

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA

Sofia Lasso Morales Aguilar

SENSORES BASEADOS EM NANOTUBOS DE CARBONO E GRAFENO NA  
DETECÇÃO DE CONTAMINANTES EM ALIMENTOS

Buri 2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA

Sofia Lasso Morales Aguilar

SENSORES BASEADOS EM NANOTUBOS DE CARBONO E GRAFENO NA  
DETECÇÃO DE CONTAMINANTES EM ALIMENTOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como exigência parcial para a obtenção do grau  
de Bacharel em Engenharia de Alimentos na  
Universidade Federal de São Carlos.

Orientação: Prof. Dr. Fernando Campanhã  
Vicentini

Buri 2025

Aguilar, Sofia Lasso Morales

Sensores baseados em nanotubos de carbono e grafeno na detecção de contaminantes em alimentos / Sofia Lasso Morales Aguilar -- 2025.  
51f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus Lagoa do Sino, Buri  
Orientador (a): Fernando Campanhã Vicentini  
Banca Examinadora: Gabriel Luiz Cruz de Souza, Guilherme de Figueiredo Furtado  
Bibliografia

1. Sensores com grafeno. 2. Sensores com nanotubos de carbono (CNTs). 3. Segurança do alimento.. I. Aguilar, Sofia Lasso Morales. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Lissandra Pinhatelli de Britto - CRB/8 7539


## **SOFIA LASSO MORALES AGUILAR**

### **SENSORES BASEADOS EM NANOTUBOS DE CARBONO E GRAFENO NA DETECÇÃO DE CONTAMINANTES EM ALIMENTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Alimentos na Universidade Federal de São Carlos. Buri, 25 de novembro de 2025.


Aprovado em: 25/11/2025.

#### **BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
 **FERNANDO CAMPANHA VICENTINI**  
Data: 25/11/2025 16:39:13-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

**Prof. Dr. Fernando Campanhã Vicentini (Orientador)**  
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) – *campus* Lagoa do Sino

Documento assinado digitalmente  
 **GABRIEL LUIZ CRUZ DE SOUZA**  
Data: 25/11/2025 16:22:50-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Prof. Dr. Gabriel Luiz Cruz de Souza**  
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) – *campus* Lagoa do Sino

Documento assinado digitalmente  
 **GUILHERME DE FIGUEIREDO FURTADO**  
Data: 25/11/2025 16:32:53-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Prof. Dr. Guilherme de Figueiredo Furtado**  
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) – *campus* Lagoa do Sino

**DEDICATÓRIA**

*Aos meus pais, pelo amor incondicional!*

## AGRADECIMENTO

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por ter me sustentado com força, fé e serenidade ao longo de toda esta caminhada. Sem Sua presença constante, este trabalho não seria possível. Ao meu orientador, Professor Vicentini, expressei minha profunda gratidão pela orientação dedicada, paciência e por acreditar no meu potencial mesmo nos momentos em que eu mesmo duvidei. Sua escuta atenta e seus conselhos foram fundamentais para a realização deste trabalho.

À minha família, meu porto seguro, meu amor mais firme: ao meu pai, Ricardo, e à minha mãe, Célia, que sempre me apoiaram com amor incondicional, sacrifícios silenciosos e palavras de encorajamento que levarei para a vida. Ao meu irmão, William, por ser sempre um exemplo de companheirismo e força. Às minhas queridas avós, Nina e Nona, que com carinho e sabedoria me ensinaram mais do que muitos livros. Ao meu tio Aristeu, que sempre esteve presente com apoio e incentivo nos momentos em que eu mais precisei.

A todos os colegas, professores e amigos que conheci na UFSCar, obrigada pelas trocas, pelos aprendizados e pelas amizades construídas ao longo dessa jornada.

Finalizo este trabalho com o coração cheio de gratidão a cada pessoa que, de alguma forma, contribuiu para que este momento se tornasse realidade.

O que dá o verdadeiro sentido ao encontro é a busca, e é preciso andar muito para se alcançar o que está perto.

(Saramago, 2000, p. 45).

## RESUMO

AGUILAR, Sofia Lasso Morales. **SENSORES BASEADOS EM NANOTUBOS DE CARBONO E GRAFENO NA DETECÇÃO DE CONTAMINANTES EM ALIMENTOS**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de São Carlos, *campus* Lagoa do Sino, Buri, 2025.

Este trabalho de conclusão de curso apresenta uma revisão bibliográfica sobre sensores à base de grafeno e nanotubos de carbono (CNTs) aplicados na detecção de contaminantes em alimentos, com foco em estudos publicados entre 2021 e 2025. A pesquisa estruturou-se a partir de triagens realizadas sistematicamente nas plataformas *Scopus*, *Web of Science*, *PubMed*, *ScienceDirect* e *RSC Publishing*, entre outras bases acadêmicas. Na triagem, foram considerados títulos e resumos como critérios iniciais de seleção. As buscas nestas plataformas de pesquisa incluíram apenas artigos com abordagem direta sobre o uso destes nanomateriais na construção de sensores voltados à análise de segurança alimentar. A metodologia adotada é de natureza qualitativa, sendo a revisão bibliográfica desenvolvida como método de pesquisa. Este estudo buscou identificar trabalhos relevantes sobre a temática, destacando as características destes nanomateriais, a saber: morfologia, propriedades e métodos de síntese, bem como suas utilizações em sensores aplicados no controle de qualidade dos alimentos. Os resultados da pesquisa apontam para um crescimento significativo de estudos envolvendo grafeno e CNTs em sensores devido às propriedades físico-químicas excepcionais destes materiais, a citar, a alta condutividade elétrica, grande área superficial, facilidade de funcionalização e alta sensibilidade molecular. Os trabalhos estudados mostram a forte tendência para a integração destes sensores com tecnologias voltadas à inteligência artificial, ao aprendizado de máquina e à internet das coisas (IoT), na perspectiva de aplicações em tempo real. As análises dos trabalhos revelam desafios, como custo de produção e além disso, desafios persistem, como a padronização dos materiais, estabilidade em matrizes alimentares complexas e validação para uso regulatório. Conclui-se que a combinação de grafeno e CNTs em sensores representa uma tecnologia adequada para o monitoramento da qualidade e segurança de alimento.

Palavras-chave: sensores com grafeno; sensores com nanotubos de carbono (CNTs); segurança do alimento.

## ABSTRACT

AGUILAR, Sofia Lasso Morales. **Carbon nanotube- and graphene-based sensors for the detection of contaminants in food. 2025.** Undergraduate Thesis – Federal University of São Carlos, Lagoa do Sino *Campus*, Buri, 2025.

This final course project presents a literature review on graphene-based and carbon nanotubes (CNTs) sensors applied to the detection of contaminants in food, focusing on studies published between 2021 and 2025. The research was structured based on systematic screening of the Scopus, Web of Science, PubMed, ScienceDirect, and RSC Publishing platforms, among other academic databases. In this screening phase, titles and abstracts were considered as initial selection criteria. The searches on these research platforms included only articles with a direct approach to the use of these nanomaterials in the construction of sensors for food safety analysis. The methodology adopted is qualitative in nature, with a literature review developed as a research method. This study sought to identify relevant works on the subject, highlighting the characteristics of these nanomaterials, namely: morphology, properties, and synthesis methods, as well as their uses in sensors applied to food quality control. The research results point to a significant growth in studies involving graphene and CNTs in sensors due to the exceptional physicochemical properties of these materials, such as high electrical conductivity, large surface area, ease of functionalization and high molecular sensitivity. The studies reviewed show a strong trend towards integrating these sensors with technologies focused on artificial intelligence, machine learning, and the Internet of Things (IoT), from the perspective of real-time applications. However, analyses of these studies reveal challenges such as production costs and, furthermore, persisting challenges include material standardization, stability in complex food matrices, production costs, and validation for regulatory use. It is concluded that the combination of graphene and CNTs in sensors represents a suitable technology for monitoring food quality and safety.

Keywords: graphene sensors; carbon nanotube sensors; food safety.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração dos aspectos característicos dos conceitos de segurança alimentar e de segurança do alimento.....	13
Figura 2- Estrutura atômica do grafeno: arranjo hexagonal bidimensional de átomos de carbono.....	21
Figura 3- Esquema ilustrativo dos métodos de síntese do grafeno.....	24
Figura 4- Representação esquemática da estrutura de nanotubos de carbono de parede simples (SWCNTs) e de paredes múltiplas (MWCNTs). ....	27
Figura 5 - Esquema gráfico da estrutura tridimensional do sensor. ....	32
Figura 6- Indicação dos canais formados no sensor. ....	35
Figura 7- Esquema gráfico do processo de modificação de um eletrodo de carbono impresso em tela (SPCE).....	38

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Detalhamento dos parâmetros utilizados na busca nas bases de dados.....	16
Quadro 2 – Referência bibliográfica selecionada para a pesquisa. ....	17
Quadro 3 – Propriedades do grafeno e suas potenciais aplicações.....	22
Quadro 4 – Comparação das propriedades do grafeno, óxido de grafeno (GO) e óxido de grafeno reduzido (rGO). ....	23
Quadro 5– Propriedades dos CNTs relevantes para aplicações em alimentos. ....	28
Quadro 6 – Resumo das características de estudos envolvendo sensores e biossensores baseados em grafeno, no período de 2021 a 2025. ....	31
Quadro 7- Resumo das características de estudos envolvendo sensores e biossensores baseados em CNTs, no período de 2021 a 2025.....	39

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AChE	<i>Acetylcholinesterase</i>	Enzima acetilcolinesterase
AFB1	<i>Aflatoxin B1</i>	Aflatoxina B1
ATCh	<i>Acetylthiocholine</i>	Cloreto de acetiltiocolina
BPA	<i>Bisphenol A</i>	Bisfenol A
CVD	<i>Chemical Vapour Deposition</i>	Deposição química a vapor
CNTs	<i>Carbon Nanotubes</i>	Nanotubos de carbono
DTAs	<i>Foodborne Diseases</i>	Doenças transmitidas por alimentos
EASA	<i>Electrochemically Assisted Self-Assembly</i>	Auto montagem assistida eletroquimicamente
ErGO	<i>Electrochemically Reduced Graphene Oxide</i>	Óxido de grafeno reduzido eletroquimicamente
FBDs	<i>Foodborne Diseases</i>	Doenças transmitidas por alimentos
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
FETs	<i>Field-Effect Transistors</i>	Transistores de efeito de campo
G-FETs	<i>Graphene Field-Effect Transistors</i>	Transistores de efeito de campo de grafeno
GA	<i>Gallic Acid</i>	Ácido gálico
GC	<i>Gas Chromatography</i>	Cromatografia gasosa
GCE	<i>Glassy Carbon Electrode</i>	Eletrodo de carbono vítreo
GO	<i>Graphene Oxide</i>	Óxido de grafeno
IR	<i>Infrared</i>	Espectrofotometria Infravermelha
LOD	<i>Limit of Detection</i>	Limite de detecção
MWCNTs	<i>Multi-Walled Carbon Nanotubes</i>	Nanotubos de paredes múltiplas
MOFs	<i>Metal-Organic Frameworks</i>	Materiais metal-orgânicos
NGQDs	<i>Nitrogen-doped Graphene Quantum Dots</i>	Pontos quânticos de grafeno dopados por nitrogênio
PBS	<i>Phosphate-Buffered Saline</i>	Solução salina tamponada com fosfato
PMMA	<i>Polymethyl Methacrylate</i>	Polimetilmetacrilato
PPVC	<i>Plasticized Polyvinyl Chloride</i>	Cloreto de polivinila plastificado
rGO	<i>Reduced Graphene Oxide</i>	Óxido de grafeno reduzido
SWCNTs	<i>Single-Walled Carbon Nanotubes</i>	Nanotubos de paredes simples
TCP	<i>Tricresyl Phosphate</i>	Fosfato de tricresila
UR	<i>Relative Humidity</i>	Umidade relativa
UV-Vis	<i>Ultraviolet/Visible</i>	Espectrofotometria Ultravioleta-Visível
UHV	<i>Ultra High Vacuum</i>	Ultra-alto vácuo
VMSF	<i>Vertically Ordered Mesoporous Silica Film</i>	Filme de sílica mesoporosa verticalmente ordenado
VOCs	<i>Volatile Organic Compounds</i>	Compostos orgânicos voláteis
HPLC	<i>High-Performance Liquid Chromatography</i>	Cromatografia líquida de alta eficiência

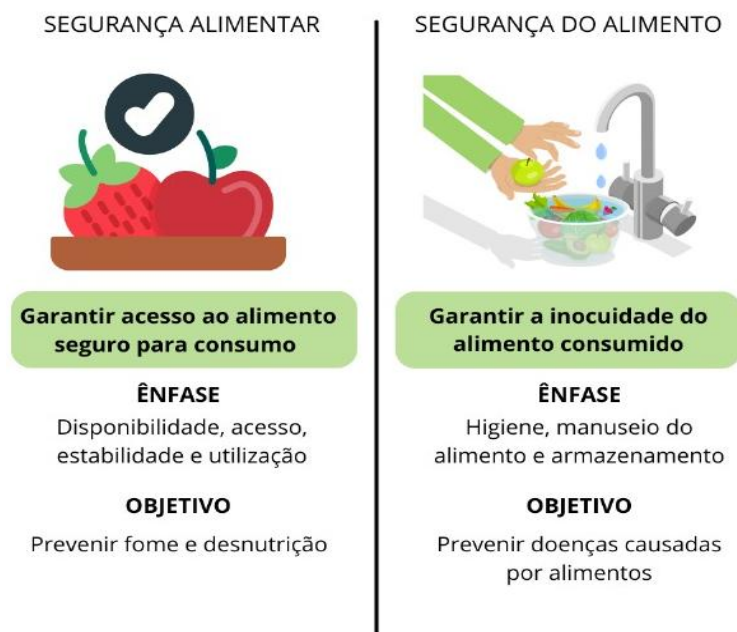
## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	METODOLOGIA .....	16
3	ARTIGO .....	19
3.1	INTRODUÇÃO .....	19
3.2	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO GRAFENO E NANOTUBO DE CARBONO .....	21
3.2.1	Grafeno .....	21
3.2.2	Nanotubos de Carbono (CNTs) .....	26
3.3	APLICAÇÃO DO GRAFENO EM SENSORES E BIOSSENSORES PARA DETECÇÃO DE CONTAMINANTES EM ALIMENTOS .....	30
3.3.1	Aplicação do grafeno em sensores para a detecção de compostos em .....	31
3.3.2	Aplicação do grafeno em biossensores para a detecção de contaminantes em alimentos .....	34
3.4	APLICAÇÃO DO CNT EM SENSORES E BIOSSENSORES PARA DETECÇÃO DE CONTAMINANTES EM ALIMENTOS .....	38
3.4.1	Aplicação do CNT em Sensores para a detecção de contaminantes em alimentos .....	39
3.4.2	Aplicação do CNT em biossensores para detecção de contaminantes em alimentos .....	40
3.5	PERSPECTIVAS FUTURAS .....	42
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	44
	REFERÊNCIAS .....	45

## 1 INTRODUÇÃO

O conceito de segurança alimentar (*food security*) se refere ao acesso da população aos alimentos, de maneira que haja seguridade física, econômica e social. Já a segurança do alimento (*food safety*) envolve aspectos da qualidade do alimento, no sentido da garantia de que estejam livres de contaminantes, podendo prejudicar a saúde dos consumidores. Estes conceitos são ilustrados na Figura 1 (FAO, 2025).

Figura 1 – Ilustração dos aspectos característicos dos conceitos de segurança alimentar e de segurança do alimento.



Fonte: Adaptado a partir de (FAO, 2025).

Embora englobem práticas diferentes, a segurança do alimento é essencial para garantir a segurança alimentar, pois abrange ações durante a produção, o preparo, o armazenamento, entre outras etapas da cadeia alimentar.

Na indústria alimentícia, a busca pela inocuidade do alimento para o consumidor, torna necessária a utilização de metodologias para análise qualitativa de seus produtos, a fim de evitar a exposição humana à contaminantes. Segundo Sun *et al.* (2023), os contaminantes podem ser classificados em três categorias: biológicos, como bactérias, fungos e suas toxinas; físicos, como fragmentos de metais, vidros e demais corpos alheios ao alimento; e químicos, os quais abrangem metais pesados, aditivos não autorizados e substâncias tóxicas.

Dentre os métodos utilizados para detecção de contaminantes químicos, destacam-se

Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC, do inglês, *High-Performance Liquid Chromatography*), Cromatografia Gasosa (GC, do inglês, *Gas Chromatography*) e Espectrofotometria Ultravioleta-Visível (UV-Vis, do inglês, *Ultraviolet/Visible*) e Infravermelho (IR, do inglês, *Infrared*), utilizados para detecção de contaminantes, resíduos de pesticidas e compostos voláteis. No entanto, as técnicas citadas possuem limitações dentre as quais destacam-se as longas etapas de preparo, o elevado investimento em equipamentos e a necessidade de complexa infraestrutura laboratorial (Sun *et al.*, 2023).

Por outro lado, especificamente para a detecção de partículas e contaminantes químicos em alimentos, é notável o bom desempenho de sensores eletroquímicos. De acordo com Mohamed *et al.* (2024), o fato de possuírem alta sensibilidade e seletividade agiliza a detecção de aditivos e contaminantes, superando as limitações de tempo, custo e complexidade dos métodos citados anteriormente.

Dentre os sensores eletroquímicos, destacam-se aqueles que são empregados para detecção de toxinas em alimentos. Estes sensores utilizam materiais nanoestruturados, evidenciando-se os nanotubos de carbono e o grafeno. Estes materiais possuem boa condutividade elétrica e alta capacidade de adsorção, características que proporcionam melhor sensibilidade e maior velocidade de resposta a estes sensores, além de maior estabilidade e precisão, quando comparados a sensores sem esses nanomateriais (Sinha *et al.*, 2024).

Ainda assim, a utilização dos sensores baseados em nanotubos de carbono e grafeno possui alguns desafios, dentre os quais destaca-se a falta de padronização destes sensores. A ausência de protocolos oficiais de utilização, dificulta a comparação de resultados e a transição para aplicação industrial. Segundo Sinha *et al.* (2024) e Mohamed *et al.* (2024), os obstáculos citados representam desafios significativos para a aplicação de sensores em análise de alimentos.

Os apontamentos supracitados trazem à luz a seguinte questão que direcionou a pesquisa: Quais as contribuições e/ou entraves da utilização de sensores de nanotubo de carbono e de grafeno para a segurança de alimentos?

Diante do cenário apresentado e da questão de pesquisa, o presente trabalho tem como objetivo geral realizar uma revisão bibliográfica envolvendo trabalhos acadêmicos publicados no período de 2021 a 2025, sobre a utilização de sensores eletroquímicos baseados em nanotubo de carbono e grafeno aplicados em análise de alimentos.

Para alcançar o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Definir as bases de dados para a pesquisa;

- b) Identificar palavras-chaves, idioma e tipo de estudo para a busca nas bases de dados;
- c) Realizar uma pré-seleção do material;
- d) Realizar leitura aprofundada do material selecionado, destacando as características atuais, vantagens e limitações, bem como perspectivas futuras no contexto da segurança dos alimentos.

## 2 METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida com abordagem qualitativa a partir de uma revisão bibliográfica. Segundo Gil (2008), a revisão bibliográfica é um tipo de pesquisa que tem por objetivo analisar e discutir estudos já realizados sobre uma temática, a partir de documentos acessíveis como artigos científicos, dissertações, teses, entre outros publicados. Especificamente para o escopo da presente pesquisa, foram realizadas revisões literárias com foco em artigos de revisão e estudos experimentais publicados entre 2021 e 2025, que abordam a aplicação de sensores e biossensores baseados em nanotubos de carbono (CNTs) e grafeno na análise da qualidade de alimentos.

A seleção enfatizou artigos presentes nas bases acadêmicas internacionais, como *Scopus*, *Web of Science*, *PubMed*, *ScienceDirect* e *RSC Publishing*, buscando garantir a natureza científica para a presente revisão bibliográfica.

A busca dos trabalhos na plataforma foi direcionada pelo tema relacionado à aplicação de nanotubos de carbono e/ou de grafeno como elementos estruturantes na constituição dos sensores eletroquímicos. No Quadro 1 está representada a expressão lógica contendo as combinações de três grupos de palavras-chave, relacionados respectivamente ao material do sensor (CNTs/grafeno), ao dispositivo (sensor/biossensor) e à aplicação (alimentar).

Quadro 1- Detalhamento dos parâmetros utilizados na busca nas bases de dados.

<b>Expressão lógica</b>	
<i>("carbon nanotube" OR "CNT" OR "multi-walled carbon nanotube" OR "single-walled carbon nanotube" OR "graphene" OR "graphene oxide" OR "reduced graphene oxide") AND (sensor OR biosensor OR chemical sensor) AND (food OR food safety OR food quality OR contaminant OR pathogen OR additive OR residue OR spoilage)</i>	
<b>Filtros de refinamentos</b>	
<b>Período de publicação</b>	de 2021 a 2025
<b>Tipo de documento</b>	apenas artigos originais de pesquisa experimental <i>(Research Articles)</i>
<b>Áreas temáticas</b>	Ciência e Tecnologia de Alimentos, Engenharia de Alimentos, Química Analítica, Microbiologia de Alimentos e Nanotecnologia Aplicada

Fonte: autoria própria

Esta pesquisa na plataforma ocorreu no contexto da aplicação destes sensores em

análises de alimentos, considerando apenas estudos com análises comparativas a partir de dados experimentais, excluindo-se procedimentos estritamente teóricos. Quanto ao idioma, priorizou-se as publicações em inglês, devido ao predomínio da divulgação científica internacional sobre a temática.

A partir dos artigos apresentados, foram realizadas as escolhas através de leituras de seus títulos e resumos, com o propósito de avaliar o atendimento aos critérios estabelecidos para a construção do esteio bibliográfico do presente trabalho. Nesse processo de seleção, foram desconsideradas as publicações com características exclusivamente teóricas/conceituais e aquelas que, apesar de abordarem a temática sobre sensores, não envolviam o contexto de análise de alimentos. Este procedimento tornou possível a seleção dos artigos apresentados no Quadro 2, no qual são mostrados os artigos que atenderam aos critérios na triagem inicial sendo selecionados para leitura completa, a fim de confirmar a pertinência do conteúdo em relação ao escopo da revisão. Dessa maneira, estes artigos foram analisados com a finalidade de verificar as aplicações dos sensores à base de CNTs e grafeno na detecção de contaminantes em alimentos.

Quadro 2 – Referência bibliográfica selecionada para a pesquisa.

<b>Material</b>	<b>Referência</b>	<b>Material</b>	<b>Referência</b>
Grafeno	Pandit <i>et al.</i> (2021)	CNTs	Kumar <i>et al.</i> (2021)
	Moustafa <i>et al.</i> (2021)		Liu <i>et al.</i> (2021)
	Lin <i>et al.</i> (2021)		Zhang <i>et al.</i> (2024)
	Veronesi (2023)		Li <i>et al.</i> (2024)
	Tun <i>et al.</i> (2023)		Feng <i>et al.</i> (2024)
	Li <i>et al.</i> (2023)		
	Wu <i>et al.</i> (2024)		

Fonte: Autoria própria

Com o corpus da pesquisa estruturado, nos documentos selecionados foram consideradas as metodologias utilizadas nos estudos, procurando evidenciar as eventuais inovações das pesquisas. Além dos aspectos metodológicos, a análise considerou em cada artigo, o tipo de nanomaterial utilizado no estudo - CNTs ou grafeno, as características do dispositivo desenvolvido, a abordagem (*Bottom-up* ou *Top-down*) do método utilizado para a síntese do grafeno ou do CNT, além dos analitos envolvidos em cada estudo. Também foi

analisado o estudo sobre a efetividade dos sensores diante das influências da matriz alimentar<sup>1</sup>, envolvendo a seletividade, os limites e a robustez destes sensores.

---

<sup>1</sup> De acordo com Capuano e Janssen (2021, p. 19), "a matriz alimentar é a estrutura física e química dos alimentos que afeta o modo como os nutrientes e outros componentes são liberados, digeridos e absorvidos no trato gastrointestinal".

### 3 ARTIGO

## SENSORES ELETROQUÍMICOS BASEADOS EM NANOTUBOS DE CARBONO E GRAFENO NA DETECÇÃO DE CONTAMINANTES EM ALIMENTOS

### Resumo

Assegurar a qualidade dos alimentos ao longo de sua cadeia de produção, exige métodos de controle adequados à especificidades dos ambientes de produção alimentícia. A busca por métodos analíticos rápidos, sensíveis e seletivos para controle de qualidade e segurança do alimento tem impulsionado o desenvolvimento de pesquisas relacionadas ao uso de nanomateriais condutores como o grafeno e os nanotubos de carbono. Nesse sentido, o presente trabalho consiste em uma revisão bibliográfica abarcando o período de 2021 a 2025, sobre a aplicação destes dispositivos na detecção de contaminantes em alimentos. Os trabalhos analisados revelam que os CNTs e o grafeno têm sido amplamente usados em plataformas funcionais para a detecção de de pesticidas, metais pesados, aditivos sintéticos e contaminantes microbiológicos. Os estudos sobre a temática revelaram que a funcionalização com estes materiais estabelecem desempenho analítico elevado dos sensores. Algumas perspectivas futuras foram discutidas, destacando a combinação de tecnologias como a Inteligência artificial (IA) e a Internet das coisas (IoT), com os dispositivos a base de grafeno e CNTs.

**Palavras-chave:** sensores eletroquímicos; nanotubos de carbono; grafeno; alimentos; nanomateriais; detecção eletroquímica.

### Abstract

Ensuring food quality throughout the production chain requires control methods that are appropriate to the specific characteristics of food production environments. The search for rapid, sensitive, and selective analytical methods for food quality and safety control has driven the development of research related to the use of conductive nanomaterials such as graphene and carbon nanotubes. In this sense, this work consists of a literature review covering the period from 2021 to 2025 on the application of these devices in the detection of contaminants in food. The studies analyzed reveal that CNTs and graphene have been widely used in functional platforms for the detection of pesticides, heavy metals, synthetic additives, and microbiological contaminants. Studies on the subject have revealed that functionalization with these materials establishes high analytical performance of the sensors. Some future perspectives were discussed, highlighting the combination of technologies such as Artificial Intelligence (AI) and the Internet of Things (IoT) with graphene- and CNT-based devices.

**Keywords:** electrochemical sensors; carbon nanotubes; graphene; food; nanomaterials; electrochemical detection.

### 3.1 INTRODUÇÃO

A crescente conscientização acerca da segurança do alimento advém da procura por hábitos alimentares mais saudáveis, com alimentos que forneçam maior valor nutricional e garantam inocuidade para o consumidor. A Organização das Nações Unidas para a Alimentação

e a Agricultura (FAO, do inglês, *Food and Agriculture Organization*) define segurança do alimento como a seguridade de que este, quando preparado de acordo com o uso a que se destina, não causará danos ao consumidor (FAO, 2025).

Aspectos relacionados ao controle de qualidade e de contaminação nas etapas de produção, distribuição e consumo são determinantes para garantir a segurança do alimento. Dessa forma, diversas pesquisas são realizadas com objetivo de aumentar as formas de acompanhamento do estado de conservação dos alimentos, diminuindo perdas e preservando a saúde dos consumidores (VERONESI *et al.*, 2023).

Na indústria alimentícia, a busca pela inocuidade do alimento para o consumidor, torna necessária a utilização de metodologias para análise qualitativa de seus produtos, a fim de evitar a exposição humana à contaminantes. Segundo Sun *et al.* (2023), os contaminantes podem ser classificados em três categorias: biológicos, como bactérias, fungos e suas toxinas; físicos, como fragmentos de metais, vidros e demais corpos alheios ao alimento; e químicos, os quais abrangem metais pesados, aditivos não autorizados e substâncias tóxicas.

Entre os métodos utilizados para detecção de contaminantes químicos, destacam-se Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC, do inglês, *High-Performance Liquid Chromatography*), Cromatografia Gasosa (GC, do inglês, *Gas Chromatography*) e Espectrofotometria Ultravioleta-Visível (UV-Vis, do inglês, *Ultraviolet/Visible*) e Infravermelho (IR, do inglês, *Infrared*), utilizados para detecção de contaminantes, resíduos de pesticidas e compostos voláteis. No entanto, as metodologias envolvendo as técnicas supracitadas possuem limitações dentre as quais destacam-se as longas etapas de preparo, o elevado investimento em equipamentos e a necessidade de complexa infraestrutura laboratorial (Sun *et al.*, 2023).

Por outro lado, especificamente para a detecção de partículas e contaminantes químicos em alimentos, é notável o bom desempenho de sensores eletroquímicos. De acordo com Mohamed *et al.* (2024), o fato de possuírem alta sensibilidade e seletividade, gera ganhos na detecção de aditivos e contaminantes, superando as limitações de tempo, custo e complexidade dos métodos citados anteriormente.

Dentre os sensores eletroquímicos, destaca-se aqueles empregados para a detecção de toxinas em alimentos. Estes sensores utilizam materiais nanoestruturados, evidenciando-se os nanotubos de carbono e o grafeno. Estes nanomateriais de carbono possuem boa condutividade elétrica e alta capacidade de adsorção, características que proporcionam melhor sensibilidade e maior velocidade de resposta a estes sensores, além de maior estabilidade e precisão, quando comparados a sensores sem esses nanomateriais (Sinha *et al.*, 2024).

O objetivo dessa revisão de literatura é avaliar o emprego dos materiais a base de grafeno e nanotubos de carbono utilizados como sensores ou biosensores na detecção de contaminantes em alimentos, no período de 2021 a 2025.

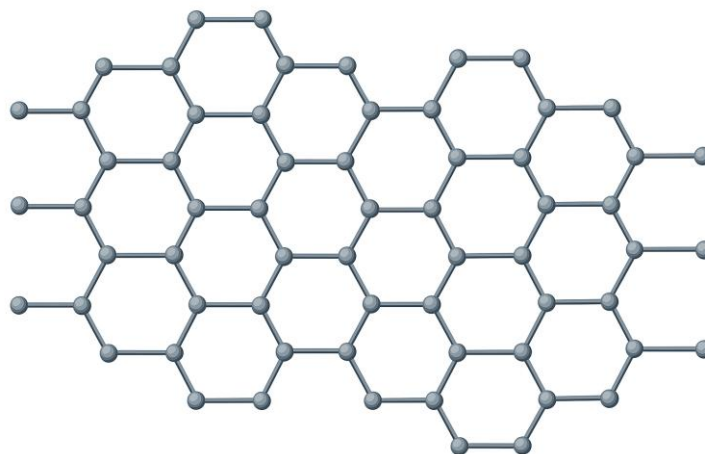
### 3.2 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO GRAFENO E NANOTUBO DE CARBONO

Nesta seção, para melhor entendimento diante da proposta desta revisão, serão detalhadas as principais características do grafeno e do nanotubos de carbono. Na sequência, serão apresentados os resultados obtidos a partir da análise de cada artigo selecionado para compor o corpus da pesquisa.

#### 3.2.1 Grafeno

Com destaque por suas excelentes propriedades de condutividade elétrica, resistência mecânica e leveza, o grafeno, de acordo com Novoselov *et al.* (2004), é um alótropo<sup>2</sup> do carbono constituído por uma única camada atômica de átomos de carbono arranjados em uma estrutura bidimensional com formas hexagonais. Esta disposição geométrica é semelhante ao conjunto de alvéolos de uma colmeia, como apresentado na Figura 2. Embora seja uma folha atômica extremamente fina, com espessura de apenas um átomo, devido a sua configuração plana e estendida, o grafeno é classificado como um material bidimensional (2D), tendo suas dimensões laterais significativamente maiores que sua espessura atômica (GRAPHENEA, 2021).

Figura 2- Estrutura atômica do grafeno: arranjo hexagonal bidimensional de átomos de carbono



Fonte: Autoria própria

---

<sup>2</sup> Segundo Russell (2001, p. 78), "alotropia é a existência de um mesmo elemento químico em duas ou mais formas físicas diferentes, como ocorre com o carbono, que pode existir como diamante, grafite ou fulereno".

Existem duas variações importantes do grafeno, a citar, o óxido de grafeno (GO, do inglês, *Graphene Oxide*) e o óxido de grafeno reduzido (rGO, do inglês, *Reduced Graphene Oxide*). O GO é forma oxidada de grafeno, obtida por oxidação de grafite, contendo muitos grupos funcionais de oxigênio (hidroxila, epóxidos, carbonila, carboxila) distribuídos nas superfícies laterais (planar) e nas arestas. Esses grupos introduzem defeitos na rede  $sp^2$ , convertendo partes dela para hibridização  $sp^3$ . Já o rGO é um material produzido através da redução química, térmica ou outro método de GO, removendo parte dos grupos oxigenados, restaurando em parte a rede  $sp^2$ . No entanto, rGO quase nunca recupera todas as propriedades do grafeno perfeito – ainda restam defeitos, falta de uniformidade, algumas regiões oxidadas, etc. (DREYER, 2010).

Quanto às propriedades, o grafeno apresenta características que possibilitam o seu uso em sensores eletroquímicos, ópticos e de campo elétrico, nos quais o material atua adaptado para a detecção de substâncias, devido a sua alta sensibilidade. O grafeno também pode ser adaptado para reter substâncias, atuando como plataforma funcionalizada em uma perspectiva seletiva com o analito alvo. No Quadro 3, são apresentadas as propriedades mais relevantes do grafeno.

Quadro 3 – Propriedades do grafeno e suas potenciais aplicações

Propriedade	Descrição
Condutividade elétrica	Possui alta condutividade elétrica, pelo fato da grande mobilidade dos elétrons na rede cristalina. Esta propriedade viabiliza sua vasta aplicação em componentes eletrônicos e semicondutores
Condutividade térmica	Apresenta elevada condutividade térmica na superfície da folha, facilitando a dispersão de calor em processos que necessitam de regulação térmica
Resistência mecânica	Módulo de Young <sup>3</sup> da ordem de 1 TPa, o que significa que é um material extremamente rígido. Sua resistência à tração é superior a do aço, apresentando densidade muito inferior
Leveza	Apresenta massa superficial reduzida, por ser uma estrutura ultrafina. Estrutura ultrafina com massa superficial reduzida, ideal para aplicações aeroespaciais e dispositivos eletrônicos flexíveis
Transparência óptica	Viabiliza a transmissão de até 97,7% da luz visível, sendo utilizado em telas sensíveis ao toque, em sensores ópticos e dispositivos optoeletrônicos

Fonte: Kumar *et al.* (2021).

<sup>3</sup> Módulo de Yang é uma propriedade mecânica referente à capacidade de um material resistir à deformação quando submetido a uma força (Beer; Johnston, 2010).

A comparação entre as propriedades do grafeno, GO e rGO evidenciam as suas diferenças estruturais e eletrônicas, influenciando na seleção destes materiais para a aplicação de sensores e biossensores. No Quadro 4, é apresentada uma comparação entre as propriedades do grafeno, GO e rGO.

Quadro 4 – Comparação das propriedades do grafeno, óxido de grafeno (GO) e óxido de grafeno reduzido (rGO).

Propriedade	Grafeno (puro)	Óxido de Grafeno (GO)	Óxido de Grafeno Reduzido (rGO)
Estrutura eletrônica	Rede $sp^2$ contínua, altamente conjugada	Rede interrompida por grupos oxigenados ( $sp^2 + sp^3$ )	Parcialmente restaurada ( $sp^2$ com defeitos residuais)
Condutividade elétrica	Muito alta ( $\sim 10^6$ S/m)	Muito baixa (isolante ou semicondutor defeituoso)	Intermediária (depende do grau de redução)
Grupos funcionais	Ausentes ou mínimos	Abundantes: $-OH$ , $-COOH$ , $C=O$ , epóxidos	Reduzidos; alguns grupos residuais permanecem
Dispersão em água	Baixa (hidrofóbico, tende a agregação)	Alta (hidrofílico, boa estabilidade coloidal)	Moderada (pode requerer surfactantes)
Área superficial	Muito alta ( $\sim 2630$ m <sup>2</sup> /g para folha única)	Alta, dependendo do empilhamento	Alta, mas inferior ao grafeno puro
Estabilidade térmica	Muito alta ( $>600$ °C)	Baixa ( $\sim 200$ – $300$ °C, começa a se decompor)	Intermediária ( $\sim 400$ – $500$ °C)
Propriedades mecânicas	Alta resistência e módulo de Young ( $\sim 1$ TPa)	Menor que o grafeno (devido a defeitos estruturais)	Intermediária
Facilidade de funcionalização	Baixa	Alta (devido à presença de grupos oxigenados)	Moderada
Aplicações típicas	Eletrônica, sensores de alta precisão, compósitos leves	Membranas, biossensores, adsorventes, compósitos hidrofílicos	Supercapacitores, sensores, filmes condutores flexíveis

Fonte: Adaptado de (DREYER *et al.*, 2010).

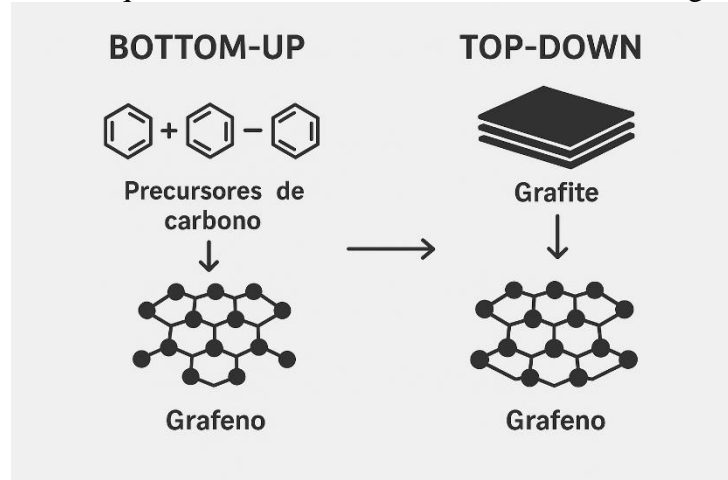
É profundamente interligada a relação entre a aplicação do grafeno e sua síntese, sendo a aplicação determinada de acordo com as propriedades do material (Li, 2024). Em outras palavras, a forma como o grafeno é produzido e as características que ele apresenta são cruciais para definir onde e como poderá ser utilizado.

Diversos métodos para a síntese do grafeno foram desenvolvidos, os quais são classificados em *Top-down* e *Bottom-up*. Esta classificação define os aspectos dos produtos

oriundos de grafeno e suas características (Biliak, 2023).

A abordagem *Top-down* parte de materiais macroscópicos, como grafite, fulereno, nanotubos de carbono e óxido de grafeno, envolvendo métodos que geram folhas finas de grafeno. Já os métodos com abordagens *Bottom-up*, partem da organização controlada de estruturas atômicas de carbono, a saber: metano, benzeno, acetileno, monóxido de carbono e etanol, formando nanopartículas de grafeno através da deposição química de vapor. Um esquema ilustrativo destas abordagens é apresentado na Figura 3 (HUTAPEA *et al.*, 2025).

Figura 3- Esquema ilustrativo dos métodos de síntese do grafeno.



Fonte: Autoria própria.

Grandes quantidades de grafeno são produzidas usando a abordagem *Top-down*, porém os métodos utilizados no escopo desta abordagem ainda apresentam como desafio a manutenção da qualidade dos produtos resultantes. Dentre estes métodos de síntese, destacam-se a exfoliação por moagem de bolas, exfoliação eletroquímica, exfoliação a base de solvente, exfoliação de óxido de grafite e descarga de arco (HUTAPEA *et al.*, 2025).

A exfoliação por moagem de bolas foi o primeiro método usado experimentalmente para a síntese do grafeno. Consiste em separar as camadas de grafite usando métodos mecânicos. A exfoliação mecânica pode ser compreendida como força de cisalhamento, resultando na clivagem do grafite. Também é reconhecida como esfoliação em força normal, ao provocar o enfraquecimento das forças de Van der Waals entre as camadas, ocasionando a exfoliação do grafeno. Neste método, o grafite é golpeado aleatoriamente por bolas de aço ou zircônia. O grafeno produzido é de altíssima qualidade, mas com baixa escala (HUTAPEA *et al.*, 2025).

A técnica de exfoliação eletroquímica consiste na aplicação de uma diferença de potencial elétrico a um eletrodo de grafite imerso em um eletrólito. Os íons do eletrólito (cátions

ou ânions) entrepermeiam as camadas de grafite, provocando sua expansão, que leva à exfoliação do grafeno (LIU *et al.*, 2022).

Na exfoliação a base de solvente, a separação das camadas de grafeno é feita através da interação entre solvente e as forças de Van der Waals. A solução de grafite e solvente passa por um processo de sonificação para a separação das camadas de grafeno. Em seguida, a solução é filtrada e seca. (NG *et al.*, 2023).

No método da exfoliação de óxido de grafite, os íons, ao entrar em contato com as camadas de grafite, geram reações de oxidação. Destas reações, saem bolhas de gás que provocam uma pressão interna, empurrando as camadas. Posteriormente, com o ultrassom, as microondas promovem cavitação, complementando a separação das camadas. (YANG, 2022).

A descarga de arco é uma técnica estruturada a partir da realização de um arco elétrico entre eletrodos de grafite ou carbono submetidos a uma atmosfera com gás inerte. A energia muito alta do arco elétrico provoca vaporização do carbono. Com a condensação, formam-se camadas de grafeno. Dependendo dos ativos associados no processo de síntese, pode ser produzido grafeno dopado ou grafeno com múltiplas camadas (AWOJI *et al.*, 2023).

A síntese do GO também é realizada na perspectiva *Top-down*. Trata-se da oxidação química do grafite através do método de Hummers modificado. Esta técnica se refere a utilização de um meio altamente ácido, geralmente por ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), no qual o permanganato de potássio ( $KMnO_4$ ) é o agente oxidante. Com a introdução de grupos funcionais epóxidos, hidroxilas, carbonilas e carboxilas na estrutura lamelar do grafeno, as camadas sofrem exfoliação e aumento de sua hidrofobicidade. Então, são realizadas sucessivas lavagens com peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) até que o pH se torne neutro. O material obtido apresenta potencial para ser usado em sensores, compósitos e dispositivos eletrônicos, devido a sua alta dispersibilidade em meio aquoso e ampla funcionalização superficial (MARCANO, 2010).

Também realizada na perspectiva *Top-down*, a síntese do rGO é realizada através da redução parcial do GO. Busca-se a restauração incompleta da estrutura conjugada de carbono presente no grafeno pela retirada dos grupos oxigenados que foram introduzidos durante a oxidação do grafite. Esta remoção pode ser realizada por diversas técnicas, destacando-se os métodos químicos, térmicos, eletroquímicos e, mais recentemente, técnicas baseadas em radiação (como micro-ondas ou laser). Entre as técnicas para a síntese do rGO, a redução química é a abordagem mais utilizada, por apresentar baixo custo, alta escalabilidade e menor complexibilidade técnica. Consiste na dispersão do GO em meio líquido e no uso de agentes redutores como hidrazina, ácido ascórbico ou borohidreto de sódio. De maneira alternativa,

podem ser utilizadas as técnicas da redução térmica e da redução eletroquímica (DREYER, 2010).

Com relação à abordagem *Bottom-up* para síntese do grafeno, ressalta-se a boa qualidade do produto obtido e sua aplicabilidade em escala. No entanto, algumas limitações ainda são observadas, de acordo com Olatomiwa *et al.* (2022), a citar, o custo elevado dos processos envolvidos e a necessidade de transferência do grafeno para substratos específicos. No escopo desta abordagem, destacam-se as técnicas do crescimento epitaxial sobre carbeto de silício (SiC), da síntese a partir de precursores moleculares e da síntese sobre superfícies (OLATOMIWA *et al.*, 2022).

A técnica do crescimento epitaxial sobre carbeto de silício (SiC) consiste na sublimação do silício, em temperaturas superiores a 1300 °C. Os átomos de carbono se reorganizam sobre o substrato isolante, formando grafeno. Com alta qualidade estrutural, o grafeno produzido contempla as exigências para o uso em dispositivos eletrônicos. Apesar deste fato, sua utilização na indústria é limitada pelo alto custo do substrato SiC e a imprecisão no controle da estrutura laminar do grafeno. Nesse sentido, os estudos de Zhang *et al.* (2023) demonstram que a uniformidade da temperatura da superfície do SiC influencia na estabilidade e taxa de cobertura do epigrafeno. Esta taxa passa de 80% na ocupação do grafeno de camada única, para 94% no epigrafeno, fato que pode ampliar a sua aplicação industrial.

O método da síntese a partir de precursores moleculares consiste na formação de nanofolhas de grafeno a partir de moléculas orgânicas submetidas a reações químicas. Existe controle preciso sobre as bordas, poros e dopagem do grafeno. A principal limitação desta técnica é a sua aplicação restrita às escalas laboratoriais devido à complexidade dos processos envolvidos (KHATUN *et al.*, 2024).

A síntese sobre superfícies é uma técnica refinada, de alto custo, restrita às pesquisas. Consiste na formação de grafeno ou nanofitas de grafeno a partir da evaporação de um aromático halogenado em uma superfície bem definida (geralmente, cristal simples). Com o desencadeamento de reações de acoplamento de Ullmann, formam-se polímeros ou metal-orgânico (HOUTSMA *et al.*, 2021).

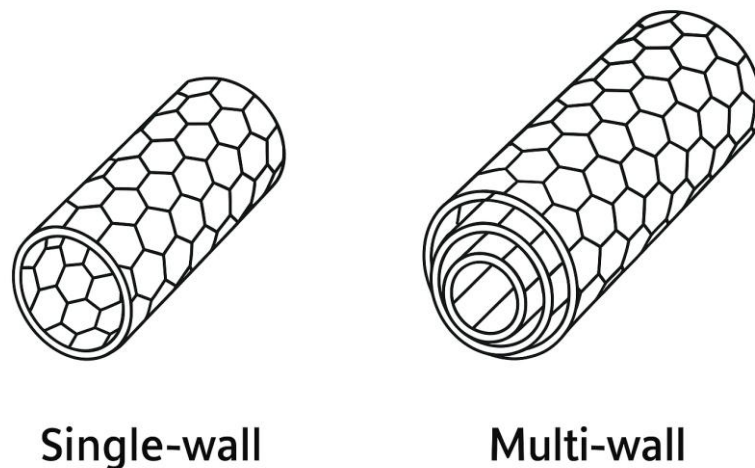
### 3.2.2 Nanotubos de Carbono (CNTs)

Os CNTs são estruturas alótropas do carbono que consistem em cilindros, formados pelo enrolamento de folhas de grafeno em escala nanométrica. Autor da descoberta dos CNTs, Iijima (1991), os define como sendo “estruturas tubulares formadas por folhas de grafeno enroladas com diâmetro nanométrico e estrutura cristalina altamente ordenada”. O autor explica que a

estrutura tubiforme quase unidimensional, proporciona a este material propriedades eletrônicas e mecânicas específicas. As principais formas de classificação dos CNTs referem-se a estrutura atômica, ao número de camadas e às suas propriedades eletrônicas.

Quanto ao número de camadas, os CNTs são classificados em nanotubos de paredes simples (SWCNTs, do inglês, *Single-Walled Carbon Nanotubes*) e nanotubos de paredes múltiplas (MWCNTs, do inglês, *Multi-Walled Carbon Nanotubes*). Na Figura 4 são apresentadas as representações gráficas destas duas estruturas.

Figura 4- Representação esquemática da estrutura de nanotubos de carbono de parede simples (SWCNTs) e de paredes múltiplas (MWCNTs).



Fonte: Autoria própria.

Os SWCNTs apresentam apenas uma camada de grafeno enrolada em forma de cilindro, com diâmetro típico variando entre 0,4 a 2 nm. Podem ser metálicos ou semicondutores, dependendo da quiralidade<sup>4</sup>. Destacam-se por suas propriedades eletrônicas estáveis, alta mobilidade de carga, elevada razão entre comprimento e diâmetro e capacidade de funcionalização química controlada. Os SWCNTs são preferidos em eletrônica molecular, sensores de alta sensibilidade e dispositivos optoeletrônicos, onde suas propriedades bem definidas são determinantes. Entretanto, a obtenção de SWCNTs com alto grau de pureza é mais complexa, exigindo métodos de separação e técnicas de caracterização mais precisos e rigorosos. (SU *et al.*, 2023).

Em contrapartida, os MWCNTs apresentam várias camadas concêntricas de nanotubos, com espaçamento intercamadas semelhante ao do grafite (~0,34 nm). Os diâmetros externos

<sup>4</sup> Quiralidade é a maneira como a folha de grafeno está “enrolada” para formar o nanotubo. O vetor quiral conecta dois hexágonos equivalentes na rede de grafeno, determinando formatos diferentes do CNT (armchair, zigzag ou quiral), e mudando suas propriedades (Kato Group).

dos MWCNTs podem variar de 5 até mais de 100 nm, dependendo do número de camadas. Apresentam comportamento eletrônico menos previsível do que os SWCNTs devido ao fato de que cada camada apresenta quiralidade e propriedades eletrônicas distintas. Geralmente, os MWCNTs apresentam características referentes a maiores estabilidades térmica e mecânica, facilidade de síntese em larga escala e maior resistência à deformação estrutural. Estas características viabilizam a aplicação como reforço de polímeros, tintas condutivas e materiais de eletrodo (IJIMA, 1991).

No Quadro 5, são apresentadas as características que justificam a sua ampla exploração em áreas como eletrônica, materiais compósitos e sensores, devido à combinação única de condutividade, resistência mecânica e área superficial.

Quadro 5– Propriedades dos CNTs relevantes para aplicações em alimentos.

Propriedade dos CNTs	Descrição e Aplicação na Indústria Alimentícia
Alta área superficial específica	Esta propriedade contribui para o aumento dos espaços de adsorção das moléculas-alvo. Este fato provoca o aumento da sensibilidade dos sensores, além de tornar mais eficiente a detecção de contaminantes e biomoléculas.
Notável condutividade elétrica	Em sensores eletroquímicos e transistores de efeito de campo (FET <sup>5</sup> ), com rápida e sensível transferência de carga.
Estabilidade química e estrutural	Tornam possível a ação dos sensores nas diversas condições ambientais, considerando o pH, a umidade e os compostos orgânicos, frequentes em alimentos e bebidas.
Capacidade de funcionalização	Possibilitam modificações a partir de grupos funcionais (–COOH, –OH), nanopartículas metálicas e bioreceptores (anticorpos, aptâmeros), ampliando a capacidade de seleção.
Compatibilidade com miniaturização e integração	Viabiliza a promoção de sensores portáteis, dispositivos inteligentes e integração em filmes ou embalagens com controle ativo.

Fonte: Adaptado de Ferrier; Honeychurch (2021).

Similar à obtenção do grafeno, a síntese de CNTs envolve técnicas com abordagens *Bottom-up* e *Top-down*. Cada uma dessas apresenta, técnicas de síntese que variam de acordo com a construção ou modificação das estruturas de carbono. De acordo com Khatun (2024), os métodos *Bottom-up* são os mais utilizados para a obtenção dos nanotubos de carbonos a partir de precursores moleculares ou atômicos em ambientes controlados. Entre estes métodos,

<sup>5</sup> FETs (Field-Effect Transistors) são dispositivos semicondutores que utilizam um campo elétrico para monitorarem o fluxo de corrente elétrica (Malvino, *et al.*, 2016).

destacam-se a descarga de arco elétrico, a ablação a laser e a deposição química a vapor (CVD, do inglês, *Chemical Vapour Deposition*).

Técnica precursora na obtenção de CNTs, a descarga de arco consiste na geração de um arco elétrico entre dois eletrodos de grafite em uma atmosfera inerte, geralmente com o uso do gás hélio. Neste ambiente, há a sublimação do carbono, que se condensa sob forma de nanotubos. Geralmente, forma-se MWCNTs, que possuem alta pureza estrutural. Por outro lado, este método apresenta baixo rendimento e limitação para a produção em escala (SINGH, 2017).

Já a ablação a laser é uma técnica utilizada especialmente na obtenção de SWCNTs. O método consiste na utilização de um laser de alta energia para vaporizar um alvo de grafite dopado<sup>6</sup> com catalisadores metálicos, em ambiente com temperatura elevada. Apesar da alta pureza, os produtos obtidos possuem custo elevado e a técnica apresenta limitações em escala industrial (HABEEB *et al.*, 2025).

Método utilizado em aplicações industriais, a CVD consiste na decomposição de gases contendo carbono (Metano (CH<sub>4</sub>) ou acetileno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)) com catalisadores metálicos, Fe, Ni, Co, submetidos à temperaturas elevadas. Este método possibilita o controle sobre o diâmetro e a densidade dos nanotubos, apresentando-se adequado para a obtenção de MWCNTs e SWCNTs (MANAWI *et al.*, 2023).

Além destes métodos de síntese de CNTs convencionais, na abordagem *Bottom-up*, a pirólise de compostos orgânicos apresenta-se como uma abordagem alternativa e sustentável que envolve polímeros, açúcares ou materiais metal-orgânicos (MOFs, do inglês, *Metal-Organic Frameworks*). Estes materiais são aquecidos em atmosferas inertes, formando materiais à base de carbono que contêm segmentos semelhantes ao grafeno. Consiste em uma técnica ideal para a síntese do grafite poroso, apesar do material produzido apresentar menor pureza estrutural. Apresenta custo reduzido e baixo impacto ambiental (PREKODRAVAC *et al.*, 2021).

De forma análoga à abordagem discutida, os métodos com abordagem *Top-down*, utilizados para a síntese de CNTs, vêm sendo explorados para a produção de estruturas derivadas de nanotubos. Dentre estas técnicas, destacam-se a irradiação com feixes de elétrons e a sonificação.

A técnica de irradiação com feixe de elétrons envolve a irradiação de MWCNTs com íons de nitrogênio utilizando um implantador iônico de alta dose, provocando cortes ou

---

<sup>6</sup> O grafite dopado é formado pela inserção de elementos como nitrogênio ou boro em sua estrutura, o que altera suas propriedades e o torna mais eficiente em aplicações eletroquímicas e tecnológicas (WANG *et al.*, 2014).

perfurações através da incorporação de átomos de nitrogênio na estrutura do nanotubo (Shen *et al.*, 2017).

Já a sonificação consiste no uso de ondas ultrassônicas para modificar os CNTs existentes em suspensão. Eles podem ser ecurtados pelo tratamento com ultrassom de 20 kHz em combinação com HNO<sub>3</sub> diluído e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> diluído (HUSSAIN *et al.*, 2023).

Os nanotubos de carbono (CNTs) constituem-se em materiais relevantes para o desenvolvimento de sensores e biossensores devido às propriedades referentes à elevadas condutividade elétrica e capacidade de funcionalização química, possibilitando a utilização destes equipamentos em processos de análise alimentar para a detecção de contaminantes, patógenos e resíduos químicos em alimentos (HUSSAIN *et al.*, 2023).

### 3.3 APLICAÇÃO DE GRAFENO EM SENSORES E BIOSSENSORES PARA DETECÇÃO DE CONTAMINANTES EM ALIMENTOS

A consolidação do uso de sensores eletroquímicos baseados em grafeno na detecção de resíduos de pesticidas organofosforados em frutas, vegetais e grãos, se deve ao potencial do grafeno na ampliação de sinais analíticos, possibilitando reações de reconhecimento bastante específicas, especialmente ao ser combinado com enzimas, como a acetilcolinesterase (LI *et al.*, 2023).

Biossensores com grafeno funcionalizado com anticorpos, aptâmeros ou DNA são utilizados para a detecção e reconhecimento seletivo de analitos-alvo como aflatoxina B<sub>1</sub>, que são micotoxinas comuns em cereais e oleaginosas. Estudos recentes revelam que sensores baseados em rGO funcionalizado com aptâmeros são capazes de detectar aflatoxinas de maneira rápida e com custo inferior ao dos métodos cromatográficos tradicionais (ZHANG *et al.*, 2021).

Para a detecção de resíduos de antibióticos em leite, carnes e ovos são utilizados os sensores baseados em nanocompósitos de grafeno e nanopartículas metálicas (ex.: Au, Ag). Estes sensores atuam nas interações eletroquímicas ou ópticas entre o nanomaterial e o contaminante, apresentando boa seletividade em amostras de matrizes alimentares complexas (PEI *et al.*, 2022).

A utilização de sensores baseados em grafeno na indústria alimentícia apresenta elevado potencial para aprimorar a rastreabilidade dos produtos, assegurar o cumprimento das normas regulatórias vigentes, buscando a segurança do consumidor. Com os avanços nas áreas de nanotecnologia e microfabricação, torna-se viável a integração desses sensores em dispositivos portáteis, permitindo a realização de testes em campo, bem como a implementação de sistemas de monitoramento em tempo real (UNICAMP; USP, 2022).

No Quadro 6 são apresentados exemplos de estudos realizados a partir de sensores e biossensores utilizados na detecção de contaminantes em alimentos.

Quadro 6 – Resumo das características de estudos envolvendo sensores e biossensores baseados em grafeno, no período de 2021 a 2025.

Material	Método de síntese do grafeno	Tipo de abordagem para a síntese	Tipo de dispositivo	Aplicação	Referência
Grafeno	CVD <sup>1</sup>	<i>Bottom-up</i>	Sensor	Detecção de bactérias	Pandit <i>et al.</i> (2021)
	Oxidação de grafite (GO <sup>2</sup> )	<i>Top-down</i>	Sensor	Sensor de umidade: GO + PVC	Moustafa <i>et al.</i> (2021)
	CVD	<i>Bottom-up</i>	Biossensor	Detecção de Indol	Lin <i>et al.</i> (2021)
	CVD	<i>Bottom-up</i>	Sensor	Detecção de VOCs	Veronesi <i>et al.</i> (2023)
	Redução in situ do GO	<i>Bottom-up</i>	Biossensor	Detecção de pesticida organofosfarado	Tun <i>et al.</i> (2023)
	Oxidação de grafite (GO)	<i>Top-down</i>	Sensor	Detecção de ácido gálico em alimentos.	Li <i>et al.</i> (2024)
	Crescimento epitaxial em SiC <sup>3</sup>	<i>Bottom-up</i>	Sensor	Detecção de conservantes	Wu <i>et al.</i> (2024)

<sup>1</sup>CVD: Deposição Química em Fase de Vapor (do inglês, *Chemical Vapor Deposition*).

<sup>2</sup> GO: Óxido de Grafeno (do inglês, *Graphene Oxide*).

<sup>3</sup> SiC: Carbetto de Silício, (do inglês, *Silicon Carbide*).

Fonte: Autoria própria.

### 3.3.1 Aplicação do grafeno em sensores para a detecção de compostos em alimentos

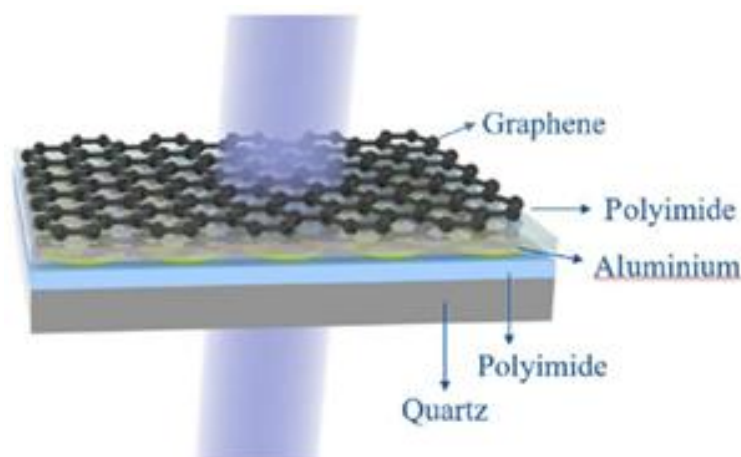
Em um trabalho recente de revisão literária, Gao *et al.* (2023), apresentaram várias pesquisas desenvolvidas empregando técnicas envolvendo sensores estruturados com grafeno para a detecção de microrganismos em alimentos.

No contexto da segurança de alimentos e alimentar, destaca-se a pesquisa realizada por Moustafa *et al.* (2021), que desenvolveram um sensor de grafeno baseado em nanocompósitos para detecção de umidade em alimentos. A pesquisa foi realizada com o uso de cloreto de polivinila plastificado (PPVC, do inglês, *Plasticized Polyvinyl Chloride*) e fosfato de tricresila

(TCP, do inglês, *Tricresyl Phosphate*). Os nanocompósitos foram desenvolvidos usando três proporções diferentes de nanoplaquetas de GO, incluindo 1%, 3% e 6% em massa de GO. As soluções foram submetidas aos seguintes processos, envolvendo reação química *in situ*: agitação em temperaturas elevadas, tratamento em atmosfera de gelo, sonicação e secagem. Os testes dos sensores PPVC/GO 1%, 3% e 6% envolveram o registro da impedância simultaneamente a cada 3 segundos. Estes registros foram utilizados para o cálculo de resposta do sensor, relacionando a impedância em baixa umidade relativa (UR) e e em alta UR. Os sensores detectaram umidade relativa em uma ampla faixa de 11–85%, envolvendo uma frequência entre 100 Hz e 100 kHz. Esta faixa ampla nos testes foi importante para validar a detecção de mudanças de umidade, controlando o aparecimento de microrganismos nas amostras de alimentos. O melhor desempenho entre os protótipos desenvolvidos, foi atribuído àqueles com 3% de GO. O tempo de resposta destes protótipos foi de apenas 4s e o tempo de recuperação de 6s. Também constatou-se muita rapidez no tempo de recuperação destes protótipos, apenas 6s. Estes bons resultados são justificados pela absorção de moléculas de água devido ao fato do GO apresentar grupos polares de oxigênio e também do TCP conter átomos de oxigênio.

O trabalho de Wu *et al.* (2024) foi realizado a partir da construção de sensores para detectar e diferenciar os conservantes benzoato de sódio e sorbato de potássio. Estes dispositivos foram desenvolvidos com metassuperfícies de grafeno envolvendo ressonância anapolar. Na Figura 5 é apresentada a vista superior da estrutura tridimensional do sensor desenvolvido.

Figura 5 - Esquema gráfico da estrutura tridimensional do sensor.



Fonte: Wu *et al.* (2024). Licença de uso: CC BY 4.0 – De Gruyter.

Os autores constataram que a detecção sensível ocorre pelo efeito de dopagem

eletrostática influenciada pelos conservantes, que provocam alterações na condutividade da camada de grafeno ao modificar sua polaridade de carga. As propriedades eletromagnéticas e ressonantes do metamaterial ajustam-se através do controle da distribuição de portadores no grafeno.

Os estudos demonstraram que este sensor, denominado *Sensor Magnético de Grafeno Nanostruturado Anódico* (An-Grafeno-Ms, do inglês, *Anodic Nanostructured Graphene Magnetic Sensor*) detecta mais fortemente o benzoato de sódio. Este fato refre-se à interação entre o grafeno e os elétrons do anel benzênico do benzoato. Esta interação, por sua vez, provoca uma dopagem eletrostática, realçando a ressonância anapolar.

Quando comparado a resultados de trabalhos anteriores, o sensor An-Grafeno-Ms apresentou desempenho superior com relação à sensibilidade e ao limite de detecção. Comparando-se com o sensor de grafeno funcionalizado com Ms para detecção de clorpirifós-metil reportado por Xu et al. (2020), que apresentou limite de detecção (LOD, do inglês, *Limit of Detection*) de 0,13 mg/mL e variação de modulação ( $\Delta T$ ) de 17%, o sensor proposto para benzoato de sódio obteve um LOD de 0,12 fg/mL e  $\Delta T$  de 38,52%, indicando uma melhora expressiva na capacidade de detecção e resposta óptica. Em relação ao estudo de Xu et al. (2019), cujo sensor de grafeno + Ms detectou clorpirifós-metil com LOD de 0,2 ng/mL e  $\Delta T$  de 35%, o desempenho do presente trabalho também foi superior, tanto em sensibilidade quanto em variação de modulação. Esses resultados sugerem que a combinação do grafeno com estruturas específicas e a presença (ou ausência) do empilhamento  $\pi$ - $\pi$  desempenham papel fundamental. Dessa maneira, o dispositivo apresenta alta potencialidade de utilização na indústria alimentícia, para a detecção e seleção de conservantes comumente usados em alimentos processados.

O trabalho desenvolvido por Li *et al.* (2024) no desenvolvimento de um sensor eletroquímico combinando um filme de sílica mesoporosa verticalmente ordenado (VMSF<sup>7</sup>, do inglês, *Vertically Ordered Mesoporous Silica Film*) com um nanocompósito de grafeno reduzido (ErGO, do inglês, *Electrochemically Reduced Graphene Oxide*) e pontos quânticos de grafeno dopados por nitrogênio (NGQDs, do inglês, *Nitrogen-doped Graphene Quantum Dots*), sobre um eletrodo de carbono vítreo (GCE, do inglês, *Glassy Carbon Electrode*). O dispositivo foi utilizado para detectar ácido gálico (GA, do inglês, *Gallic acid*) em chá verde.

Para a síntese, foi realizada uma mistura aquosa de GO (óxido de grafeno) e NGQDs no eletrodo GCE, seguida pela montagem do VMSF através de auto montagem assistida

---

<sup>7</sup> A sílica mesoporosa verticalmente ordenada (VMSF) é um material nanoporoso altamente organizado com canais perpendiculares à superfície, frequentemente aplicado na modificação de eletrodos para sensores e biossensores (ZHANG *et al.*, 2023).

eletroquimicamente (EASA, do inglês, *Electrochemically Assisted Self-Assembly*). Durante o crescimento do VMSF foi aplicado um potencial negativo que promoveu a redução *in situ* do GO para ErGO. O resultado foi um modificador de superfície onde a sinergia entre ErGO, NGQDs e os nanocanais do VMSF proporcionou uma ampliação de sinal (próxima de dez vezes) para GA em comparação com eletrodos modificados apenas com ErGO ou apenas com NGQDs.

Quanto aos resultados analíticos, o sensor apresentou faixa linear dupla para GA de 0,1 a 10  $\mu\text{M}$  e de 10 a 100  $\mu\text{M}$ , com LOD de 81 nM. A seletividade foi avaliada em amostras de chá verde, com taxas de recuperação entre ~100 % e ~106 % e desvio padrão relativo menor que 3,5 %. Estes resultados demonstraram que este sensor possui perspectiva promissora para análise rápida de GA em produtos alimentares.

### 3.3.2 Aplicação do grafeno em biossensores para a detecção de contaminantes em alimentos

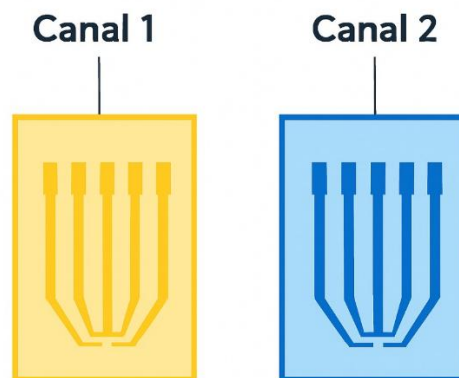
Com o objetivo de controlar a adesão e o crescimento bacteriano em superfícies, o estudo de Pandit *et al.* (2021), publicado na revista *Sensors*, estruturou-se pela construção de um sensor protótipo baseado em grafeno não funcionalizado, ou seja, no qual não houve a introdução de carboxil, hidroxila, ou outro grupo funcional em sua estrutura química. A pesquisa destes autores buscou avaliar a capacidade do dispositivo quanto ao reconhecimento de padrões de crescimento e adesão de bactérias em superfícies. Dessa maneira, o funcionamento do sistema desenvolvido baseou-se na relação entre as alterações na resistência elétrica do grafeno e a adesão, ou formação de biofilmes, na parte condutora do grafeno.

Foram utilizados dois tipos de bactérias, morfologicamente diferentes: as Gram-negativas, representadas pelas *Pseudomonas aeruginosa* e as Gram-positivas, representadas pelas *Staphylococcus epidermidis*. Considerando o contexto da análise de qualidade alimentar, estas bactérias patogênicas podem ser responsáveis pela deterioração de alimentos por doenças transmitidas por alimentos (DTAs). A partir do controle e seleção desta bactérias, buscou-se demonstrar o potencial do sensor em identificar os distintos padrões de comportamento destes microrganismos. Devido a características essenciais para implementações em controle microbiológico, destacam-se os padrões referentes aos mecanismos de adesão celular e dinâmica de crescimento das bactérias.

Assim, foi desenvolvido um chip (sensor) com substrato de  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , sobre o qual foram colocados eletrodos de ouro e cromo com o objetivo de assegurar a condutividade e adesão apropriadas ao sistema. Foram formados os canais 1 e 2, conforme a Figura 6. Estes canais possibilitaram a realização de medições comparativas, a partir da diferença na maneira como

cada uma destas espécies de bactérias se aderiu e cresceu sobre o grafeno. Já a síntese do grafeno ocorreu pela CVD com substrato de cobre. Posteriormente, o grafeno foi transferido para o chip através do método que utiliza Polimetilmetacrilato (PMMA, do inglês *Polymethyl Methacrylate*). Esse procedimento evita danos mecânicos ao grafeno, ao formar uma camada rígida durante a transferência do grafeno para o chip.

Figura 6- Indicação dos canais formados no sensor.



Fonte: Autoria própria.

Na plataforma desenvolvida foram colocadas as culturas de bactérias vivas, sendo o tempo de incubação de até 5 horas. Durante este período, foram continuamente realizadas medições da resistência elétrica do grafeno. Ao término deste tempo, o antibiótico ciprofloxacina foi colocado para inativar as bactérias, sendo as medições realizadas por mais 3 horas.

Foram utilizadas técnicas de microscopia eletrônica de varredura para a visualização da adesão celular e da formação de biofilmes na superfície de grafeno. Este controle microscópico viabilizaram a confirmação da interação entre o material sensor e os microrganismos. Além da utilização destas técnicas, as práticas experimentais foram direcionadas com duplicações biológicas com dois canais independentes em cada. O desenvolvimento do trabalho com estas várias montagens ocasionaram maior controle sobre a variabilidade dos dados obtidos.

A partir dos resultados, foi possível diferenciar as duas espécies de bactérias envolvidas na pesquisa, com base no padrão temporal da resistência elétrica, pois para a *P. aeruginosa* houve um aumento gradativo da resistência elétrica do grafeno a partir das 3 horas, o que coincide com a fase exponencial de crescimento. No caso da *S. epidermidis*, o comportamento da resistência se diferenciou, apresentando diminuições ou variações irregulares.

Além de tornar possível a diferenciação destes microrganismos, a análise das curvas de

resistência  $\times$  tensão de gate<sup>8</sup> ( $R(Vg)$ ) demonstrou variações distintas para cada tipo de bactéria, o que possibilitou a caracterização dos perfis de interação entre os microrganismos e a superfície condutora, evidenciando a capacidade que o sensor possui em reconhecer padrões de crescimento e adesão bacteriana. Embora não ofereça a garantia de identificar precisamente a espécie microbiana, o sensor é recomendável para detectar precocemente, contaminações, o que favorece sua aplicação nas embalagens e monitoramento durante o transporte de alimentos.

Outro estudo, destacado por Gao *et al.* (2023), que apresenta o uso do grafeno para dispositivos relacionados a análise de alimentos, foi a pesquisa realizada por Lin *et al.* (2021). Foram desenvolvidos transistores de efeito de campo de grafeno (G-FETs, do inglês, *Graphene Field-Effect Transistors*), que atuam como sensores altamente sensíveis para detectar uma molécula volátil metabólica bacteriana denominada Indol.

Este composto é produzido por bactérias no processo de decomposição do aminoácido triptofano. A presença de indol em alimentos está frequentemente associada à atividade de microrganismos contaminantes, sobretudo em produtos fermentados ou submetidos a condições inadequadas de armazenamento. Por apresentar um odor intenso e desagradável, o indol é comumente identificado em alimentos deteriorados, atuando como um marcador químico útil para a detecção de contaminação bacteriana em diversas matrizes alimentares. (BOHBOT *et al.*, 2020).

No trabalho de Lin *et al.* (2021), os G-FETs foram fabricados de duas maneiras diferentes, sendo uma delas com o *gate* exposto (*gate* não está coberto por camada isolante, possibilitando o contato do grafeno com o ar) e a outra com o *gate* colocado embaixo (*back-gate* – permitindo que o *gate* estivesse em contato com o líquido). Dessa maneira, o experimento com as moléculas de indol pôde detectar indol nas fases de gás e líquida.

As sínteses dos protótipos, estruturaram-se pelo desenvolvimento de substratos de dióxido de silício ( $SiO_2$ ) com espessura de 300 nm. Os eletrodos foram desenvolvidos usando cromo e ouro, com espessuras de 15 nm e 90 nm, respectivamente. Houve a formação de uma monocamada de grafeno através do processo de CVD. Houve tratamento químico, centrifugação, cura e tratamento com luz UV, provocando a interação entre o empilhamento ( $\pi$ - $\pi$ ) das moléculas voláteis sobre o grafeno.

Uma outra aplicação de sensor baseado em grafeno, apresenta-se no trabalho desenvolvido por Veronesi *et al.* (2023). Esta pesquisa apoiou-se na construção de um sensor para a detecção de compostos orgânicos voláteis (VOCs, do inglês, *Volatile Organic*

---

<sup>8</sup> *Gate* é o eletrodo que modula a corrente entre outros dois terminais em um transistor FET – do inglês, *Field-Effect Transistor* (Sedra; Smith, 2015).

*Compounds*). Os autores ressaltam que estes compostos estão relacionados com os sabores e aromas das plantas, estando os processos oxidativos ligados as alterações destas características. São subprodutos da oxidação e degradação de gorduras ao longo da vida útil dos alimentos, causando mudanças na percepção sensorial. Por este fato, afirmam que, o monitoramento da degradação das gorduras nos alimentos pode ser realizado pela detecção de VOCs.

O sensor construído para o experimento empregou uma estrutura tridimensional do grafeno, obtida por meio do crescimento epitaxial em substrato de carboneto de silício cristalino (4H-SiC). O material foi tratado quimicamente, com o objetivo de aumentar a porosidade, provocando o aumento da razão superfície/volume, o que favoreceu a interação do sensor com o meio analisado.

Sobre esta base porosa, foi cultivado grafeno tridimensional, favorecendo a formação de bordas, ligações pendentes e numerosos sítios ativos. Estas características contribuem para a interação química com VOCs, especialmente moléculas hidrogenadas.

Os testes foram realizados com três tipos de amostras de avelãs: avelãs saudáveis, avelãs danificadas e avelãs afetadas por percevejos. O primeiro teste foi realizado iluminando o sensor com um laser verde. Sob iluminação em condições de ultra-alto vácuo (UHV, do inglês, *Ultra High Vacuum*), foi detectado um aumento na corrente devido a fotoelétrons, enquanto a resistência do sensor caiu cerca de 15%.

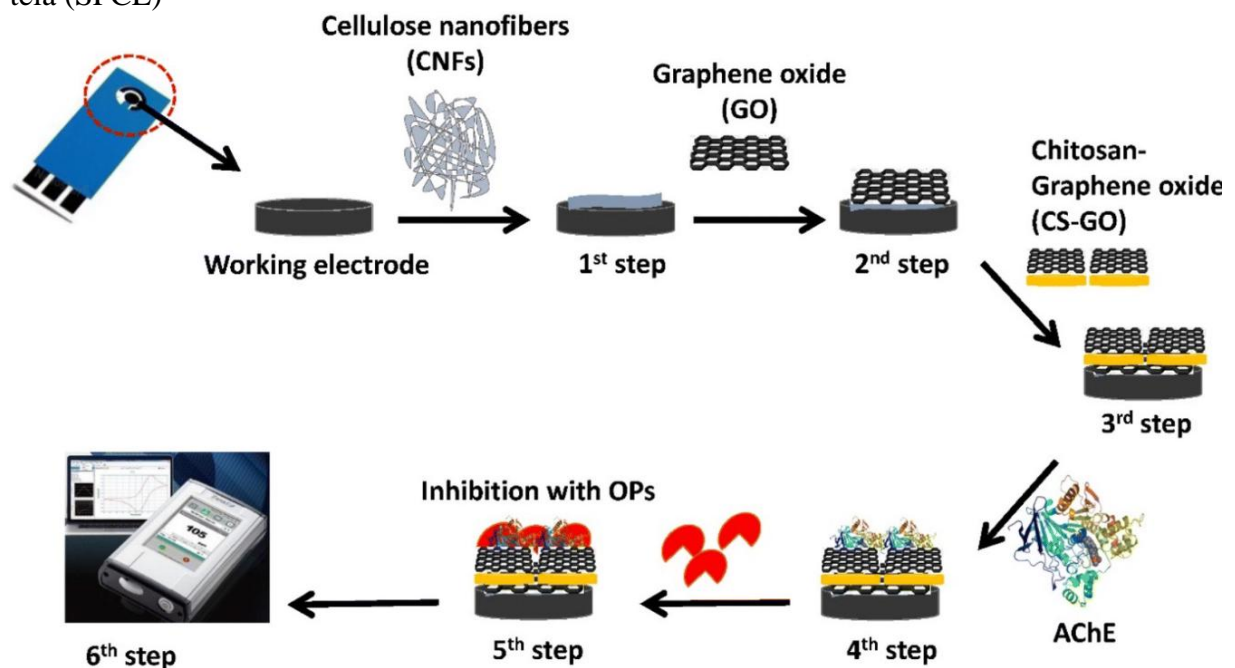
Em um segundo teste, o sensor foi exposto a um fluxo de hidrogênio atômico (pressão de exposição:  $10^{-7}$  mbar) em ambiente UHV. O sensor foi aquecido pelo *cracker*, resultando em uma resposta térmica mesmo sem fornecimento de hidrogênio. No entanto, foi observada uma diferença no comportamento do sinal, ao comparar com a resposta obtida com a presença de hidrogênio.

O dispositivo desenvolvido apresentou potencial para a utilização como biossensor na conservação de alimentos, com aplicação prática para detectar rancidez e degradação. O sensor também apresenta resposta em tempo real, elevada estabilidade ao longo do tempo e versatilidade para aplicação em diferentes fases do armazenamento e do processamento industrial. Quando utilizado com uma estratégia de amostragem apropriada, um único sensor é capaz de monitorar simultaneamente diversos recipientes (VERONESI *et al.*, 2023).

No contexto da presente discussão, destaca-se o trabalho de Tun *et al.* (2023), que desenvolveram um biossensor eletroquímico baseado na enzima acetilcolinesterase (AChE, do inglês, *Acetylcholinesterase*) para a detecção de clorpirifós, um pesticida organofosforado, amplamente utilizado na agricultura. Com a utilização de um processo de modificação de superfície, representado na Figura 7, as camadas de nanofibras de celulose, o óxido de grafeno

e um compósito de quitosana-GO com acetilcolinesterase foram imobilizados em um eletrodo de carbono impresso em tela (SPCE, do inglês, *Screen-Printed Carbon Electrode*). O eletrodo de trabalho SPCE modificado foi caracterizado por microscopia eletrônica de varredura, e constatou-se que o óxido de grafeno aprisionado nas nanofibras de celulose aumenta a sensibilidade do biossensor. A detecção deste pesticida pelo biossensor acontece através da captação pelo biossensor, da inibição catalítica da AchE sobre o cloreto de acetiltiocolina (ATCh). O biossensor modificado demonstrou bom desempenho na detecção de clorpirifós em uma faixa linear de 25 a 1000 nM sob condições otimizadas, com limites de detecção e quantificação de 2,2 nM e 73 nM, respectivamente.

Figura 7- Esquema gráfico do processo de modificação de um eletrodo de carbono impresso em tela (SPCE)



Fonte: Tun *et al.* (2023). Licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0*

### 3.4. APLICAÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO EM SENSORES E BIOSSENSORES PARA DETECÇÃO DE CONTAMINANTES EM ALIMENTOS

Assegurar a qualidade do alimento, implica na utilização de métodos de detecção de contaminantes que garantam o seu monitoramento com rapidez, boa sensibilidade de detecção e seleção destas substâncias, além de custo baixo. De acordo com Ferrier e Honeychurch (2021), os CNTs atendem a estas exigências, pois apresentam alta área de superfície, excelente condutividade elétrica e capacidade de modificação da superfície. Estas características tornam

os dispositivos, sensores e biossensores, altamente sensíveis, o que justifica sua ampla aplicação na detecção de contaminantes em alimentos. No Quadro 7, são apresentados trabalhos relevantes a partir de sensores/biossensores baseados em CNTs no contexto da segurança do alimento.

Quadro 7- Resumo das características de estudos envolvendo sensores e biossensores baseados em CNTs, no período de 2021 a 2025.

	<b>Tipo de CNT</b>	<b>Tipo de abordagem para a síntese</b>	<b>Sensor/ Biossensor</b>	<b>Analito detectado</b>	<b>Referência</b>
<b>CNTs</b>	SWCNTs <sup>1</sup> com enzima acetilcolinesterase (AChE <sup>2</sup> )	<i>Bottom-up</i>	<b>Biossensor</b>	<b>Pesticidas organofosforados</b> Teste em sucos de fruta; boa seletividade	Kumar <i>et al.</i> (2021)
	CNTs com anticorpos imobilizados	<i>Bottom-up</i>	<b>Biossensor</b>	<b>Listeria monocytogenes</b> Detecção rápida de L. monocytogenes	Liu <i>et al.</i> (2021)
	MWCNTs <sup>3</sup> funcionalizados com peptídeos	<i>Top-down</i>	<b>Sensor</b>	<b>Bisfenol A (BPA)</b> Detecção de contaminante químico em embalagens; Possui alta sensibilidade	Zhang <i>et al.</i> (2024)
	CNTs semicondutores funcionalizados com aptâmeros	<i>Bottom-up</i>	<b>Biossensor</b>	<b>Aflatoxina B1 (AFB1)</b> resposta < 60s; portátil; teste cego com 100% de acurácia	Li <i>et al.</i> (2024)
	CNT-FET <sup>4</sup> funcionalizado com aptâmeros	<i>Bottom-up</i>	<b>Biossensor</b>	<b>Salmonella enterica / Staphylococcus aureus</b> Detecção ultrasensível; resposta < 200 s; alta seletividade em alimentos reais	Feng <i>et al.</i> (2024)

<sup>1</sup> SWCNTs: Nanotubos de paredes simples (do inglês, *Single-Walled Carbon Nanotubes*).

<sup>2</sup> AChE: Enzima acetilcolinesterase (do inglês, *Acetylcholinesterase*).

<sup>3</sup> MWCNTs: Nanotubos de paredes múltiplas (do inglês, *Multi-Walled Carbon Nanotubes*).

<sup>4</sup> CNT-FET: Transistores de efeito de campo de nanotubo de carbono (do inglês, *Carbon Nanotube - Field-Effect Transistors*).

Fonte: Autoria própria.

### 3.4.1 Aplicação do CNT em sensores para detecção de contaminantes em alimentos

O trabalho de Zhang *et al.* (2024) foi alicerçado no desenvolvimento de um sensor eletroquímico utilizando MWCNTs funcionalizados com um peptídeo auto-montável anfífilo

catiônico (Z23), formando o compósito Z23/MNCNTs. Durante os experimentos, o sensor foi testado com o objetivo de detectar bisfenol A (BPA, do inglês, *Bisphenol A*). Este composto é utilizado como monômero na produção de plásticos de policarbonato e de resinas epóxi. Por estarem presentes nas embalagens dos alimentos, podem ser liberados e contaminá-los, provocando riscos à saúde dos consumidores (RUBIN, 2011).

A interação  $\pi$ - $\pi$  entre o peptídeo Z23 e as paredes laterais dos MWCNT provocou a dispersão das camadas, deixando exposto o lado hidrofílico, positivamente carregado. Esta exposição favoreceu a adsorção eletrostática do BPA, que apresenta carga negativa em meio neutro.

Os autores comprovaram que as alterações dos MWCNTs através do polímero condutor resultou no aumento da seletividade e intensificação da resposta eletroquímica do sensor em relação ao analito. Constataram que o dispositivo demonstrou elevadas sensibilidade e estabilidade operacional, apresentando faixa linear de 10 nM até 100  $\mu$ M e limite de detecção de 1,28 nM. Dessa maneira, mostrou-se viável para o monitoramento de BPA em materiais de embalagem. Estes resultados destacam a importância dos nanomateriais condutores para a construção de sensores voltamétricos para o controle de contaminantes químicos, trazendo contribuições para práticas no âmbito da segurança do alimento.

#### 3.4.2 Aplicação do CNT em biossensores para detecção de contaminantes em alimentos

O trabalho apresentado por Kumar *et al.* (2021) conta com o desenvolvimento de um biossensor eletroquímico com o emprego de SWCNTs funcionalizados com a enzima acetilcolinesterase (AChE). Este dispositivo foi aplicado na detecção de methyl parathion, que é um pesticida organofosforado. A detecção foi realizada pela inibição da atividade da AChE pelo methyl parathion, e controlada pela quantificação através de medidas voltamétricas. Observou-se que a elevada área superficial e a excelente condutividade elétrica dos SWCNTs aumentaram a resposta analítica do sensor.

Os testes foram realizados com amostras reais de sucos de frutas, como morango e maçã. O biossensor apresentou um limite de detecção na ordem de  $\sim 3,75 \times 10^{-11}$  mol/L, demonstrando a sua elevada sensibilidade, além de boa seletividade e reprodutibilidade, mesmo em matrizes alimentares complexas. Esses resultados ressaltam a viabilidade dos biossensores baseados em CNTs como soluções para o monitoramento de resíduos de pesticidas, contribuindo para o controle da qualidade do alimento.

Wang *et al.* (2021) apresentaram uma revisão bibliográfica, na qual destaca-se a

proposta de Liu *et al.* (2021), referente a um eletrodo bipolar de papel descartável e de baixo custo. Desenvolveram um imunossensor eletroquímico baseado em CNTs, funcionalizados com anticorpos específicos para *Listeria monocytogenes*. Estas bactérias oferecem alto risco nas indústrias alimentícias por apresentarem resistência às condições adversas, em especial a temperatura inferior a 0 °C (CARPENTIER *et al.*, 2011)

Os autores constataram que as propriedades físico-químicas dos CNTs, relacionadas à alta área superficial e à elevada condutividade elétrica, proporcionaram uma plataforma eficiente para a imobilização dos anticorpos, amplificando o sinal gerado durante a detecção eletroquímica.

Os resultados mostraram que o biossensor apresentou alta sensibilidade e seletividade, características ideais para a identificação rápida da bactéria em alimentos lácteos, que apresentam matrizes complexas. Além disso, o dispositivo apresentou baixo limite de detecção (LOD) de 5 UFC/mL (unidades formadoras de colônias – do inglês, *Colony Forming Units*) e desempenho confiável em amostras reais. Essas propriedades ressaltam o potencial dos imunossensores baseados em CNTs como dispositivos adequados ao controle microbiológico de alimentos.

Outro trabalho relevante ao contexto alimentar, refere-se ao experimento de Li *et al.* (2024) relacionado ao desenvolvimento de biossensores do tipo FET baseados em CNTs semicondutores, com alta uniformidade e bom encapsulamento, utilizados para a detecção *on-site* de toxinas alimentares. Especificamente, o estudo focou na detecção da aflatoxina B1 (AFB1, do inglês, *Aflatoxin B1*) em amostras alimentares reais, procurando atender aos requisitos de reprodutibilidade, precisão, sensibilidade, estabilidade e aplicabilidade prática. O dispositivo foi construído com um processo de passivação livre de resíduos, aliado a um método de encapsulamento escalável, com o objetivo de assegurar maior estabilidade e reprodutibilidade, características frequentemente limitantes em sensores nanoestruturados (LI *et al.*, 2024).

Para conferir especificidade molecular na detecção de toxinas alimentares, o sensor foi funcionalizado com aptâmeros nucleicos seletivos à AFB1, uma das micotoxinas de maior relevância regulatória no setor alimentício. A funcionalização aptamérica permitiu sensibilidade e seletividade superiores mesmo em matrizes alimentares complexas.

Com vistas à aplicabilidade prática, os autores desenvolveram também um sistema portátil de leitura, adequado para análises *on-site*, ou seja, fora do ambiente laboratorial. Essa abordagem viabilizou o uso do sensor em condições reais de campo. A validação do biossensor envolveu testes com amostras reais de alimentos, incluindo milho e amendoim, escolhidos pela

sua alta suscetibilidade à contaminação por AFB1.

Os resultados experimentais revelaram que o sensor apresenta tempo de resposta abaixo de 60s, o que o torna aplicável em triagem rápida. Apresentou LOD de 0,55 fg/mL limite de detecção altamente seletiva de AFB1 em amostras de alimentos, com um limite de detecção (LOD) de 0,55 fg/mL (padrão) para AFB1 e coeficientes de reatividade cruzada a interferências tão baixos quanto  $1,8 \times 10^{-7}$  em soluções simuladas. Além destes aspectos, os resultados dos testes realizados evidenciaram que o sensor apresentou boa estabilidade, reprodutibilidade e uma faixa dinâmica alinhada aos padrões exigidos por agências regulatórias internacionais, reforçando seu potencial como uma tecnologia promissora para aplicação no controle de qualidade dos alimentos.

Feng *et al.* (2024) propuseram o desenvolvimento de um biossensor de campo do tipo FET com CNTs (CNT-FET), funcionalizado com aptâmeros de ácidos nucleicos, para a detecção seletiva das bactérias *Salmonella enterica* e *Staphylococcus aureus*. Diversos alimentos estão propensos à contaminação por estes patógenos, o que torna necessário um controle robusto na detecção destas bactérias.

Os testes realizados com matrizes alimentares reais apontam que a utilização de CNT como material semicondutor no canal do transistor conferiu ao sistema excelente alcance de precisão na detecção da célula bacteriana específica. Os resultados experimentais indicaram que o biossensor foi capaz de detectar *S. enterica* com LOD de apenas 1 UFC em tampão PBS (do inglês, *Phosphate-Buffered Saline*) e *S. aureus* com um LOD de 1,2 UFCs. A resposta elétrica na interação molecular com os microrganismos-alvo, ficou abaixo de 200 segundos. Os resultados obtidos indicam que biossensores FET baseados em CNTs constituem uma alternativa promissora para o monitoramento microbiológico em tempo real, contribuindo significativamente para o controle de qualidade alimentar.

### 3.5 PERSPECTIVAS FUTURAS

Cenários futuros no contexto da aplicação de dispositivos sensoriais para a segurança do alimento envolvem a miniaturização e integração desses sensores em sistemas portáteis, destacando-se os dispositivos vestíveis de grafeno em embalagens (*wearables*) ou acoplados a smartphones. Este tipo de tecnologia viabilizará a detecção de contaminantes em tempo real, seja no local de produção, de armazenamento ou de comercialização de alimentos.

Ainda referente a sistemas portáteis, destacou-se que sensores vestíveis de grafeno têm crescido muito, devido à alta sensibilidade, baixo consumo de energia e rápido tempo de

resposta. Esse tipo de sensor é visto como promissor para monitoramento contínuo, inclusive podendo se integrar com dispositivos móveis ou internet das coisas (IoT) para coleta de dados em tempo real.

A integração destes sensores com a IoT é uma tendência que possibilitará a automação de processos a partir da coleta de dados referentes à temperatura, umidade, movimento, luminosidade, pressão, entre outros, envolvendo a geração e o envio de sinais elétricos ou digitais pelos sensores através de protocolos de rede. Estes sinais poderão ser processados localmente ou armazenados em nuvens de dados, viabilizando a emissão de alertas para a execução de ações.

Uma outra tendência, diz respeito aos métodos dirigidos por inteligência artificial (IA) para prever compostos bioativos ou qualidades de alimentos, detecção de compostos voláteis. A combinação de sensores baseados em grafeno e CNTs com IA, aprendizado de máquina e IoT permitirá o monitoramento contínuo e ambientalmente amigável da qualidade de alimentos.

A síntese verde e escalável do grafeno e do CNT, bem como a padronização de suas propriedades físico-químicas, estabilidade em matrizes alimentares complexas e validação para uso regulatório constituem desafios técnicos para viabilizar a comercialização em larga escala desses dispositivos.

Nesse sentido, com o avanço das pesquisas sobre a utilização dos sensores à base de grafeno e CNTs as estratégias regulatórias relacionadas às etapas de produção alimentícia devem envolver estes dispositivos.

#### **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Com base na análise conduzida ao longo deste estudo, verifica-se que os sensores desenvolvidos a partir de grafeno e CNTs mostraram um elevado potencial para aplicações voltadas à segurança e à qualidade de alimentos. Estes dispositivos se apresentam como uma alternativa propícia para a detecção de contaminantes físicos, químicos e biológicos em alimentos. Os avanços tecnológicos referentes à miniaturização de plataformas sensoriais e a elevação dos níveis de sensibilidade e seletividade consolidam esta alternativa.

Apesar de todos os avanços, algumas questões relevantes se colocam como obstáculos que dificultam a passagem dos desenvolvimentos destes dispositivos em laboratórios para aplicações industriais efetivas em escala comercial. Entre as dificuldades encontradas, ressalta-se a existência de pouca realização de testes em ambientes reais, com envolvimento das condições pertencentes a tais ambientes. Outro entrave, diz respeito a carência de padronização das técnicas de funcionalização. Os estudos analisados colocam também a dependência de estruturas laboratoriais complexas para a realização das pesquisas. De maneira geral, alguns desafios persistem, a citar, a padronização dos materiais, a estabilidade em matrizes alimentares complexas e a validação para uso regulatório.

Diante destes apontamentos e discussões realizados pelos autores estudados, torna-se importante que haja o fortalecimento entre as pesquisas das diversas áreas de atuação para que sensores baseados em grafeno e CNTs se estabeleçam instrumentos confiáveis para o monitoramento de alimentos.

## REFERÊNCIAS

AWOJI, M. O., ONOJA, A. D., & ECHI, M. I. . Synthesis of Graphene via ARC Discharge and Its Characterization: A Comparative Approach. **East European Journal of Physics**, (1), 252-257. Disponível em: <https://periodicals.karazin.ua/eejp/article/view/21343>. Acesso em: 9 out. 2025.

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R.; DEWOLF, J. T. **Statics and Mechanics of Materials**. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 2010. 736 p. ISBN 978-0073380155.

BILIAK, R. **Métodos de obtenção de grafeno**. Comput. Probl. Electr. Eng., v. 13, p. 1–8, 2023.

BOHBOT, J. D.; VERNICK, S. The Emergence of Insect Odorant Receptor-Based Biosensors. *Biosensors*, v. 10, n. 3, art. 26, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/bios10030026>, Acesso em 04 nov. 2025.

CARPENTIER, B.; CERF, O. Review — Persistence of *Listeria monocytogenes* in food industry equipment and premises. **International Journal of Food Microbiology**, Amsterdam, v. 145, p. 1-8, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2011.01.005>. Acesso em: 4 nov. 2025.

CAPUANO, E.; JANSSEN, A. E. M. Food Matrix and Macronutrient Digestion. *Annual Review of Food Science and Technology*, v. 12, p. 193-212, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-food-032519-051646>. Acesso em: 7 nov. 2025.

DINIZ, G. C.; BRITO, N. M.; CAVALCANTE, K. S. B.; DANTAS, L. M. F.. Sensores eletroquímicos à base de grafeno para quantificação de rutina: uma revisão literária. *In: Pesquisas da Pós-graduação: Química em Foco – Amazônia Legal, Biodiversidade e Desenvolvimento Sustentável*. Capítulo 9, São Luís-MA, IFMA, 2024. Disponível em: <https://atenaeditora.com.br/catalogo/download-post/88019> . Acesso em: 03 nov. 2025.

DREYER, D. R.; PARK, S.; BIELAWSKI, C. W.; RUOFF, R. S. The chemistry of graphene oxide. **Chemical Society Reviews**, v. 39, n. 1, p. 228–240, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/B917103G>. Acesso em: 18 set. 2025.

FAO. **Segurança alimentar**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/food-safety/en/>. Acesso em: 14 set. 2025.

FENG, X.; LI, P.; LI, T.; CAO, X.; LIU, D.; XIAO, M.; WANG, L. Ultra-sensitive and rapid detection of *Salmonella enterica* and *Staphylococcus aureus* to single-cell level by aptamer-functionalized carbon nanotube field-effect transistor biosensors. **Biosensors & Bioelectronics**, v. 216, art. 116333, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2024.116333>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38669846/>. Acesso em: 9 out. 2025.

FERRIER, D. C.; HONEYCHURCH, K. C. Carbon Nanotube (CNT)-Based Biosensors. **Biosensors**, v. 11, n. 12, p. 486, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/bios11120486>. Acesso em: 24 set. 2025.

GAO, J.; CHAKRABORTHY, A.; HE, S.; YANG, S.; AFSARIMANESH, N.; NAG, A.; DENG, S. Graphene-Based Sensors for the Detection of Microorganisms in Food: A Review.

**Biosensors**, v. 13, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/bios13060579>. Acesso em: 28 set. 2025.

GIL, A. C.. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GRAPHENEA. **Graphenea: dedicated graphene foundry**. [S.l.], 2021. Disponível em: <https://www.graphenea.com> . Acesso em: 08 out. 2025.

HABEEB, F. D.; KHASHAN, K. S.; HADI, A. A.; SADIA, H.. A review of carbon nanotubes and alloys synthesized by the laser ablation technique. **International Journal of Nanoelectronics and Materials (IJNeM)**, v. 18, no. June, p. 153-164, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.58915/ijneam.v18iJune.2339>. Acesso em 02 nov. 2025.

HOUTSMA, R. S. K.; de la RIE, J.; STÖHR, M. Atomically precise graphene nanoribbons: interplay of structural and electronic properties. **Chemical Society Reviews**, v. 50, p. 6541-6568, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D0CS01541E>. Acesso em 02 nov. 2025.

HUSSAIN, S.; AKBAR, U.; AHMAD, M.; IBRAR, M.; ALI, Z.; WAQAS, M.; AHMAD, S.A.; ABBAS, S.M.; ULLAH, H.; ANWAR, S. Synthesis, Properties, and Applications of Carbon Nanotubes: An Overview. **Scientific Inquiry & Review**, v. 7, n. 3, p. 95-124, 2023. Disponível em: <https://journals.umt.edu.pk/index.php/SIR/article/view/3440>. Acesso em: 3 nov. 2025.

HUTAPEA, J. A. A.; MANIK, Y. G. O.; NDURURU, S. T. C. L.; HUANG, J.; GOEI, R.; TOK, A. I. Y.; SIBURIAN, R. Comprehensive review of graphene synthesis techniques: advancements, challenges, and future directions. **Preprints**, 2025. Artigo 2025071219. Disponível em: <https://doi.org/10.20944/preprints202507.1219.v1>. Acesso em: 1 out. 2025.

IJIMA, Sumio. Helical microtubules of graphitic carbon. **Nature**, London, v. 354, p. 56–58, 1991. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/354056a0>. Acesso em: 16 out. 2025.

KATO GROUP. **Chirality of single-walled carbon nanotubes**. RIKEN — Kato Group, [s.d.]. Disponível em: <https://katogroup.riken.jp/en/nanotubechirality.html>. Acesso em: 25 nov. 2025.

KHATUN, N. *et al.* Bottom-up porous graphene synthesis and its applications. **Chemistry – A European Journal**, Weinheim, v. 30, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/chem.202403386>. Acesso em: 1 out. 2025.

KOUTSIOUKIS, A.; FLORAKIS, G.; SAKELLIS, E.; GEORGAKILAS, V Stable dispersion of graphene in water, promoted by high-yield, scalable exfoliation of graphite in natural aqueous extracts: the role of hydrophobic organic molecules. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 10, n. 38, p. 12552-12558, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c02326>. Acesso em: 4 nov. 2025.

KUMAR, T. H. V.; RAJENDRAN, J.; NAGARAJAN, R. D.; JEEVANANDAM, G.; RESHETILOV, A. N.; SUNDRAMOORTHY, A. K. Electrochemical biosensor for methyl parathion based on single-walled carbon nanotube/glutaraldehyde crosslinked acetylcholinesterase-wrapped bovine serum albumin nanocomposites. **ACS Omega**, [S.l.], v. 6, n. 8, p. 5146–5157, 2021.. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04607>. Acesso em: 8 out. 2025.

LI, J.; LIN, J.; LUO, T.; LIU, J.; LIU, J.; ZHONG, W. Detecção sensível de ácido gálico em alimentos por sensor eletroquímico fabricado pela integração de filme de nanocanais com nanocompósito de carbono. **Frontiers in Nutrition**, v. 11, p. 1491345, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1491345> . Acesso em: 4 nov. 2025.

LI, T.; LI, W.; WANG, L.; YU, B.; XIAO, M.; ZHANG, Z. Reproducible, accurate, and sensitive food toxin on-site detection with carbon nanotube transistor biosensors. **ACS Nano**, v. 18, n. 39, p. 26891–26901, 2024. DOI: 10.1021/acsnano.4c08323. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsnano.4c08323>. Acesso em: 08 out. 2025.

LIN, Z.; WU, G.; ZHAO, L.; LAI, K. W. C. Detecção de indol volátil metabólico bacteriano usando um biossensor de transistor de efeito de campo baseado em grafeno. **Nanomaterials**, v. 11, art. 1155, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-4991/11/5/1155>. Acesso em: 08 out. 2025.

LIU, H.; ZHOU, X.; LIU, W.; YANG, X.; XING, D. Paper-based bipolar electrode electrochemiluminescence switch for label-free and sensitive genetic detection of pathogenic bacteria. *Analytical Chemistry*, v. 88, p. 10191-10197, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.6b02772>. Acesso em: 03 nov. 2025.

LIU, W.; AZIZ, A. Review on the effects of electrochemical exfoliation parameters on the yield of graphene oxide. **ACS Omega**, v. 7, n. 38, p. 33719–33731, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c04099>. Acesso em: 25 set. 2025.

MACÊDO, I. da S. V.; CUNHA, K. G.; ALVES, A. T. V.; MARTINS, R. M.; SIMÕES, M. O. da S. Atividade antioxidante da rutina: uma revisão. **Revista Biofarm**, v. 13, n. 1, jan./mar. 2017. Disponível em: <https://revista.uepb.edu.br/BIOFARM/article/download/2070/1671/6777/>. Acesso em: 4 nov. 2025.

MALVINO, A. P. **Eletrônica**. 8. ed. v. 1. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 2016.

MANAWI, Y. M.; IHSANULLAH; SAMARA, A.; AL-ANSARI, T.; ATIEH, M. A. A Review of Carbon Nanomaterials' Synthesis via the Chemical Vapor Deposition (CVD) Method. **Materials**, v. 11, n. 5, art. 822, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma11050822>. Acesso em: 4 nov. 2025.

MARCANO, D. C.; KOSYNKIN, D. V.; BERLIN, J. M.; SINITSKII, A.; SUN, Z.; SLESAREV, A.; ALEMANY, L. B.; LU, W.; TOUR, J. M.. Improved Synthesis of Graphene Oxide. **ACS Nano**, v. 4, n. 8, p. 4806–4814, 2010.. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/nn1006368>. Acesso em: 25 set. 2025.

MOHAMED, A. M.; FOUAD, F. H.; FAYEK, G. R.; EL SAYED, K. M.; AHMED, M. N.; MAHMOUD, R. Z.; EL NASHAR, R. M. Recent advances in electrochemical sensors based on nanomaterials for detection of red dyes in food products: A review. **Food Chemistry**, v. 435, 2024. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37806207/>. Acesso em: 14 set. 2025.

MOUSTAFA, H.; MORSY, M.; ATEIA, M. A.; ABDEL-HALEEM, F. M. Ultrafast response humidity sensors based on polyvinyl chloride/graphene oxide nanocomposites for intelligent food packaging. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 331, art. 112918, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021m.112918>. Acesso em: 09 out. 2025.

NG, K. L.; MACIEJEWSKA, B. M.; QIN, L.; JOHNSTON, C.; BARRIO, J.; TITIRICI, M. M.; TZANAKIS, I.; ESKIN, D. G.; PORFYRAKIS, K.; MI, J.; GROBERT, N.. Direct evidence of the exfoliation efficiency and graphene dispersibility of green solvents toward sustainable graphene production. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 11, n. 1, p. 58–66, 2023. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acssuschemeng.2c03594>. Acesso em: 9 out. 2025.

NOVOSELOV, K. S.; GEIM, A. K.; MOROZOV, S. V.; JIANG, D.; ZHANG, Y.; DUBONOS, S. V.; GRIGORIEVA, I. V.; FIRSOV, A. A. Electric field effect in atomically thin carbon films. **Science**, v. 306, n. 5696, p. 666–669, 2004. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1102896>. Acesso em: 9 out. 2025.

OLATOMIWA, A. L.; ADAM, T.; GOPINATH, S. C. B.; KOLAWOLE, S. Y.; OLAYINKA, O. H.; HASHIM, U. Graphene synthesis, fabrication, characterization based on bottom-up and top-down approaches: An overview. *Journal of Semiconductors*, v. 43, n. 6, p. 061101, 2022. Disponível em: <https://www.jos.ac.cn/article/shaid/561e3e4032e04e70f6f739d67222706a053c518093c1ea44bf838c146d109d3e?>. Acesso em 31 out. 2025.

PANDIT, S.; LI, M.; CHEN, Y.; RAHIMI, S.; MOKKAPATI, V.; MERLO, A.; YURGENS, A.; MIJAKOVIC, I. Graphene Based Sensor for Detection of Bacterial Pathogens. **Sensors**, v. 21, n. 23, art. 8085, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s21238085>. Acesso em: 7 out. 2025.

PEI, J.; REN, T.; HUANG, Y.; CHEN, R.; JIN, W.; SHANG, S.; WANG, J.; LIU, Z.; LIANG, Y.; ABD EL-ATY, A. M. Application of Graphene and its Derivatives in Detecting Hazardous Substances in Food: A Comprehensive Review. **Frontiers in Chemistry**, v. 10, art. 894759, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.894759> . Acesso em: 04 nov. 2025.

PREKODRAVAC, J. R.; KEPÍĆ, D. P.; COLMENARES, J. C.; GIANNAKOUDAKIS, D. A.; JOVANOVIĆ, S. P.. A comprehensive review on selected graphene synthesis methods: from electrochemical exfoliation through rapid thermal annealing towards biomass pyrolysis. **Journal of Materials Chemistry C**, v. 9, p. 6722–6748, 2021. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/tc/d1tc01316e>. Acesso em 10 out. 2025.

RUBIN, B. S. Bisphenol A: an endocrine disruptor with widespread exposure and multiple effects. **Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology**, Oxford, v. 127, n. 1-2, p. 27-34, 2011. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21605673/>. Acesso em 10 out. 2025.

RUSSELL, J. B. **Química geral**. 9. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2001.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microelectronic Circuits**. 7. ed. Oxford: Oxford University Press, 2015.

ŞENOCAK, A.; KHATAEE, A.; DEMIRBAS, E.; DOUSTKHAH, E. Ultrasensitive detection of rutin antioxidant through a magnetic micro-mesoporous graphitized carbon wrapped Co nanoarchitecture. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 321, art. 128544, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.127939>. Acesso em: 3 nov. 2025.

SHAMS, S. S.; ZHANG, R. *Graphene synthesis: A Review*. **Materials Science**, Poland, v. 33, n. 3, p. 566-578, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1515/msp-2015-0079>. Acesso em:

6 out. 2025.

SHEN, D.; CHEN, D.; YANG, Z.; LIU, H.; CHEN, T.; SUN, L.; FUKUDA, T. Electron Beam Irradiation Induced Multiwalled Carbon Nanotubes Fusion inside SEM. NIH, 2017. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5672700/> . Acesso em: 4 nov. 2025.

SINGH, K. K.; CHAUDHARY, S. K.; VENUGOPAL, R.; GAURAV, A. Bulk synthesis of multi-walled carbon nanotubes by AC arc discharge method. **Sage Journals**, v. 5, p. 2397791417712836, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/2397791417712836>. Acesso em 10 out. 2025.

SINHA, A.; ROY, K.; MONDAL, D.; DEY, R. S.; SHARMA, S. Graphene and carbon nanotube-based electrochemical sensors for food safety application: Recent progress and perspectives. *Food Chemistry*, v. 433, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814625005357> . Acesso em: 14 set. 2025.

SU, W.; LI, X.; LI, L.; YANG, D.; WANG, F.; WEI, X.; ZHOU, W.; KATAURA, H.; XIE, S.; LIU, H. Chirality-dependent electrical transport properties of carbon nanotubes obtained by experimental measurement. **Nature Communications**, v. 14, art. 1672, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37443-7>. Acesso em: 3 nov. 2025.

SUN, Q.; ZHANG, L.; WANG, X.; ZHAO, L.; JIANG, W. A review on recent advances in mass spectrometry methods for analysis of hazardous contaminants in food. **Frontiers in Nutrition**, v. 10, 2023. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/nutrition/articles/10.3389/fnut.2023.1244459/full>. Acesso em: 14 set. 2025.

TUN, W. S.; SAENCHOOPA, A.; DADUANG, S.; DADUANG, J.; KULCHAT, S.; PATRAMANON, R. Electrochemical biosensor based on cellulose nanofibers/graphene oxide and acetylcholinesterase for the detection of chlorpyrifos pesticide in water and fruit juice. **RSC Advances**, v. 13, p. 9603-9614, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D3RA00512G>. Acesso em: 4 nov. 2025.

UNICAMP; USP. New graphene-based wearable plant sensor can be fabricated on paper. StatNano, 2025. Disponível em: <https://statnano.com/news/74724/New-Graphene-based-Wearable-Plant-Sensor-Can-Be-Fabricated-on-Paper>. Acesso em: 9 out. 2025.

VERONESI, S.; VLAMIDIS, Y.; FERBEL, L.; MARINELLI, C.; SANMARTIN, C.; TAGLIERI, I.; PFUSTERSCHMIED, G.; LEITGEB, M.; SCHMID, U.; MENCARELLI, F.; HEUN, S. Three-dimensional graphene on a nano-porous 4H-silicon carbide backbone: a novel material for food sensing applications. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [S. l.], v. 1-11, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jsfa.13118>. Acesso em: 4 nov. 2025.

WANG, X.; SUN, G.; ROUTH, P.; KIM, D.-H.; HUANG, W.; CHEN, P. Heteroatom-doped graphene materials: syntheses, properties and applications. **Chemical Society Reviews**, v. 43, p. 7067-7098, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/C4CS00141A> . Acesso em: 8 nov. 2025.

WANG, Y.; MA, X.; QIAO, X.; YANG, P.; SHENG, Q.; ZHOU, M.; YUE, T. Perspectives for Recognition and Rapid Detection of Foodborne Pathogenic Bacteria Based on

Electrochemical Sensors. *eFood*, v. 2, p. 125-139, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.2991/efood.k.210621.001>. Acesso em: 4 nov. 2025.

WU, G. F.; YAN, F. P.; YAN, X.; WANG, W.; LI, T.; LI, Z. H.; LIANG, L. J.; ZHANG, R.; CHU, F. T.; YAO, H. Y.; WANG, M.; WANG, Z. Q.; WANG, L.; HU, X. F. Ultra-sensitive, graphene metasurface sensor integrated with the nonradiative anapole mode for detecting and differentiating two preservatives. *Nanophotonics*, v. 13, n. 20, p. 3793-3803, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/nanoph-2024-0126>. Acesso em: 1 nov. 2025.

XU, W.; XIE, L.; ZHU, J.; TANG, L.; SINGH, R.; WANG, C.; MA, Y.; CHEN, H.-T.; YING, Y. Terahertz biosensing with a graphene-metamaterial heterostructure platform. *Carbon*. **Elsevier**, v. 141, p. 247-252, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.09.050> . Acesso em: 6 nov. 2025.

XU, W.; HUANG, Y.; ZHOU, R.; WANG, Q.; YIN, J.; KONO, J.; PING, J.; XIE, L.; YING, Y. Metamaterial-free flexible graphene-enabled terahertz sensors for pesticide detection at bio-interface. *ACS Applied Materials & Interfaces*, v. 12, n. 36, p. 40345-40353, 2020. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32894675/> Acesso em: 6 nov. 2025.

YANG, Y.; WANG, Z.; ZHENG, S. Secondary Exfoliation of Electrolytic Graphene Oxide by Ultrasound Assisted Microwave Technique. *Nanomaterials*, v. 12, n. 1, art. 68, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/nano12010068>. Acesso em: 7 nov. 2025.

ZHANG, T.; YANG, L.; YAN, F.; WANG, K. Vertically-ordered mesoporous silica film based electrochemical aptasensor for highly sensitive detection of alpha-fetoprotein in human serum. *Biosensors*, v. 13, n. 6, p. 628, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/bios13060628>

ZHANG, Y.; SHAO, T.; ZHANG, H. Electrochemical sensors based on self-assembling peptide/carbon nanotube nanocomposites for sensitive detection of Bisphenol A. *Sensors*, v. 24, n. 5, art. 1465, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s24051465> . Acesso em: 4 nov. 2025.

ZHANG, Z.; YANG, D.; DONG, G.; LI, R.; ZHANG, Y.; MORO, R.; MA, Y.; MA, L.. Role of temperature and Ar flow on the uniformity of epitaxial graphene grown on SiC. *Bulletin of Materials Science*, v. 46, art. 60, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12034-023-02903-9> . Acesso em: 2 nov. 2025.