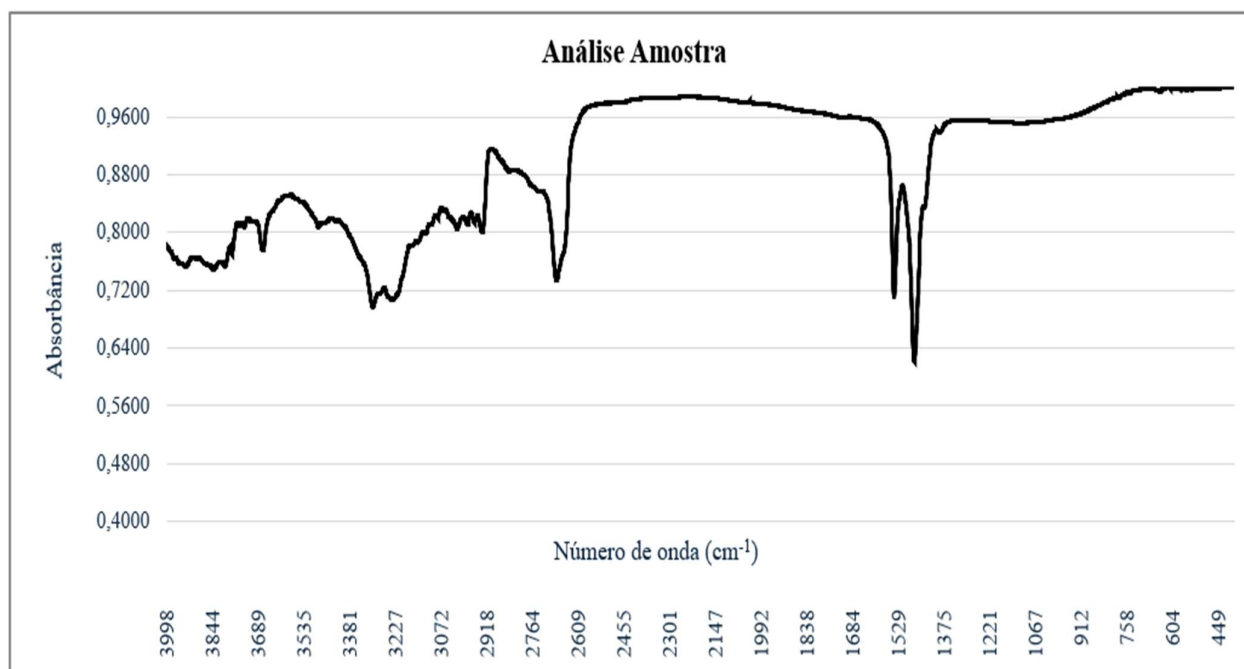


Figura 18 – Espectro de FTIR proveniente da cocção por *charbroiler*.

Fonte: Autoria própria (2025)

A análise comparativa evidencia que, embora ambas as amostras apresentem bandas típicas de compostos graxos, o resíduo do *charbroiler* exhibe número menor de bandas e intensidades reduzidas nas regiões atribuídas a lipídeos. Esse padrão é consistente com um processo de degradação térmica mais acentuado, favorecido pela operação em temperatura mais elevada, que acelera a quebra de cadeias alifáticas e a formação de estruturas parcialmente carbonizadas.

Em contrapartida, o resíduo da chapa metálica apresenta espectro mais complexo, com presença de bandas adicionais (peróxidos e cetonas voláteis) e maior intensidade em bandas de cadeias alifáticas. Isso sugere degradação menos severa, compatível com a menor temperatura operacional, preservando uma fração lipídica mais diversificada.

Temperaturas mais elevadas em sistemas de cocção promovem diminuição de bandas dos espectros FTIR, com redução de bandas associadas a cadeias alifáticas (WANG et al., 2020). De modo semelhante, verificou-se aumento da oxidação lipídica em resíduos submetidos a regimes térmicos intensos (MELGAR-LALANNE et al., 2022), o que reforça os achados deste trabalho. Por outro lado, poucos estudos documentam diretamente resíduos formados em sistemas de exaustão de cozinhas comerciais, o que destaca a originalidade da presente análise.

Os resultados de FTIR demonstram que o regime térmico exerce papel central na degradação dos resíduos graxos. Enquanto o *charbroiler* gera resíduos mais oxidados e quimicamente simplificados, a chapa metálica preserva compostos mais variados, incluindo intermediários de oxidação. Essas diferenças ajudam a compreender não apenas o processo de degradação lipídica, mas também os potenciais riscos associados à inflamabilidade dos resíduos, aspecto explorado nas próximas seções.

4.2 Cromatografia Gasosa

A cromatografia gasosa foi aplicada para identificar e quantificar os principais ácidos graxos presentes nos hambúrgueres crus e nos resíduos depositados nos dutos de exaustão. Essa técnica permitiu avaliar as transformações térmicas sofridas pela fração lipídica e como essas alterações impactam no comportamento dos resíduos, conforme Figura 19.

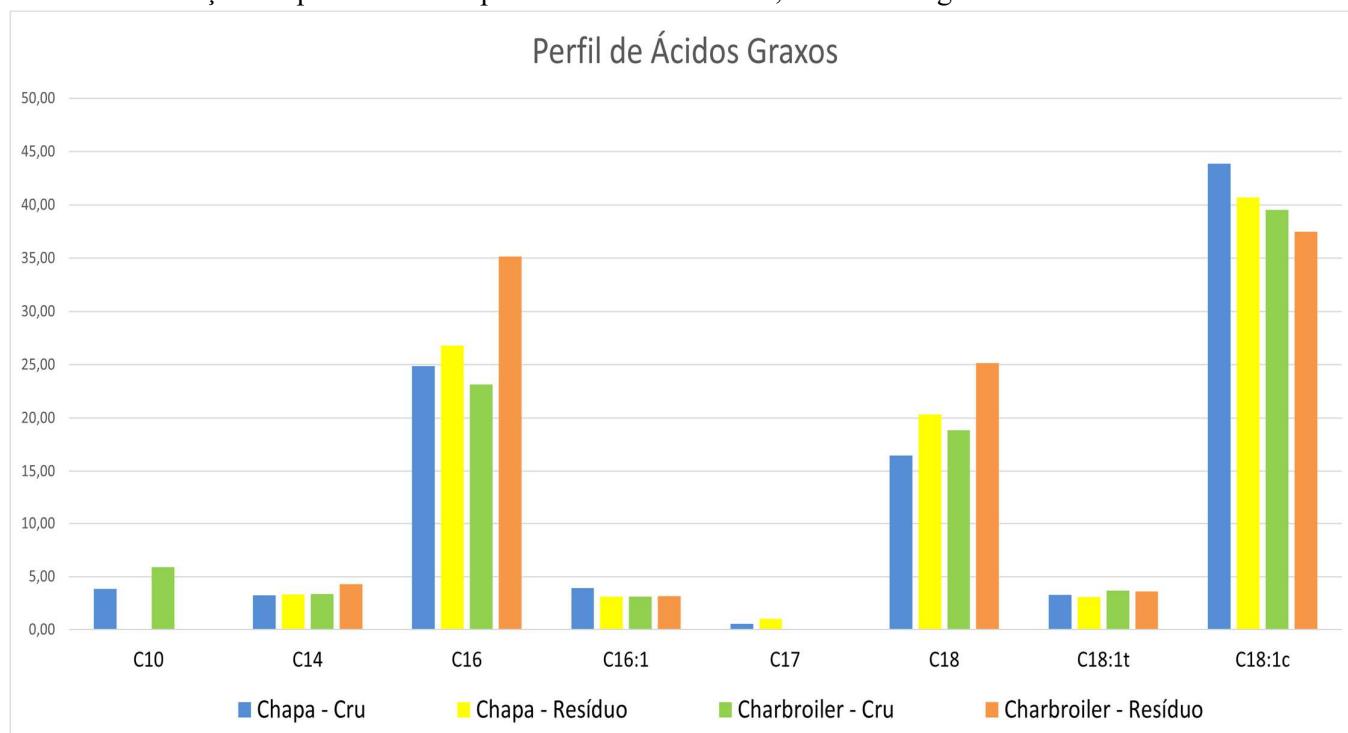


Figura 19 - Perfil lipídico do hambúrguer e do resíduo da chapa metálica e do *charbroiler*.

Fonte: Autoria Própria (2025)

As análises revelaram a presença predominante de oito ácidos graxos principais: cáprico (C10), mirístico (C14), palmítico (C16), palmitoleico (C16:1), esteárico (C18), eláidico (C18:1t) e oleico (C18:1c). Esses compostos são característicos de hambúrgueres bovinos e sofrem diferentes graus de alteração durante a cocção.

Nos hambúrgueres crus, conforme Tabela 2, o ácido oleico (C18:1c) foi o componente majoritário em ambas as lojas, representando 43,84% na amostra da chapa metálica e 39,54% na do *charbroiler*. O segundo mais abundante foi o ácido palmítico (C16), com 24,89% e 23,16%, respectivamente. Esses resultados indicam o C18:1c como predominante em carnes bovinas, seguido pelo C16 (RIBEIRO et al., 2020; LEE et al., 2021).

Ácidos graxos como o C14 (mirístico) e o C16:1 (palmitoleico) foram detectados em concentrações menores, porém semelhantes entre os hambúrgueres crus destinados à cocção na chapa metálica e no *charbroiler*, refletindo a composição lipídica característica da carne bovina. O C10 (cáprico), um ácido graxo de cadeia média e alta volatilidade, apresentou teores baixos nas amostras cruas, 3,82% na chapa metálica e 5,88% no *charbroiler*, característica que antecipa sua completa ausência nos resíduos pós-cocção, já que tende a evaporar ou se decompor rapidamente quando submetido ao calor.

O ácido esteárico (C18), saturado e de cadeia longa, apresentou participação relevante já nas amostras cruas, com 16,49% na chapa metálica e 18,86% no *charbroiler*, valores que se mantêm consistentes com o perfil lipídico típico de carnes bovinas. Já o ácido elaídico (C18:1t), isômero trans do oleico, esteve presente em proporções mais baixas (3,26% na chapa e 3,67% no *charbroiler*). Esse isômero é mais estável ao calor do que os insaturados cis, mas ainda suscetível à oxidação em temperaturas elevadas (FRANKEL, 2014; CHOW, 2007), o que contribui para sua redução nos resíduos pós-cocção. Sua presença pode estar relacionada tanto à gordura bovina quanto a processos de hidrogenação parcial (MARTIN et al., 2004).

O ácido heptadecanoico (C17), um ácido graxo saturado de cadeia ímpar típico de lipídios de origem ruminante, foi detectado apenas em uma amostra e em baixas concentrações nas amostras cruas. Embora sua participação percentual seja pequena, sua presença reforça a origem bovina da matéria-prima (RUIZ et al., 2004; JENKINS et al., 2008).

Esse perfil inicial estabelece a referência necessária para avaliar o impacto do aquecimento, permitindo identificar quais compostos são mais estáveis ou mais suscetíveis à degradação térmica.

Tabela 2: Cromatografia gasosa hambúrguer cru.

Hamburguer Cru - Chapa Metálica						
Ác Graxo	TR (min)	Área 1	% (V/V)	Área 2	% (V/V)	% média
C10	15,91	55839	3,31	24796	4,33	3,82
C14	25,02	53930	3,19	18801	3,28	3,24
C16	29,80	423402	25,08	141423	24,70	24,89
C16:1	31,47	65204	3,86	22807	3,98	3,92
C17	32,14	18438	1,09	0	0,00	0,55
C18	34,63	281874	16,69	93210	16,28	16,49
C18:1t	35,81	53693	3,18	19105	3,34	3,26
C18:1c	36,21	736038	43,59	252459	44,09	43,84
Hamburguer Cru – Charbroiler						
Ác Graxo	TR (min)	Área1	% (v/V)	Área 2	% (V/V)	% média
C10	15,97	64830	3,84	45309	7,91	5,88
C14	25,09	48397	2,87	22144	3,87	3,37
C16	29,86	333564	19,76	152068	26,56	23,16
C16:1	31,54	44353	2,63	20835	3,64	3,13
C17	32,14	0	0,00	0	0,00	0,00
C18	34,70	266308	15,77	125693	21,95	18,86
C18:1t	35,88	53786	3,19	23749	4,15	3,67
C18:1c	36,28	567777	33,63	260280	45,46	39,54

Fonte - Autoria Própria (2025)

Após a cocção, os perfis lipídicos dos resíduos graxos depositados nos dutos apresentaram alterações consistentes com a estabilidade térmica dos diferentes ácidos graxos, conforme Tabela 3. Em ambas as condições, chapa metálica e *charbroiler*, observou-se aumento relativo dos ácidos graxos saturados de cadeia longa, como o palmítico (C16) e o esteárico (C18). Essa tendência é explicada pela maior resistência desses compostos à degradação térmica e oxidativa, uma vez que não possuem ligações duplas suscetíveis à oxidação, resultando em sua retenção preferencial nos resíduos sólidos (FRANKEL, 2014; GUNSTONE, 2004).

Por outro lado, os ácidos graxos insaturados apresentaram maior suscetibilidade à degradação térmica, sobretudo no *charbroiler*, cujo processo atinge temperaturas mais elevadas (cerca de 350 °C). A perda do ácido oleico (C18:1c) está relacionada à menor estabilidade térmica do isômero cis, cuja conformação dobrada deixa a dupla ligação mais exposta ao ataque de radicais livres e oxigênio, favorecendo a oxidação e a consequente formação de compostos secundários, como aldeídos e cetonas (FRANKEL, 2014; GUNSTONE et al., 2007; CHOW, 2007).

O ácido elaídico (C18:1t), isômero trans do oleico, mostrou-se mais resistente à

degradação. Sua conformação linear, semelhante à de ácidos graxos saturados, permite uma organização mais eficiente das moléculas, formando estruturas mais densas e estáveis. Esse arranjo reduz a mobilidade molecular e dificulta a penetração de oxigênio, conferindo menor potencial oxidativo e maior estabilidade ao calor. Dessa forma, a redução de C18:1t foi menos pronunciada, especialmente na chapa metálica, reforçando que a geometria trans oferece vantagem em ambientes térmicos moderados (GUNSTONE et al., 2007; CHOW, 2007; MARTIN et al., 2004).

O C10 (ácido cáprico), por ser um ácido graxo de cadeia média e alta volatilidade, esteve ausente nos resíduos de ambas as condições, confirmando sua eliminação precoce durante a cocção. Já o C14 (ácido mirístico) e o C16:1 (ácido palmitoleico) apresentaram variações discretas, mas mantiveram níveis residuais, sugerindo que, embora menos estáveis que saturados de cadeia longa, podem persistir parcialmente mesmo após aquecimento.

No conjunto, os resultados indicam que o ambiente térmico mais severo do *charbroiler* intensifica a oxidação dos ácidos graxos insaturados, reduzindo os teores de isômeros cis e resultando em resíduos com maior proporção de saturados, estruturalmente mais densos e menos voláteis. Já a chapa metálica, por operar a temperaturas mais baixas, preserva uma fração maior de insaturados, o que leva à formação de resíduos menos densos, porém mais suscetíveis à liberação de compostos voláteis e produtos secundários da oxidação lipídica.

Tabela 3: Cromatografia gasosa resíduo

Resíduo - Chapa Metálica						
Ác Graxo	TR (min)	Área 1	% (V/V)	Área 2	% (V/V)	% media
C10	15,91	0	0,00	0	0,00	0,00
C14	25,02	129876	3,31	196958	3,29	3,30
C16	29,80	1055173	26,90	1601186	26,73	26,82
C16:1	31,47	121293	3,09	186078	3,11	3,10
C17	32,14	40087	1,02	59372	0,99	1,01
C18	34,63	806939	20,57	1204825	20,12	20,35
C18:1t	35,81	122114	3,11	182139	3,04	3,08
C18:1c	36,21	1646754	41,99	2358607	39,38	40,68
Resíduo – Charbroiler						
Ác Graxo	TR (min)	Área1	% (v/V)	Área 2	% (V/V)	% média
C10	15,97	0	0,00	0	0,00	0,00
C14	25,09	26300	3,74	27641	4,83	4,28
C16	29,86	217228	30,90	225633	39,40	35,15
C16:1	31,54	19568	2,78	20276	3,54	3,16
C17	32,14	0	0,00	0	0,00	0,00
C18	34,70	155966	22,18	160915	28,10	25,14

Ác Graxo	TR (min)	Área1	% (v/V)	Área 2	% (V/V)	% média
C18:1t	35,88	21843	3,11	23481	4,10	3,60
C18:1c	36,28	262205	37,29	215861	37,70	37,50

Fonte: Autoria própria (2025)

Os resultados observados neste estudo estão alinhados com achados de outros autores, que descrevem que a carne bovina apresenta o ácido oleico (C18:1c) como principal insaturado, seguido pelo palmítico (C16), exatamente como verificado nas amostras cruas (RIBEIRO et al., 2020; LEE et al., 2021).

Vale destacar, entretanto, que o ácido linoleico (C18:2), frequentemente relatado em proporções menores na carne bovina, não foi detectado nas amostras analisadas, nem mesmo no hambúrguer cru. Essa ausência pode estar relacionada à baixa concentração natural desse ácido graxo na matéria-prima utilizada (WOOD et al., 2008; RAES et al., 2004), ou a limitações do método analítico empregado (MANSO et al., 2005).

Sistemas de cocção em calor intenso favorecem a rápida oxidação de ácidos graxos poli e monoinsaturados, promovendo a formação de compostos secundários voláteis (MELGAR-LALANNE et al., 2022). Essa tendência foi igualmente constatada aqui: os resíduos obtidos no *charbroiler* apresentaram maior proporção relativa de saturados e menor diversidade de insaturados preservados. Em contrapartida, a chapa metálica, por operar a temperaturas mais moderadas, manteve parte relevante da fração insaturada, o que corrobora resultados descritos em processos de cocção a temperaturas mais brandas (SILVA et al., 2019).

De forma geral, a cromatografia gasosa evidenciou que o perfil lipídico inicial dos hambúrgueres crus está de acordo com o descrito para carne bovina, tendo o oleico (C18:1c) e o palmítico (C16) como principais constituintes. Durante a cocção, houve enriquecimento relativo de saturados (C16 e C18) e redução dos insaturados, sendo esta mais acentuada no *charbroiler* devido ao regime térmico mais severo. O *charbroiler* gera resíduos mais densos, ricos em saturados e menos voláteis, enquanto a chapa metálica preserva insaturados em maior proporção, o que pode favorecer a formação de produtos oxidativos secundários.

Assim, a cromatografia gasosa confirma e aprofunda as observações feitas pelo FTIR, demonstrando que o tipo de cocção impacta diretamente a composição lipídica final dos resíduos e, consequentemente, sua estabilidade química e risco de inflamabilidade. Esse conjunto de evidências reforça que a combinação entre comprimento da cadeia carbônica e hibridização (sp^3 nos saturados e sp^2 nos insaturados) é determinante para compreender a persistência ou a degradação dos ácidos graxos, e, portanto, o comportamento térmico e inflamável dos resíduos graxos em sistemas de exaustão.

4.3 Difração de Raios X

A técnica de difração de raios X foi utilizada com o objetivo de investigar a cristalinidade dos resíduos graxos acumulados nos sistemas de exaustão de cozinhas industriais. As amostras analisadas correspondem a resíduos coletados após o preparo de hambúrgueres em dois equipamentos com diferentes condições térmicas.

Para uma análise comparativa mais clara e representativa, foi selecionada uma amostra de cada tipo de cocção, chapa metálica e *charbroiler*, Figura 20. Ambas revelaram três halos amorfos, indicando a presença de componentes semicristalinos nos resíduos.

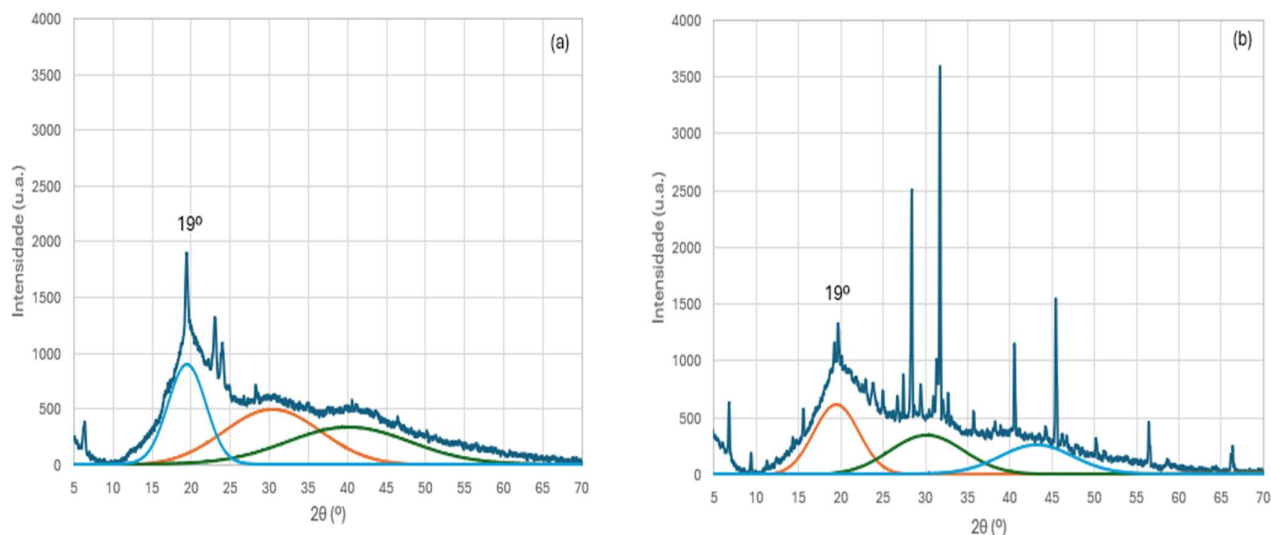


Figura 20- Difração de Raios X (a) chapa metálica (b) *charbroiler*

Fonte: Autoria Própria (2025)

Em ambas as amostras foram observados picos de difração, sendo o principal em 19,49° (2θ) o mais relevante, pois corresponde à ordem de cadeias alifáticas (segmentos CH₂). Esse sinal é considerado um marcador da fase lipídica semicristalina, associado à organização parcial das caudas hidrocarbonadas (SATO, 2001; HIMAWAN et al., 2006).

Na amostra proveniente da chapa metálica, o pico em 19,49° apresentou intensidade máxima de 766 u.a sugerindo maior preservação da ordem alifática. Esses parâmetros indicam a presença de domínios semicristalinos pequenos, mas relativamente bem definidos, refletindo menor grau de degradação estrutural.

Já na amostra obtida no *charbroiler*, o mesmo pico apresentou intensidade reduzida

(352,06 u.a). Esses valores sugerem que, sob o regime térmico mais severo do *charbroiler*, ocorre desorganização parcial das cadeias alifáticas, resultando em domínios menores e menos coesos. O aquecimento intenso favorece transições de fase em lipídios e redução da cristalinidade devido à oxidação e quebra de cadeias (CAMPOS et al., 2010; MARANGONI; MCGAULEY, 2003).

De modo geral, os resultados obtidos aqui convergem com observações que identificaram que a intensidade e definição do pico $2\theta = (19 - 20^\circ)$ variam de acordo com o histórico térmico do material, sendo mais bem preservadas em condições de aquecimento brando (RIBEIRO et al., 2020).

Observou-se que a chapa metálica favorece maior organização alifática, o *charbroiler* promove degradação mais acentuada, reduzindo a intensidade e a definição do pico associados à organização dos lipídeos. Essa diferença reforça a ideia de que a severidade térmica do processo é determinante na estabilidade estrutural dos resíduos graxos, corroborando achados prévios sobre o impacto do calor na cristalinidade lipídica (SATO, 2001; HIMAWAN et al., 2006).

4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura foi empregada para explorar a morfologia superficial dos resíduos graxos acumulados nos sistemas de exaustão, revelando detalhes texturais que vão além da observação macroscópica. A técnica permitiu visualizar, com nitidez, características como porosidade, fragmentação, compactação e formação de cavidades, todas fundamentais para compreender a estabilidade térmica e o comportamento físico desses materiais.

As imagens obtidas para o resíduo do *charbroiler*, exposto a temperaturas elevadas em torno de 350 °C, revelaram uma superfície visualmente mais instável e heterogênea, conforme Figura 21. É possível observar fragmentos dispersos e cavidades irregulares. Essa morfologia é condizente com um processo de cocção mais agressivo, capaz de induzir liberação intensa de voláteis e ruptura da matriz graxa, deixando espaços vazios e estruturas parcialmente carbonizadas (ZHANG et al., 2012; CHOE; MIN, 2007; MELGAR-LALANNE et al., 2022).

Esta estrutura implica em aumento significativo da área superficial exposta. Essa característica estrutural potencializa a difusão de oxigênio e a interação com radicais livres, acelerando reações de oxidação lipídica. Superfícies mais porosas e irregulares são

energeticamente menos estáveis, o que favorece tanto a degradação progressiva da matriz graxa quanto a liberação de compostos voláteis inflamáveis (FRANKEL, 2014; GUNSTONE et al., 2007).

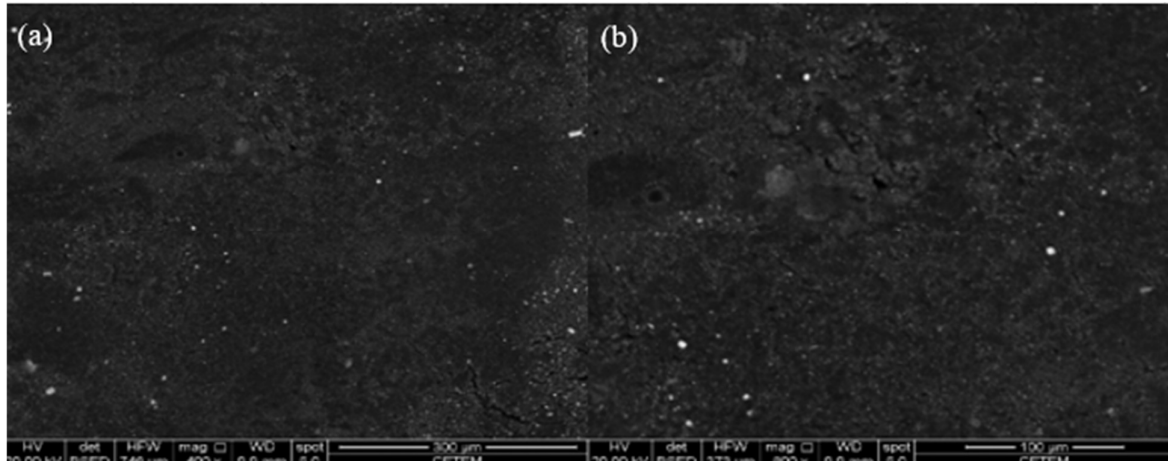


Figura 21: Imagens MEV da amostra de resíduo proveniente de loja com produção *charbroiler*. (a) imagem obtida com aumento de 400× e escala de 300 µm. (b), aumento de 800× e escala de 100 µm.

Fonte: Autoria própria (2025)

Em contraste, a amostra da loja que utiliza chapa metálica, submetida a temperaturas mais amenas, próximas de 218 °C, apresentou uma morfologia superficial bastante distinta. As imagens, conforme Figura 22, mostraram uma superfície contínua, com ausência de cavidades evidentes, um padrão lamelar mais uniforme e textura menos rugosa, sugerindo que o processo de cocção neste caso tenha resultado em um resíduo mais estável.

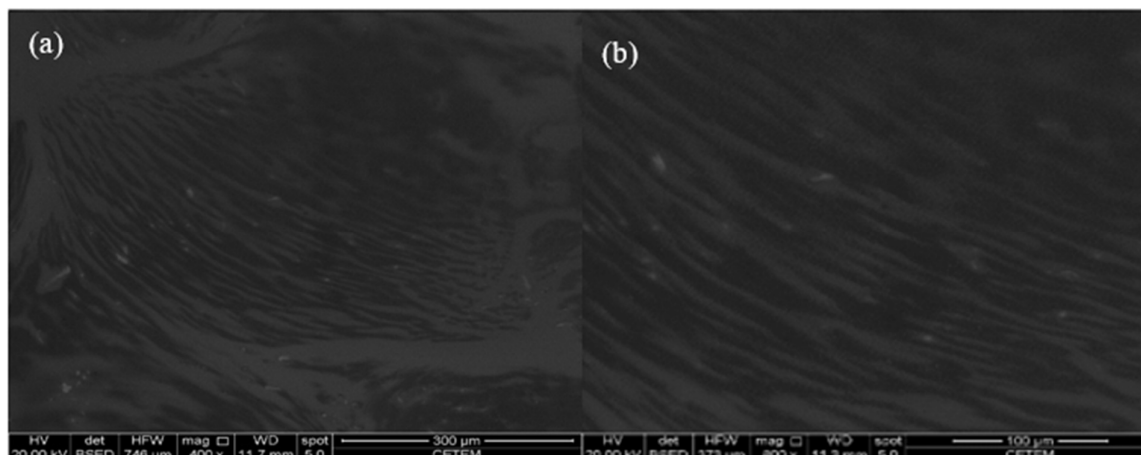


Figura 22: Imagens MEV da amostra de resíduo graxo proveniente de loja com chapa metálica. (a) imagem obtida com aumento de 400× e escala de 300 µm. (b), aumento de 800× e escala de 100 µm.

Fonte: Autoria própria (2025)

Essas diferenças morfológicas auxiliam na interpretação dos resultados físico-químicos obtidos em outras análises. A maior porosidade dos resíduos do *charbroiler* pode favorecer o aprisionamento de vapores e partículas voláteis, contribuindo para maior risco de ignição e dificultando a remoção dos depósitos acumulados. Já os resíduos formados na chapa metálica, ao apresentarem superfície mais contínua e menor porosidade, indicam menor área superficial disponível para reações oxidativas, o que se traduz em maior resistência térmica e menor suscetibilidade à ignição espontânea (FRANKEL, 2014; GUNSTON et al., 2007; ZHANG et al., 2012; CHOE; MIN, 2007).

4.5 Ensaio de Saponificação

O ensaio de saponificação teve como objetivo quantificar a fração lipídica e saponificável presente nos resíduos graxos acumulados nos dutos de exaustão e, sobretudo, avaliar em que medida essa gordura ainda se encontra quimicamente preservada ou já degradada. Para isso, a análise separa a gordura em duas parcelas principais: matéria saponificável, que corresponde à parte graxa capaz de reagir com base e formar sabões (isto é, triglicerídeos e ácidos graxos livres preservados), e matéria insaponificável, composta por substâncias que não reagem, como produtos de oxidação avançada, polímeros, resinas e compostos carbonizados. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4: Resultados do ensaio de saponificação para resíduos em diferentes equipamentos

Parâmetro	<i>Charbroiler</i>	Chapa Metálica
Massa da amostra (g)	10,44	10,65
Massa lipídica (g)	3,03 (29,02%)	8,44 (79,25%)
Matéria insaponificável (g)	2,15(20,60%)	7,72 (72,48%)
Matéria saponificável (g)	0,87 (8,33%)	0,72 (6,76%)

Fonte: Autoria própria (2025)

Os resultados evidenciam diferenças entre as amostras, a amostra proveniente da chapa metálica apresentou maior teor lipídico, com 79,25%, enquanto o resíduo do *charbroiler* registrou 29,02%. Essa diferença pode estar relacionada às características do processo de cocção, já que a chapa metálica, por operar em temperatura mais baixa, tende a originar resíduos com maior preservação da fração lipídica. Por outro lado, o *charbroiler*, que utiliza calor por radiação, chama direta e temperaturas maiores, promove a queima parcial de lipídios durante a

cocção, resultando em menor carga graxa nos dutos (DOMÍNGUEZ et al., 2014; AOYAMA et al., 2018; WU et al., 2019).

Apesar disso, quando se avalia a fração saponificável, nota-se que em ambas as amostras os valores foram baixos em relação ao total da massa: 8,33% no *charbroiler* e 6,76% na chapa metálica. Isso indica que, independentemente do volume de gordura acumulado, a maior parte já se encontra em estado avançado de degradação, transformada em compostos insaponificáveis.

A diferença se torna mais evidente quando se considera a proporção relativa dentro da própria fração lipídica. No *charbroiler*, aproximadamente 28,71% da gordura extraída ainda era saponificável, sugerindo a preservação parcial de ácidos graxos não degradados. Na chapa metálica, em contraste, apenas 8,53% da gordura extraída manteve caráter saponificável, enquanto a grande maioria (72,48% da amostra total) já havia se convertido em produtos insaponificáveis.

A elevada proporção de compostos insaponificáveis aponta para a presença de substâncias oxidadas, resinificadas ou parcialmente carbonizadas, com características químicas alteradas (FRANKEL, 2014; GUNSTONE, 2004; CHOW, 2007). Esse comportamento está em consonância com os resultados de FTIR e MEV, que também evidenciaram degradação acentuada da matriz lipídica.

4.6 Teste de Inflamabilidade

O ensaio de inflamabilidade teve como objetivo avaliar o comportamento térmico dos resíduos graxos acumulados em dutos de exaustão, determinando a faixa de temperatura necessária para ocorrência de ignição sob chama externa, o ponto de ignição espontânea em ambiente confinado e a possibilidade de reignição. Esses parâmetros são fundamentais para compreender o risco de incêndio associado a diferentes condições de cocção e para estabelecer correlações entre a composição química dos resíduos e seu desempenho frente ao calor.

O procedimento experimental foi conduzido em duas etapas. Na primeira, os resíduos foram submetidos a aquecimento progressivo em cadinhos metálicos, dispostos sobre uma placa de aço inoxidável aquecida por chama de fogão a gás, sem contato direto com a chama. A cada patamar de temperatura, aplicava-se uma chama externa sobre a amostra, com o objetivo de simular a faixa térmica necessária para ocorrência de ignição visível. Na segunda etapa, o sistema foi mantido parcialmente fechado, com ventilação restrita, e as amostras foram

aquecidas continuamente, sem aplicação de chama externa, para simular o ponto de ignição espontânea.

Durante os ensaios, foi possível observar a emissão de fumaça branca antecedendo os eventos de ignição em todas as amostras, evidenciando o início da pirólise térmica e a liberação de vapores inflamáveis. Em alguns casos, mesmo após a extinção da chama, a amostra voltou a inflamar espontaneamente após alguns segundos, indicando a permanência de condições críticas no sistema e caracterizando o fenômeno de reignição espontânea.

Na etapa com aplicação de chama, os resíduos do *charbroiler* apresentaram ignição visível em temperaturas superiores a 250 °C, enquanto os resíduos da chapa metálica só inflamaram a partir de temperaturas acima de 280 °C, Tabela 5. Esse resultado pode parecer contraditório, uma vez que os resíduos do *charbroiler* apresentaram, conforme observado na cromatografia gasosa, maior proporção relativa de ácidos graxos saturados que compostos mais estáveis e, segundo o teste de saponificação, menor massa lipídica total em comparação aos resíduos da chapa metálica. Entretanto, verificou-se que a fração lipídica e saponificável foi proporcionalmente maior no *charbroiler*, o que pode contribuir para sua maior suscetibilidade à ignição. Além disso, quando a análise é ampliada para considerar frações não lipídicas, que não foram objeto desta pesquisa, em especial a fuligem carbonizada, o comportamento térmico observado torna-se plausível.

Estudos indicam que a fuligem, formada pela combustão incompleta da gordura em contato direto com a chama, contém partículas de carbono elementar e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos altamente reativos, que reduzem a temperatura necessária para ignição (ZIDONG; YONG, 2017; OLSON et al., 2009). Essa característica explica por que os resíduos do *charbroiler* inflamaram em temperaturas mais baixas, pois a fração saponificável representa 28% da gordura total. Já nos resíduos da chapa metálica, com apenas 8% de gordura saponificável em relação a gordura total, elevou a faixa de ignição espontânea, ainda que, uma vez em combustão, resultem em incêndios mais sustentados e difíceis de extinguir (GRIFFIN; MORGAN, 2014).

Os resultados reforçam que o risco de incêndio em dutos não pode ser avaliado apenas pelo teor lipídico, mas deve considerar também a fuligem e outros compostos não lipídicos formados durante a cocção, que apresentam elevada reatividade e contribuem para a ignição (OLSON et al., 2009; ZIDONG; YONG, 2017). Embora essas frações não tenham sido objeto de análise direta neste estudo, sua influência sobre a inflamabilidade é evidente. Essa constatação ressalta a importância de protocolos de limpeza mais rigorosos em sistemas com

charbroiler, onde a combinação entre fuligem e lipídios degradados cria um ambiente altamente propenso à ignição.

No ensaio de ignição espontânea, as diferenças entre os resíduos se tornaram ainda mais evidentes. O resíduo do *charbroiler* entrou em combustão espontânea a partir de aproximadamente 360 °C, enquanto o da chapa metálica exigiu temperaturas superiores a 400 °C para inflamar sem fonte externa, Tabela 5. Em ambas as amostras, observou-se emissão intensa de fumaça branca antes da ignição, sendo essa mais evidente no resíduo do *charbroiler*.

Tabela 5 – Faixas de temperatura de ignição observadas nos ensaios térmicos.

Tipo de cocção	Ignição com chama externa(°C)	Ignição espontânea (°C)	Reignição espontânea
<i>Charboiler</i>	>250	>360	Observada
Chapa metálica	>280	>400	Observada

Fonte: Autoria própria (2025)

De forma geral, os dados obtidos demonstram que embora ambos os resíduos sejam inflamáveis, os resíduos oriundos da cocção com *charbroiler* representam risco significativamente maior por inflamarem em temperaturas mais baixas. Já os resíduos da chapa metálica, mesmo inflamáveis, apresentam comportamento mais estável e demandam maior temperatura e energia térmica para iniciar combustão, o que implica risco reduzido em condições normais de operação.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo partiu de um problema prático e recorrente em cozinhas profissionais que é o acúmulo de resíduos graxos nos sistemas de exaustão, sua degradação e os riscos de inflamabilidade associados. A compreensão desse fenômeno é essencial não apenas para a manutenção preventiva, mas, sobretudo, para a segurança contra incêndios, considerando que esses depósitos podem atuar como combustível em sinistros. A relevância do tema ganha ainda mais força diante da escassez de estudos que relacionem, de forma integrada, a caracterização físico-química desses resíduos com parâmetros operacionais reais de cocção e com o comportamento térmico que determina seu potencial de ignição.

Os resultados obtidos confirmaram que o método de cocção exerce influência direta na composição e no comportamento térmico dos resíduos. Observou-se que resíduos provenientes de equipamentos operando a temperaturas mais elevadas apresentaram maior degradação lipídica e menor quantidade de ácidos graxos preservados, e apresentou ignição em menores temperaturas de ignição. Por outro lado, resíduos formados em temperaturas mais baixas preservaram maior quantidade de gordura, apresentando temperaturas de ignição mais altas, mas ainda dentro de uma faixa que representa risco significativo em condições de operação anormais ou falta de manutenção.

A análise por FTIR permitiu identificar grupos funcionais característicos de ácidos graxos e seus derivados, enquanto a cromatografia gasosa detalhou a distribuição entre cadeias saturadas e insaturadas, possibilitando a comparação direta entre hambúrgueres crus e resíduos gerados por diferentes métodos de cocção. Esses resultados foram coerentes com os dados obtidos por DRX, que indicaram a presença de fases cristalinas associadas à fração lipídica, e com a MEV, que evidenciou uma morfologia heterogênea, composta por áreas compactas e regiões porosas. O ensaio de saponificação quantificou a fração lipídica reativa, reforçando as diferenças entre os dois tipos de resíduos. Por fim, os ensaios térmicos realizados em simulador de duto avaliaram o comportamento inflamável desses materiais, integrando as interpretações das análises físico-químicas e morfológicas.

Foi possível correlacionar as características físico-químicas e estruturais dos resíduos com os parâmetros operacionais de cocção, estabelecer diferenças significativas entre os dois perfis analisados e comprovar que as temperaturas de ignição variam de acordo com o grau de degradação térmica. De forma integrada, o estudo mostrou que o risco de incêndio resulta da

combinação entre lipídios degradados e frações não lipídicas, cuja interação determina a inflamabilidade e a criticidade dos depósitos.

O ensaio de inflamabilidade revelou também a influência da fração não lipídica, em especial da fuligem, que contém hidrocarbonetos altamente reativos e capazes de reduzir a temperatura de ignição. Embora não tenha sido objeto de análise sistemática nesta pesquisa, esse aspecto mostrou-se relevante reforçando que o risco de incêndio não depende apenas do teor lipídico. Essas descobertas oferecem contribuições relevantes para o avanço do conhecimento científico e para a aplicação prática no setor de alimentação, uma vez que fornecem subsídios técnicos para a elaboração de estratégias de prevenção de incêndios e manutenção mais eficazes.

O estudo também abre espaço para a revisão de diretrizes normativas e práticas operacionais, incentivando a adoção de medidas preventivas específicas para cada tipo de cocção. Tal necessidade se mostra ainda mais urgente em equipamentos como *charbroilers*, cujas temperaturas mais elevadas favorecem a formação de resíduos altamente inflamáveis. Isso é especialmente relevante em estabelecimentos cujos resíduos inflamam a temperaturas mais baixas e cujo processo de trabalho opera em faixas térmicas mais elevadas, pois a probabilidade de ocorrência de incêndios é significativamente maior nessas condições.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Investigar a fração não lipídica dos resíduos, aprofundando sua caracterização química e avaliando de que forma contribui para a inflamabilidade;
- Aplicar a metodologia de análise desenvolvida neste estudo em diferentes equipamentos de cocção (como fritadeiras, fornos e grelhas), ampliando a compreensão dos riscos associados a distintos processos térmicos;
- Definir protocolos de manutenção preventiva mais precisos, fundamentados em dados experimentais, para reduzir a formação de depósitos inflamáveis em sistemas de exaustão;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULLAHI, M. A.; et al. **Cooking organic aerosol: Composition and emission characteristics**. Atmospheric Environment, 2013.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14518: Sistemas de ventilação para cozinhas profissionais**. Rio de Janeiro, 2020.
- ACGIH. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. **Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice for Design**. 28. ed. Cincinnati: ACGIH, 2013.
- ALEXANDROVA, A. **Extract and cleaning of contaminated air in commercial kitchens: ultraviolet technology**. Theseus.fi, 2009. Disponível em: <https://www.theseus.fi>. Acesso em: 17 dez. 2024.
- ANDRADE, R. P. **Cozinhas profissionais: projeto e segurança**. São Paulo: Editora Senac, 2021.
- ANWAR, A.; et al. **Release of trace elements from cookware under simulated cooking conditions**. Food Chemistry, 2004.
- AOYAMA, S.; HAYASHI, Y.; KAWAI, H. **Effects of different cooking methods on the content of lipid oxidation products in meat**. Food Science and Technology Research, v. 24, n. 2, p. 185–194, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3136/fstr.24.185>
- ARAÚJO, C. M. et al. **Fatty acid profile of processed beef burgers in Brazilian markets**. *Meat Science Journal*, v. 132, p. 145–153, 2022.
- ASHRAE. **Handbook of Fundamentals**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2017.
- ASSUNÇÃO, J. V. **Exaustão localizada: princípios de projeto e aplicação**. São Paulo: FUNDACENTRO, 1989.
- ATTA, M. B.; et al. **Heavy metal content in edible mushrooms collected from markets in Alexandria**, Egypt. Food Chemistry, 1997.

- BELITZ, H.-D.; GROSCH, W.; SCHIEBERLE, P. **Food Chemistry**. Springer, 2009.
- BRE. Building Research Establishment. **Fire statistics on HVAC systems**, 2005.
- BUONANNO, G.; et al. **Ultrafine particle emission from cooking sources**. Atmospheric Environment, 2009.
- CHAVES, M. **Sistemas de exaustão para cozinhas industriais**. Editora Técnica, 2012.
- CHEN, H.; et al. **Formation of PAHs during the thermal processing of food**. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019.
- CHEN, Y.; et al. **Emission characteristics of PM_{2.5} from residential cooking in China**. Science of the Total Environment, 2018.
- CHENG, Y.; et al. **Formation of fine particles from residential combustion sources**. Environmental Science & Technology, 2005.
- CHIANG, T. A.; et al. **Emission of PAHs from cooking processes**. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 1999.
- CHIZZOLINI, R.; ZANARDI, E.; DORSA, G.; GALLITELLI, G. **Oxidation in traditional cured meat products**. Meat Science, v. 62, n. 1, p. 1–7, 2002.
- CHOE, E.; MIN, D. B. **Chemistry of deep-fat frying oils**. Journal of Food Science, v. 72, n. 5, p. R77–R86, 2007.
- CLEZAR, R.; NOGUEIRA, R. **Sistemas de Exaustão: Projeto e dimensionamento**. 2009.
- CHMIEL, M. et al. **Influence of different cooking methods on lipid oxidation and formation of volatile compounds in beef**. Food Chemistry, v. 357, p. 129742, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129742>.
- CHOE, J. H. et al. **Effects of different cooking methods on the physicochemical and sensory characteristics of dry-aged beef loin**. Meat Science, v. 151, p. 52–58, 2019.
- CHOW, C. K. (Ed.). **Fatty Acids in Foods and Their Health Implications**. 3. ed. Boca Raton:

CRC Press, 2007.

COATES, J. **Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach**. In: MEYERS, R. A. (ed.). *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. Chichester: Wiley, 2000. p. 10815–10837.

COLLAÇO, S. A. **História das cozinhas industriais**. 2004.

COSTA, M. **Eficácia dos Sistemas de Ventilação Local Exaustora**. *Journal of Environmental Health*, 2005.

COWAN, R. S. **More Work for Mother: The Ironies of Household Technology from the Open Hearth to the Microwave**. Basic Books, 1983.

DEFRA. **Guidance on the Control of Odour and Noise from Commercial Kitchen Exhaust Systems**. 2005.

DESATNICK, R. L. ***Managing to Keep the Customer***. Boston: Harvard Business School Press, 1995.

DÍAZ, C. M. et al. **Lipid profiles and cholesterol content of fast food items from international franchises**. *Journal of Food Composition and Analysis*, v. 82, p. 103237, 2019. DOI: 10.1016/j.jfca.2019.02.007.

DIES, F. C. **Fatality Assessment and Control Evaluation Project**. Atlanta: *Centers for Disease Control and Prevention (CDC)*, 1997.

DOMÍNGUEZ, R.; GÓMEZ, M.; FONSECA, S.; LORENZO, J. M. **Influence of thermal treatment on lipid oxidation and formation of volatile compounds in foal meat**. *Meat Science*, v. 96, n. 1, p. 287–294, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.07.022>

ELOVITZ, G. M. **Design considerations for master kitchen exhaust systems**. *Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC)*, 1992.

EPA. **Air Pollution Control Technology Fact Sheet: Electrostatic Precipitators**. United States Environmental Protection Agency, 1985.

EPA – United States Environmental Protection Agency. **Report to Congress on Black**

Carbon. Washington, D.C.: EPA, 2012

ESMERINO, E. A.; SILVA, M. C.; GOMES, A. P. **Substitution of beef tallow with chia oil in burgers: Effects on fatty acid profile and consumer acceptance.** Meat Science, v. 199, 109097, 2023

FARRELL, R.; et al. **Preventing fire risks in kitchen exhaust systems.** 2011.

FERNANDES, F.; et al. **Airborne emissions from cooking activities: Assessing the impact on indoor air quality.** Journal of Building Engineering, 2020.

FIRECODE. **Fire safety in commercial kitchens: updated regulations and guidelines.** Londres: Firecode Publications, 2023.

FONSECA, M. **Transformação da economia brasileira e o impacto na alimentação coletiva.** Dissertação (Mestrado em Administração Pública) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introduction to Fluid Mechanics.** 8. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.

FRANK, D. et al. **Sensory and flavor chemistry characteristics of cooked beef from grain-fed and pasture-fed cattle.** *Journal of Animal Science*, v. 94, n. 5, p. 2091–2101, 2016.

FRANKEL, E. N. **Lipid Oxidation.** 2. ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2014.

FRIEDMAN, M. **Chemistry, biochemistry, and safety of acrylamide.** A review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 51, n. 16, p. 4504–4526, 2003

GAMA, L. **Tecnologias de filtragem de ar.** Manual técnico. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia de Ventilação, 2008.

GAO, J.; et al. **Cooking oil emissions and their impact on indoor air quality.** 2013.

GERSTLER, W. D.; et al. **Deposition of cooking aerosols in ventilation ducts.** Atmospheric Environment, 2002.

GERSTLER, W. D. et al. **The effects of exhaust air velocity on grease deposition in kitchen exhaust ductwork.** *ASHRAE Transactions*, 2002.

GONÇALVES, R. **Tratamento de emissões atmosféricas em cozinhas industriais.** Apostila técnica. Rio de Janeiro: SENAI, 2002.

GRIFFIN, B.; MORGAN, M. **60 years of commercial kitchen fire suppression.** *ASHRAE Journal*, 2014.

GUNSTONE, F. D. **The Chemistry of Oils and Fats: Sources, Composition, Properties and Uses.** Oxford: Blackwell Publishing, 2004.

GUNSTONE, F. D.; HARWOOD, J. L.; DIJKSTRA, A. J. (Eds.). **The Lipid Handbook.** 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2007.

HALTON. **Kitchen ventilation design guidelines for health and safety**, 2024

HAMERLAINE, V. et al. **Trans fatty acids and labeling accuracy in processed meats.** *Food Chemistry*, v. 402, p. 134126, 2024.

HE, C.; et al. **Particle emission characteristics of residential cooking and the effectiveness of range hoods.** *Environmental Science & Technology*, 2004.

HEISLER, M. **Ventilation and Indoor Air Quality.** *Journal of Environmental Health*, 2015.

HERNÁNDEZ-CÁZARES, A. S. et al. **Determination of fatty acids in bovine milk by GC-FID.** *Journal of Food Science*, v. 85, n. 7, p. 1982–1992, 2020.

HIMAWAN, C.; STAROV, V. M.; STAPLEY, A. G. F. **Thermodynamic and kinetic aspects of fat crystallization.** *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 122, p. 3–33, 2006

HOROWITZ, R. **Putting Meat on the American Table: Taste, Technology, Transformation.** Johns Hopkins University Press, 2006.

HORTON, D. **Lessons learned from commercial kitchen fire investigations.** *ASHRAE Journal*, 2015.

- HU, Q.; et al. **Evaluation of cooking oil emissions and their impact on air quality.** Environmental Research, 2023.
- KATRAGADDA, H. R.; et al. **Emissions of volatile aldehydes from heated cooking oils.** Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010.
- KAWASHIMA, L. M.; et al. **Evaluation of trace element concentrations in vegetables.** Journal of Food Composition and Analysis, 2003.
- KUEHN, T. H.; et al. **Emission and control of grease-laden air from commercial cooking operations.** ASHRAE Transactions, 2008, 2009a, 2009b.
- KUNSTHISTORISCHES MUSEUM. **Pieter Brueghel – Kitchen Scene.** Viena, 2024. Disponível em: <https://www.khm.at/>. Acesso em: 01 dez. 2024.
- JENKINS, T. C.; WALLACE, R. J.; MOATE, P. J.; MOSLEY, E. E. **Board-Invited Review: Recent advances in biohydrogenation of unsaturated fatty acids within the rumen microbial ecosystem.** *Journal of Animal Science*, v. 86, n. 2, p. 397–412, 2008.
- LEE, H. J.; et al. **Comparison of beef, plant-based, and hybrid burgers: Fatty acid profiles and health implications.** Journal of Food Composition and Analysis, v. 97, 103801, 2021
- LEE, S. C.; et al. **Characteristics of indoor air quality at restaurants in Hong Kong.** 2001.
- LEE, M. et al. **Characterization of fatty acid profiles in ready-to-eat beef patties.** *Food Control*, v. 129, p. 108205, 2021.
- LI, X.; et al. **Evaluation of volatile organic compounds (VOCs) from cooking oil fumes.** Journal of Environmental Science, 2021.
- LI, Y.; et al. **Emission characteristics and control strategies of particulate matter from cooking processes.** Journal of Environmental Health Science and Engineering, 2023.
- LIU, W.; et al. **The health impact of ultrafine particles from kitchen emissions.** Indoor Air, 2021.
- LIU, Y.; et al. **Characteristics of cooking emissions and their impacts on indoor air quality.**

2017.

LOMBARDI-BOCCIA, G.; et al. **Nutrients and trace elements in meat.** *Journal of Food Composition and Analysis*, 2004.

LUMEN LEARNING. **Lipid Structure and Function.** *Lumen Microbiology*, 2023.

MACEDO, J. C. **História da alimentação coletiva no Brasil.** Belo Horizonte: UFMG, 2015.

MACINTYRE, A. J. **Air Pollution Control.** Springer, 1990.

MACINTYRE, A. J. **Design and Maintenance of Kitchen Exhaust Systems.** 1990.

MARANGONI, A. G.; MCGAULEY, S. E. **Relationship between crystallization behavior and structure in cocoa butter.** *Crystal Growth & Design*, v. 3, n. 1, p. 95–108, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1021/cg025570i>.

MARTIN, C. A.; MATSUSHITA, M.; SOUZA, N. E. **Ácidos graxos trans: toxicidade e ocorrência em alimentos.** *Revista de Nutrição*, v. 17, n. 3, p. 361–368, 2004.

MCDONALD, J. D.; et al. **Emissions from cooking operations: Characterization and control.** 2003.

MEILE, P. **Cozinhas industriais: história e evolução dos equipamentos.** Lisboa: IST Press, 2006.

MEIRA, M. **Fundamentals of Electrostatic Precipitation.** 2009.

MELGAR-LALANNE, G.; HERNÁNDEZ, J. L.; TORRES, M. J. **Lipid characterization of commercial fast-food burgers in Mexico.** *Food Chemistry*, v. 387, 132908, 2022

MELGAR-LALANNE, G. et al. **Comparative analysis of fatty acid profiles in meat-based fast food.** *Food Research International*, v. 156, p. 111172, 2022.

MING-TSANG, W. **Emission of pollutants from various cooking activities.** *Journal of Environmental Science and Health*, 2019.

MODERN RESTAURANT MANAGEMENT. **Kitchen Ventilation Best Practices.**

Disponível em: <https://modernrestaurantmanagement.com>. Acesso em: 20 dez. 2024.

MONTANARI, M. **Food is Culture**. New York: Columbia University Press, 2013.

MORTEZA, J.; et al. **Ventilation and indoor air quality in commercial kitchens**. Building and Environment, 2013.

MOTT, R. L. **Applied Fluid Mechanics**. 4. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2000.

MUDIE, S.; VAHDATI, M. **Fat, oil and grease reduction in commercial kitchen ductwork**. Waste Management, 2017.

MUKHOPADHYAY, R.; et al. **Characterization of indoor air quality in commercial kitchens**. Building and Environment, 2016.

NFPA. National Fire Protection Association. **Fire statistics in commercial kitchens**. 2005.

NGUYEN, Q. C.; et al. **Impact of frying oils on particle size distribution and composition in kitchen emissions**. Building and Environment, 2022.

NKBA. National Kitchen & Bath Association. **Commercial Kitchen Design Guidelines**. 2023. Disponível em: <https://nkba.org>. Acesso em: 18 dez. 2024

NORBECK, J. M. **Emission factors for particulate matter from cooking activities**. Sacramento: California Air Resources Board (CARB), 1997. Relatório técnico.

OLIVEIRA, J. L. **Sistemas de Exaustão para Cozinhas Industriais**. 2013.

OLSON, B. A. et al. **Characterization of cooking effluent from seven commercial kitchen appliances**. ASHRAE Transactions, 2009.

ORKUSZ, A. et al. **Influence of fermentation on short- and medium-chain fatty acids in dairy**. Foods, v. 12, n. 3, p. 512, 2023.

PEREIRA, A. L.; CAVALCANTI, M. C. **História da alimentação e da hospitalidade no Brasil**. Recife: UFPE, 2014.

PERRY, R. H. **Chemical Engineers' Handbook**. McGraw-Hill, 1980.

PILAT, M. **Mecanismos de Filtragem de Partículas**. 2000.

PINE, B. J. **Mass Customization: The New Frontier in Business Competition**. Boston: Harvard Business School Press, 1999.

POPOVA, D.; BORISOVA, M.; GEORGIEVA, R. **Fatty acid composition and nutritional evaluation of beef burgers with vegetable oils**. *Journal of Food Composition and Analysis*, v. 116, 105030, 2023

POPOVA, D. et al. **Saturated and unsaturated fatty acids in commercial beef patties: implications for reformulation**. *Journal of Food Science*, v. 88, n. 1, p. 211–222, 2023.

PROENÇA, R. P. C. **Alimentação coletiva e a industrialização no Brasil**. 1996.

RAES, K.; DE SMET, S.; DEMEYER, D. **Effect of dietary fatty acids on meat quality: A review**. *Meat Science*, v. 66, n. 4, p. 659–668, 2004.

RAMESH, R. **Fire safety in commercial kitchens**. *Journal of Fire Protection Engineering*, 2010.

RIBEIRO, W. O.; LIMA, M. T.; MONTEIRO, M. L. G. **Influence of grilling and frying on fatty acid content of beef patties**. *Trends in Food Science & Technology*, v. 105, p. 67–73, 2020

RIBEIRO, A. C. et al. **Nutritional composition and lipid profiles of processed beef burgers sold in Brazil**. *Meat Science*, v. 168, p. 108180, 2020.

RIM, D.; NOVOSELAC, A. **Impact of reduced airflow on indoor air quality in residential buildings**. *Building and Environment*, 2010.

ROCHA, M. A. **Programa de Alimentação do Trabalhador (PAT) e suas implicações**. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

RODRIGUES, L. S. **Evolução das praças de alimentação em shopping centers**. Monografia (Graduação em Administração) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2006.

RUIZ, J. A.; GARCÉS, R.; MUÑOZ, J. **Composition of odd- and branched-chain fatty acids**

in ruminant fats. *Food Chemistry*, v. 85, n. 3, p. 421–427, 2004. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(03\)00265-2](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(03)00265-2).

SANTIAGO, D. M. et al. **Lipid profile characterization of industrialized beef burgers in Latin America.** *Revista de Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 37, n. 4, p. 492–500, 2017.

SANKHYAN, S.; et al. **Temperature dependence of particle emissions from cooking oil fumes.** *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 2022.

SATO, K. **Crystallization behaviour of fats and lipids: a review.** *Chemical Engineering Science*, v. 56, n. 7, p. 2255–2265, 2001

SCHAUER, J. J.; et al. **Source apportionment of airborne particulate matter using organic compounds as tracers.** *Atmospheric Environment*, 1996, 1999.

SCHIFFTNER, K.; et al. **Spray Technology for Industrial Gas Cleaning.** 1996.

SCHNELLE, K. B. **Air Pollution Control Technology Handbook.** CRC Press, 2002.

SCIENCEDIRECT TOPICS. **Thermal degradation of lipids.** Elsevier, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/topics>. Acesso em: 18 dez. 2024.

SEE, S. W.; BALASUBRAMANIAN, R. **Characterization of fine particle emissions from cooking activities.** *Environmental Science & Technology*, 2008.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change.** Wiley-Interscience, 2006.

SHEVCHENKO, N. **Problem of grease and its solutions in commercial kitchens.** Theseus.fi, 2012

SILVA, T. J. P. et al. **Impact of cooking methods on fatty acid profile and oxidative stability of beef.** *Meat Science*, v. 155, p. 93–100, 2019

SILVERSTEIN, R. M.; WEBSTER, F. X.; KIEMLE, D. J.; BRYCE, D. L. **Spectrometric Identification of Organic Compounds.** 8. ed. Hoboken: Wiley, 2014

- SIPPOLA, M. R.; Nazaroff, W. W. **Modeling Particle Deposition in Ventilation Ducts**. 2005.
- SKOKLOSTER CASTLE. **Marten van Cleve – Kitchen Interior**. Suécia, 2024. Disponível em: <https://skoklostersslott.se/>. Acesso em: 01 dez. 2024.
- SMITH, A. F. **Encyclopedia of Food and Drink in America**. Oxford University Press, 2004.
- SMITH, B. C. **Infrared Spectral Interpretation: A Systematic Approach**. Boca Raton: CRC Press, 2011.
- SONG, J.; et al. **Advances in cooking emission control technologies**. Sustainable Cities and Society, 2022.
- STEAMATIC. Commercial Kitchen Exhaust Cleaning and Fire Prevention. 2023. Disponível em: <https://www.steamatic.com>. Acesso em: 19 dez. 2024.
- SUBRAMANIAN, R.; NAKAJIMA, T. **Emission characteristics of different cooking oils**. 1997.
- TECHNAVIO. **Global Commercial Kitchen Ventilation Systems Market Report 2020–2024**. Londres: Technavio, 2020.
- TFOUNI, S. A.; et al. **Formation and mitigation of PAHs in food products**. Food Control, 2009.
- TRINDADE, M. A.; LOURENÇO, R. V.; CANTARELLI, V. S. **Degradação lipídica e compostos voláteis em produtos cárneos processados**. Brazilian Journal of Food Technology, v. 23, e2019054, 2020.
- TOMAN, R.; SCHÜLLER, N. **The World of Cooking**. H.F. Ullmann, 2010.
- VICKERS, J. **Impact of oil composition on cooking emissions**. Relatório técnico, 2017
- WALLACE, L.; et al. **Fine particulate and organic chemicals in indoor air: A review**. 2004.
- WANG, X. **Design of Industrial Ventilation Systems**. 2004.
- WANG, Y.; et al. **Emission factors and characteristics of PAHs from cooking sources**.

Environmental Science & Technology, 2015.

WOOD, J. D. et al. **Fat deposition, fatty acid composition and meat quality: A review.** Meat Science, v. 78, n. 4, p. 343–358, 2008.

WOOLGAR, S. **Science: The Very Short Introduction.** Oxford: Oxford University Press, 2016.

WU, W.; ZHANG, M.; BAI, W.; MUJUMDAR, A. S. **Influence of cooking methods on lipid oxidation, fatty acids composition and volatiles of grass carp.** LWT – Food Science and Technology, v. 116, 108578, 2019.

XIANG, Y.; et al. **Volatile organic compounds in indoor air during cooking.** Journal of Environmental Sciences, 2017.

YANG, S.; et al. **Thermal plumes and indoor air quality in commercial kitchens.** 2009.

YEUNG, L. L.; TO, W. M. **Size distributions of cooking-related particles.** Journal of Aerosol Science, 2008.

ZHANG, H.; et al. **Advances in particulate matter control in kitchen exhaust systems.** Environmental Science & Technology, 2022.

ZHANG, Q.; SALEH, A. S. M.; CHEN, J.; SHEN, Q. **Chemical alterations taken place during deep-fat frying based on certain reaction products: A review.** Chemistry and Physics of Lipids, v. 165, n. 6, p. 662–681, 2012.

ZHAO, B; et al. **Emission characteristics of cooking-generated particles.** 2019. ZHANG, J.; et al. **Indoor air quality in Chinese households.** Environmental Science & Technology, 2010.

ZHOU, Y. et al. **Machine learning-based profiling of lipid fractions in commercial beef patties.** Scientific Reports, v. 15, art. 9876, 2025.

ZIDONG, G.; YONG, W. **Experiment study on fire hazard of two type grease residues in exhaust duct of commercial kitchen.** In: IEEE Conference Proceedings, 2017.