

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Física

**GRAFENO INDUZIDO A LASER: SUA HISTÓRIA, CARACTERÍSTICAS,  
APLICAÇÕES E PAPEL NA ELETRÔNICA SUSTENTÁVEL.**

Arthur Silva do Nascimento

Prof. Dr. Carlos César Bof Bufon

Rio Claro (SP)  
2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Câmpus de Rio Claro

ARTHUR SILVA DO NASCIMENTO

**GRAFENO INDUZIDO A LASER: SUA HISTÓRIA,  
CARACTERÍSTICAS, APLICAÇÕES E PAPEL NA ELETRÔNICA  
SUSTENTÁVEL.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel e Licenciado em Física.

Orientador(a): Dr. Carlos César Bof Bufon

Rio Claro - SP

2025

N244g

Nascimento, Arthur

Grafeno induzido a laser: sua história, características, aplicações e papel na eletrônica sustentável / Arthur Nascimento. -- Rio Claro, 2025

41 p. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado e licenciatura - Física) -  
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências  
Exatas, Rio Claro

Orientador: Carlos Bufon

1. Grafeno induzido a laser (LIG). 2. Síntese de grafeno. 3. Estrutura 3D  
porosa. 4. Aplicações em energia. 5. Sustentabilidade. I. Título.

ARTHUR SILVA DO NASCIMENTO

Grafeno induzido a laser: sua história, características, aplicações e papel na eletrônica sustentável.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel e Licenciado em Física.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Carlos César Bof Bufon (orientador)

Prof. Dr. Lucas Fugikawa Santos

Prof. Dr. Giovani Fornereto Gozzi

Aprovado em 18 de novembro de 2025

Assinatura do discente

Assinatura do orientador

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Renato e Eliane, que me criaram com muito amor, carinho e confiança, além da motivação e apoio imenso durante todo o meu processo de formação não só em física, mas também como pessoa. Amo vocês.

Agradeço aos meus amigos Rafael, Guilherme, Zaian, Ramon, Maysa, Fernanda, Julia e Victória por tornarem esta caminhada mais leve com sua amizade e companheirismo. Sou muito grato a cada um de vocês.

Aos meus colegas de laboratório, Lucas e Julia, que me ajudaram direta e indiretamente, não só na confecção deste trabalho, mas também nas atividades de pesquisa no laboratório.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos César Bof Bufon, pela paciência e pelos vários ensinamentos que me passou durante a realização deste trabalho.

Sou grato a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho pudesse ser concluído.

## RESUMO

O grafeno é um material que apresenta elevada transmitância, notável mobilidade eletrônica, elevada condutividade térmica e ampla área de superfície específica, características que fazem com que esse material tenha uma alta demanda em diversas aplicações em tecnologia. Apesar de suas vantagens, inicialmente a síntese desse material era bastante desafiadora, já que possuía um alto custo de fabricação e uma baixa escalabilidade de produção. Nesse contexto, diversos métodos alternativos foram desenvolvidos para a síntese do grafeno, visando explorar as diversas vantagens desse material com menores custos de produção e maior potencial para larga escala de produção. Um desses métodos, que se mostrou promissor nos últimos anos, é a síntese de grafeno pela indução a laser em substratos. Através desse método, é possível sintetizar grafeno de qualidade de forma eficiente, sem produção de resíduos, com substratos de baixo custo e uma alta capacidade de customização para se adaptar a diversas aplicações, como armazenamento de energia, dispositivos flexíveis e sensores. Neste trabalho, o grafeno induzido a laser (LIG) foi explorado de forma abrangente, abordando sua definição, origem histórica, métodos de síntese, substratos utilizados, reações envolvidas e parâmetros que influenciam suas propriedades. Em seguida, foram analisadas suas características estruturais, com ênfase na arquitetura 3D porosa, no grau de grafitização e nas propriedades associadas. Por fim, foram apresentadas aplicações do LIG em diversas áreas, como energia, sensores, eletrocatalise, dispositivos flexíveis e tratamento ambiental, ilustrando estudos que desenvolveram dispositivos baseados neste material. O trabalho também discute a sustentabilidade do LIG, alinhando suas propriedades, fabricação e aplicações a alguns dos objetivos globais de desenvolvimento sustentável estipulados pela Organização das Nações Unidas (ONU), e apresenta perspectivas futuras para o avanço dessa tecnologia.

**Palavras-chave:** Grafeno induzido a laser (LIG); Síntese de grafeno; Estrutura 3D porosa; Aplicações em energia; Sensores; Eletrocatalise; Dispositivos flexíveis; Sustentabilidade.

## ABSTRACT

Graphene is a material that exhibits high transmittance, remarkable electron mobility, excellent thermal conductivity, and a large specific surface area, characteristics that make it highly demanded in various technological applications. Despite these advantages, its synthesis was initially challenging due to high production costs and limited scalability. In this context, several alternative methods have been developed to enable large-scale, cost-effective graphene production. Among them, laser-induced graphene (LIG) synthesis has emerged as a promising approach, allowing the efficient, residue-free fabrication of high-quality graphene on low-cost substrates with high customizability for different applications, such as energy storage, flexible devices, and sensors. This work provides a comprehensive exploration of LIG, addressing its definition, historical origin, synthesis methods, substrates, chemical reactions involved, and parameters influencing its properties. The study further analyzes its structural features, emphasizing the porous 3D architecture, degree of graphitization, and related characteristics. Finally, applications of LIG in various Fields, including energy, sensors, electrocatalysis, flexible devices, and environmental treatment, are presented, supported by studies demonstrating the development of devices based on this material. The work also discusses the sustainability of LIG, aligning its fabrication and applications with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), and outlines future perspectives for advancing this technology.

**Keywords:** Laser-induced graphene (LIG); Graphene synthesis; 3D porous structure; Energy applications; Sensors; Electrocatalysis; Flexible devices; Sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Representação da estrutura hexagonal 2D do grafeno. Retirado de del Rayo et al. (2013) [12].....                                                                                                                   | 11 |
| Figura 2: Esquema da síntese de LIG por inscrição a laser em poliimida. Retirado de Hristovski et al. (2022) [33].....                                                                                                       | 18 |
| Figura 3: Visão geral esquemática dos principais precursores bioderivados e sua origem/processamento. Retirado de Bressi et al. (2023) [26].....                                                                             | 19 |
| Figura 4: Esquema ilustrativo que mostra a influência das condições do laser na síntese de LIG. Retirado de Velasco et al. (2023) [45].....                                                                                  | 21 |
| Figura 5: Espectros Raman coletados para LIG produzido em 3 potências distintas, evidenciando os picos D, G e 2d. Dados obtidos no departamento de física da Unesp de Rio Claro.....                                         | 23 |
| Figura 6: Esquema de formação de grafeno de poucas camadas induzida por laser a partir de carvão. Retirado de Ma et al. (2025) [52].....                                                                                     | 25 |
| Figura 7: Copo de papel com sensores LIG para monitorar a qualidade do conteúdo, demonstrando propriedades chave do LIG, como fácil customização, condutividade e sustentabilidade. Retirado de Jung et al. (2022) [57]..... | 27 |
| Figura 8: Esquema de sensores à base de LIG para monitoramento de performance atlética. São representados sensores de pressão no pulso e de estresse no joelho. Retirado de Raza et al. (2022) [63].....                     | 29 |

## SUMÁRIO

|                                                              |           |
|--------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b>                                         | <b>10</b> |
| <b>2. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO</b>                            | <b>11</b> |
| 2.1 MATERIAIS GRAFÊNICOS                                     | 11        |
| 2.2 MÉTODOS TRADICIONAIS DE SÍNTESE DE GRAFENO               | 13        |
| 2.3 PROCESSO DE INDUÇÃO A LASER VS. MÉTODOS TRADICIONAIS     | 14        |
| 2.4 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO MAIS COMUNS PARA O LIG         | 16        |
| 2.4.1 RESISTÊNCIA DE FOLHA                                   | 16        |
| 2.4.2 ESPECTROSCOPIA RAMAN                                   | 16        |
| <b>3. LASER-INDUCED GRAPHENE (LIG): DEFINIÇÃO e FORMAÇÃO</b> | <b>17</b> |
| 3.1 HISTÓRICO E DESCOBERTA                                   | 17        |
| 3.2 CONCEITO DE L.I.G.                                       | 17        |
| 3.3 SUBSTRATOS UTILIZADOS                                    | 18        |
| 3.4 MECANISMOS DE FORMAÇÃO                                   | 19        |
| 3.4.1 REAÇÃO FOTOTÉRMICA                                     | 19        |
| 3.4.2 REAÇÃO FOTOQUÍMICA                                     | 20        |
| 3.5 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM A FORMAÇÃO DO LIG             | 21        |
| <b>4. ESTRUTURA E PROPRIEDADES</b>                           | <b>21</b> |
| 4.1 ESTRUTURA 3D POROSA                                      | 21        |
| 4.2 GRAU DE GRAFITIZAÇÃO (RAMAN)                             | 22        |
| 4.3 PROPRIEDADES DO MATERIAL                                 | 23        |
| <b>5. APLICAÇÕES</b>                                         | <b>24</b> |
| 5.1 ENERGIA                                                  | 24        |
| 5.2 SENSORES                                                 | 25        |
| 5.3 ELETROCATÁLISE                                           | 27        |
| 5.4 DISPOSITIVOS FLEXÍVEIS (WEARABLES)                       | 28        |
| 5.5 TRATAMENTO AMBIENTAL                                     | 29        |
| <b>6. SUSTENTABILIDADE E PERSPECTIVAS FUTURAS</b>            | <b>30</b> |
| <b>7. CONCLUSÃO</b>                                          | <b>32</b> |
| <b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>                         | <b>33</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

Grafeno induzido a laser, conhecido como LIG, é um material originalmente produzido em folhas de PI (poliimida) via ablação a laser. Desde sua descoberta inicial, a lista de precursores de LIG expandiu para além de folhas PI, como compostos de metal/plástico, polímeros comerciais etc [1]. Esse material possui aplicações e vantagens diversas, como o fato de ser favorável ao ambiente, ter uma baixa produção de resíduos, produção eficiente, facilidade para produzir diversos padrões, ecologicamente sustentável, entre outras.

O processo começa com um material precursor, geralmente um polímero, aplicado sobre uma superfície apropriada. Em seguida, utiliza-se um laser para irradiar esse material, rompendo suas ligações químicas e promovendo a reorganização dos átomos de carbono em uma estrutura grafênica. Esse método permite um controle sobre onde e como o grafeno é formado, o que é especialmente útil na criação de padrões específicos em dispositivos eletrônicos e sensores para diversos fins, diretamente sobre o substrato utilizado como precursor. No entanto, ainda há desafios, como a inconsistência na qualidade do grafeno obtido, especialmente quando se tenta ampliar a produção para atender demandas industriais [2].

Apesar do potencial do LIG para aplicações em eletrônicos flexíveis, seu uso ainda é limitado principalmente pela dependência de substratos poliméricos que não são sustentáveis, como a PI mencionada anteriormente. No entanto, a produção de LIG a partir da celulose surge como uma solução promissora para criar uma eletrônica mais sustentável, uma vez que esse polissacarídeo presente em alto teor em vegetais diminui a dependência de recursos não renováveis e aproveitando resíduos vegetais, como aqueles produzidos na agricultura [2].

O uso da celulose como camada adicional aplicada a diferentes substratos antes da exposição ao laser permite gerar grafeno em uma variedade de superfícies. Isso viabiliza a integração de novos componentes e amplia as possibilidades de aplicação, que vão desde eletrônicos flexíveis até sensores incorporados em diversos materiais.

Outro aspecto importante é a possibilidade de adicionar grupos funcionais ao LIG, com o intuito de modificar suas características físicas e químicas, oferecendo a oportunidade para produzir grafeno com características específicas, especialmente para aplicações em armazenamento de energia. Por exemplo, é possível ajustar a condutividade elétrica e térmica do material pirolisado, melhorar sua reatividade química e aumentar sua solubilidade e processabilidade ao dopar a amostra com elementos como nitrogênio ou fósforo, ou então

adicionar grupos funcionais como carboxílicos e aminas, e até mesmo incorporar nanopartículas metálicas [3].

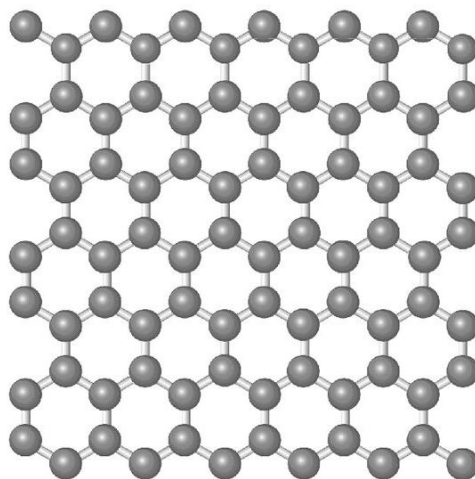
O LIG possui potencial para diversas aplicações em áreas diferentes, como preservação ambiental, desenvolvimento tecnológico e saúde. Dentro da preservação ambiental, é possível citar: filtragem de metais pesados na água e ar, dessalinização solar interfacial, biossensores para monitoramento de contaminantes, entre outros [4][5][6][7]. Considerando o potencial em desenvolvimento tecnológico, destacam-se: baterias, supercapacitores, eletrocatalisadores, sistemas miniaturizados de energia (microsupercapacitores), etc [8]. Na área da saúde, as principais aplicações do LIG são dispositivos eletrônicos vestíveis para monitoramento de sinais fisiológicos e detecção de patógenos, sendo útil em testes rápidos de doenças infecciosas [9].

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica sobre o grafeno induzido a laser (LIG), abordando sua definição, origem histórica e métodos de síntese, incluindo os diferentes substratos utilizados, as reações envolvidas e os parâmetros que influenciam suas propriedades. Em seguida, serão discutidas as características estruturais do material gerado através da pirolise a laser, com ênfase na sua arquitetura 3D porosa, no grau de grafitização e suas propriedades. Em seguida, serão exploradas suas aplicações em diversas áreas, como energia, sensores, eletrocatalisadores, dispositivos flexíveis e tratamento ambiental. Por fim, o trabalho abordará a sustentabilidade do LIG e suas perspectivas futuras, destacando o potencial desse material para inovações tecnológicas e científicas.

## **2. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO**

### **2.1 MATERIAIS GRAFÊNICOS**

O grafeno é um material bidimensional no qual seis átomos de carbono estão ligados covalentemente para formar uma estrutura hexagonal. Esse material apresenta elevada transmitância, ou seja, deixa passar a maior parte da luz que incide sobre ele (~98%, quase transparente), notável mobilidade eletrônica ( $\sim 200,000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ), elevada condutividade térmica ( $\sim 5,000 \text{ W mK}^{-1}$ ) e ampla área de superfície específica ( $\sim 2,630 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ) [10]. Isso faz com que seja um ótimo material de suporte, providenciando abundância de sítios ativos onde reações podem ocorrer devido a sua alta área superficial e impedir que materiais ancorados se aglomerem e percam essas áreas ativas [11].



**Figura 1** – Representação da estrutura hexagonal 2D do grafeno. Retirado de del Rayo et al. (2013) [12].

Os principais materiais derivados do grafeno são: grafano, fluorografeno, óxido de grafeno (GO) [13].

Grafano, ou grafeno hydrogenado, é um hidrocarboneto totalmente saturado, derivado de uma única lâmina de grafeno, com fórmula química  $\text{CH}$ . Nesse material, todos os átomos de carbono apresentam hibridização  $\text{sp}^3$ , organizados em uma rede hexagonal, enquanto os átomos de hidrogênio estão covalentemente ligados aos carbonos em ambos os lados do plano de maneira alternada. Esse material semiconductor/isolante apresenta potencial para aplicações em armazenamento de hidrogênio e em dispositivos eletrônicos bidimensionais [14].

Fluorografeno trata-se de um análogo bidimensional (2D) do politetrafluoretileno (Teflon), constituído por uma cadeia carbônica unidimensional (1D) ligada com vários átomos de Fluor [15]. Possui várias propriedades únicas quando comparado com os outros substratos graças às suas ligações C-F. Por exemplo, grafeno fluorado é conhecido como o isolante mais fino possível devido a sua baixa condutividade quando comparado ao grafeno. Apresenta também uma alta estabilidade térmica abaixo dos  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  e uma alta hidrofobicidade, o que faz com que este material tenha elevado potencial em possíveis aplicações como conversão de energia em dispositivos de armazenamento, eletroquímica e supercapacitores [13].

Por fim, óxido de grafeno (GO) é um derivado oxidado do grafeno, que consiste em uma rede bidimensional em formato de colmeia com átomos de carbono funcionalizados com grupos contendo oxigênio, que conferem hidrofilicidade e capacidade de ajuste químico para

esse material. É importante para aplicações em armazenamento de energia (supercapacitores), remediação ambiental (filtração, catálise, remoção de poluentes) e na biomedicina (capacidade de carregamento de fármacos) [16].

## 2.2 MÉTODOS TRADICIONAIS DE SÍNTESE DE GRAFENO

Os métodos tradicionais de síntese de grafeno são comumente separados em dois processos: *Top-down e bottom-up*. Esses processos são determinados pelo número de camadas, espessura, natureza e tamanho médio das estruturas de grafeno [17]. O método *top-down* consiste em usar procedimentos físicos e químicos com o objetivo de separar camadas de grafeno do material carbônico, como o grafite. Apesar desse método conseguir produzir grandes quantidades de grafeno, é difícil manter as características físicas e químicas padronizadas. Entre os métodos *top-down* se destacam: exfoliação mecânica, exfoliação química e oxidação-redução. O método *bottom-up* consiste na formação da estrutura do grafeno a partir de pequenas unidades moleculares, como átomos de carbono, geralmente por meio de processos químicos ou deposição. Ao contrário do método *top-down*, este método produz grafeno com propriedades mais reprodutíveis, porém com menores quantidades e maior custo de síntese. Dos processos *bottom-up* se destacam: deposição química de vapor (CVD), crescimento epitaxial de grafeno sobre carbeto de silício e método de descarga de arco [18].

Na exfoliação mecânica, considerado um processo ideal, o grafeno é destacado do grafite, camada por camada. Nesse processo, a resistência a ser superada é a ligação de atração de Van der Waals que mantém as camadas adjacentes de grafeno empilhadas formando o grafite [19].

A exfoliação química envolve a utilização de solventes que são capazes de enfraquecer as ligações do grafite, resultando em uma exfoliação do material em flocos de grafeno. Durante esse processo, se a energia superficial do solvente for próxima à energia superficial do grafeno (Van der Waals), então a entalpia da mistura será menor e o grau de esfoliação será maior [20].

Finalmente, no processo de oxidação-redução o grafite é oxidado formando óxido de grafeno (GO). Neste processo, são utilizados oxidantes como ácido nítrico, ácido sulfúrico, clorato de potássio e permanganato de potássio [21]. Após a formação do GO, uma reação de redução leva a formação do óxido de grafeno reduzido (rGO) [22]. A diferença entre GO e rGO é que na estrutura do GO, as ligações carbônicas perdem a estrutura  $sp^2$  característica do grafeno, estrutura essa que retorna ao reduzir-se GO para rGO. Essa redução é feita com agentes

redutores como hidrazina e borohidreto de sódio [23]. O método de oxidação-redução é vantajoso por conseguir produzir grafeno em uma grande escala, porém a presença de grupos oxigenados que sobram do processo de redução fazem com que esse grafeno tenha uma baixa pureza, e consequentemente, baixa qualidade. [24].

A CVD é um método onde o grafeno é produzido a partir de uma reação química à vácuo entre um precursor gasoso e um substrato aquecido [25]. Essa reação quebra as ligações carbônicas do gás precursor e deposita as moléculas de carbono no substrato aquecido, que pode ser cobre, por suas propriedades condutoras que auxiliam na obtenção de grafeno com boa mobilidade eletrônica, ou níquel, que atua como um catalisador eficiente para o crescimento de grafeno e permite um controle mais preciso sobre a espessura das camadas de grafeno formadas [25][26].

O crescimento epitaxial de grafeno sobre carbeto de silício é um método de síntese que consiste em decompor termicamente a superfície de um cristal de carbeto de silício, atingindo temperaturas acima de 1200 °C [27], o que faz os átomos de silício desprenderem do cristal, abandonando os átomos de carbono, que formam a estrutura de grafeno [28]. O carbeto de silício é utilizado pois, segundo os autores, permite a grafitização controlada que resulta em filmes de grafeno uniformes com alta mobilidade eletrônica, além de possuir propriedades elétricas favoráveis para aplicações em dispositivos semicondutores, devido à sua alta rigidez dielétrica e capacidade de suportar altas tensões [28].

Por fim, o método de descarga de arco consiste em conectar dois eletrodos feitos de grafite, que são colocados em um ambiente fechado com a presença de gases, como argônio (Ar), hidrogênio (H<sub>2</sub>) ou gás de formação (H<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>), e então aplicar uma corrente elétrica entre esses dois eletrodos e gerar uma descarga elétrica entre eles. Durante a descarga elétrica, dentro do ambiente fechado, forma-se carbono em plasma, a partir dos átomos de carbono que se desprenderam do grafite, e logo depois, esse carbono condensa formando camadas de grafeno nos eletrodos [29].

### 2.3 PROCESSO DE INDUÇÃO A LASER VS. MÉTODOS TRADICIONAIS

O processo de indução a laser na fabricação de grafeno, conhecido como LIG, possui diversas vantagens quando comparado aos métodos tradicionais de síntese de grafeno. O grafeno induzido a laser pode ser rapidamente e facilmente sintetizado por lasers UV ou de CO<sub>2</sub>, sem a necessidade criar ambientes controlados ou substratos de alto custo, com a

possibilidade de fabricação de padrões diversos para diferentes aplicações, podendo ser moldado em microestruturas e nanoestruturas condutoras tridimensionais complexas, o que aumenta bastante seu custo-benefício. Além disso, LIG possui diversas propriedades favoráveis para aplicações em eletrônica, como alta condutividade elétrica, resistência à corrosão, flexibilidade mecânica e biocompatibilidade [30]. O fato de o LIG poder ser produzido a partir de substratos baratos e abundantes na natureza, como madeira, resíduos agrícolas etc., torna esse material uma ótima alternativa para criar uma eletrônica mais sustentável, já que é um material barato de sintetizar, é produzido em substratos renováveis e foge do uso de produtos químicos tóxicos e condições extremas [31][32].

A tabela 1 a seguir compara os valores de condutividade entre os materiais grafênicos citados nesse trabalho até aqui, que são: grafeno, grafano, fluorografeno, oxido de grafeno, oxido de grafeno reduzido e LIG.

| Material                        | Condutividade ( $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ )                        |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Grafeno                         | $(1,46 \pm 0,82) \cdot 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$              |
| Grafano                         | $\ll 1 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$                                   |
| Fluorografeno                   | de $10^{-5}$ a $10^{-7} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$                  |
| Oxido de grafeno (GO)           | ampla faixa de $10^{-6}$ a $10^1 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$         |
| Oxido de grafeno reduzido (rGO) | entre $10^2$ e $10^5 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$                     |
| LIG                             | $\approx 5 \times 10^2 - 2,5 \times 10^3 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ |

**Tabela 1** – Valores de condutividade para os diferentes materiais grafênicos [33][15][34][35][36].

Pode-se perceber que os materiais com menor condutividade são aqueles com grupos adicionais ao longo de sua estrutura como hidrogênio, flúor e oxigênio.

## 2.4 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO MAIS COMUNS PARA O LIG

### 2.4.1 RESISTÊNCIA DE FOLHA

Em diversos trabalhos, usa-se a resistência de folha para caracterizar filmes macroscópicos a base de grafeno, como dispositivos feitos a partir do LIG, em relação a sua condutividade, o que se mostra vantajoso, uma vez que a resistência de folha é a resistência elétrica da amostra distribuída de forma média sobre a sua espessura. Além do LIG, a resistência de folha é normalmente utilizada para caracterizar camadas implantadas com íons, camadas difundidas, filmes metálicos, entre outros [37]. Sua unidade de medida é comumente representada por  $\frac{\Omega}{sq}$  (Ohms por quadrado), o que significa que, ao pegar uma amostra feita de um material específico e considerarmos sua área superficial, uma outra amostra do mesmo material com área superficial proporcional terá a mesma resistência de folha. Essa característica é interessante para o LIG e suas aplicações, já que se torna possível caracterizar a resistividade de elétrica desse material mesmo após adaptar seu tamanho/forma para diferentes aplicações.

### 2.4.2 ESPECTROSCOPIA RAMAN

A espectroscopia Raman tornou-se uma técnica fundamental para a caracterização de materiais bidimensionais, como o grafeno e os dicalcogenetos de metais de transição, além de ser amplamente empregada na análise de modos fônicos em cristais. Por meio dessa técnica, é possível obter informações sobre o número de camadas atômicas, modos de vibração entre camadas (de respiração e cisalhamento), anisotropia no plano, dopagem, desordem estrutural, condutividade térmica, tensão mecânica e diferentes modos vibracionais do material [38].

Essa técnica se baseia na detecção de luz que é espalhada de forma inelástica quando incidida em uma molécula de um substrato. Esse espalhamento é proveniente da interação entre uma radiação monocromática com a matéria. A técnica de espectroscopia Raman está relacionada a transições vibracionais e rotacionais de uma molécula [39].

Os espectros Raman das estruturas de LIG apresentam três picos característicos: a banda D, associada à presença de desordem estrutural ou a defeitos em ligações de carbono  $sp^2$ ; a banda G, relacionada à região grafítica; e a banda 2D, que fornece informações sobre a área superficial, o número de camadas de grafeno e a qualidade estrutural do material formado. As razões entre esses picos presentes nos espectros Raman também revelam informações importantes; a razão D/G indica a presença de defeitos em relação à estrutura cristalina do

grafeno, enquanto a razão  $2d/G$  fornece informações sobre o número de camadas de grafeno presentes [1].

### 3. LASER-INDUCED GRAPHENE (LIG): DEFINIÇÃO e FORMAÇÃO

#### 3.1 HISTÓRICO E DESCOBERTA

Desde a descoberta do grafeno e suas propriedades, a busca por diferentes maneiras de sintetizar esse material cresce constantemente. Uma dessas maneiras que rapidamente se tornou popular foi a síntese via laser, que é um método rápido e barato para a produção de grafeno.

Quando esse método é aplicado em materiais não grafiticos, como polímeros e materiais naturais, o material resultante é chamado de “Laser Induced Grafene”. Em 2014, verificou-se que polímeros, como a poliimida (PI), podiam ser diretamente convertidos em grafeno poroso com uma estrutura 3D, diferente da estrutura 2D plana do grafeno convencional, por meio de um laser de  $CO_2$  no infravermelho ( $10,6\ \mu m$ ), equipamento amplamente utilizado na indústria [40]. Essa foi a primeira vez que foi reportada a obtenção de LIG [28]. Já em 2017, foi mostrado que o LIG poderia ser obtido usando materiais naturais, como madeira, pela primeira vez, em Ye et al. [41], para isso, foi utilizado um laser de  $CO_2$  em distintos tipos de madeira, sob uma atmosfera redutora controlada com elevada concentração de  $H_2$  ( $>50\%$ ), onde a formação de grafeno foi confirmada por XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy) e espectroscopia Raman [42].

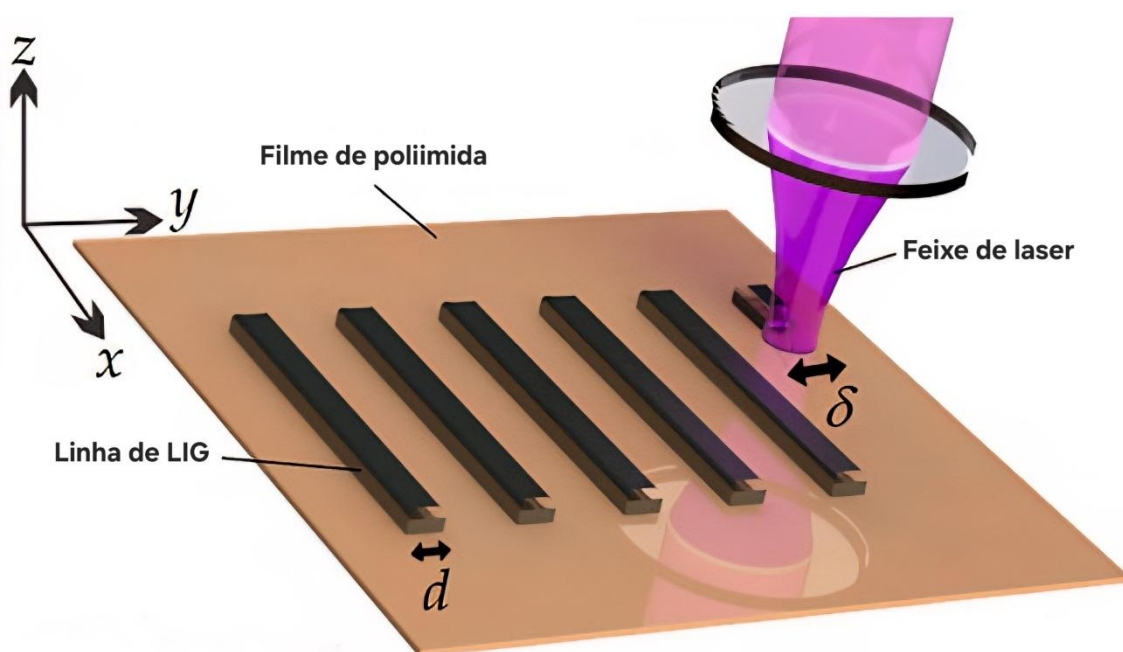
#### 3.2 CONCEITO DE L.I.G.

O LIG caracteriza-se por sua elevada porosidade, excelente condução eletrônica, efeitos fototérmicos intrínsecos e propriedades de superfície passíveis de modulação [43].

A morfologia superficial do LIG apresenta um padrão poroso complexo e heterogêneo, decorrente tanto da rápida liberação de gases durante a irradiação quanto da conversão de ligações de carbono de hibridização  $sp^3$  para  $sp^2$ , característica típica da estrutura planar do grafeno. Essa heterogeneidade estrutural também está associada a defeitos no arranjo ordenado dos átomos de carbono, uma vez que anéis de cinco ou sete membros podem ser formados, ocasionando uma leve curvatura na rede hexagonal convencional [44].

Diferente dos métodos térmicos convencionais, os lasers são capazes de provocar reações tanto fotoquímicas quanto fototérmicas, permitindo um nível de precisão no processamento de materiais que antes era difícil de alcançar [45].

A imagem 1 a seguir apresenta um esquema do processo de queima de um substrato formando tiras de LIG ao longo de sua superfície.



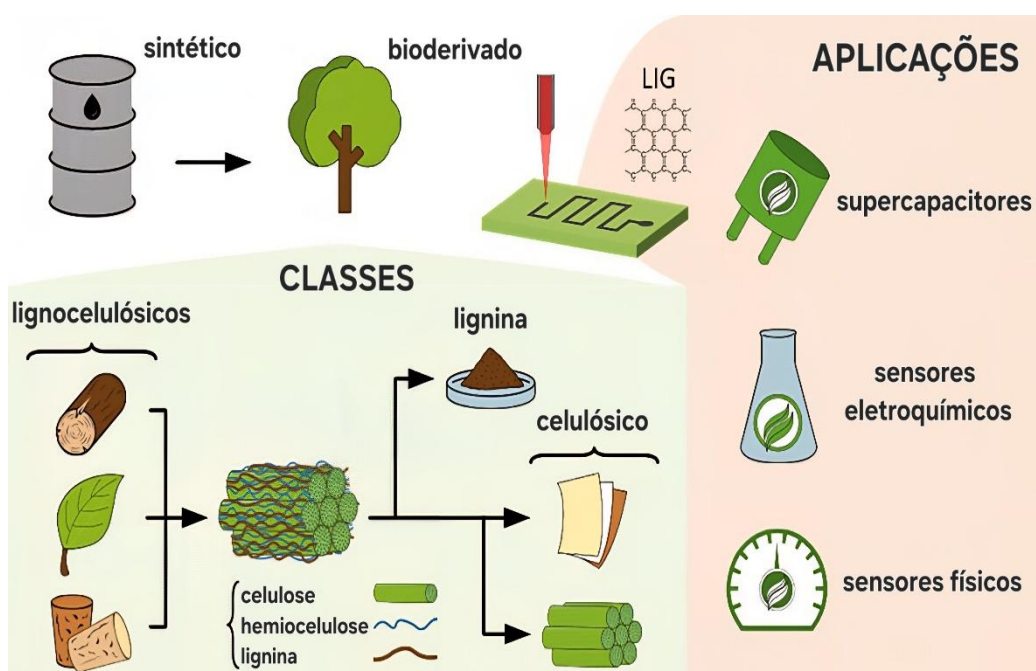
**Figura 2:** Esquema da síntese de LIG por inscrição a laser em poliimida. Retirado de Hristovski et al. (2022) [46].

### 3.3 SUBSTRATOS UTILIZADOS

A utilização de substratos naturais da formação de LIG favorece o aumento da sustentabilidade desse material. Os principais tipos de precursores naturais utilizados na síntese de LIG são os materiais lignocelulósicos, compostos por três polímeros base: celulose, hemicelulose e lignina. Estudos sobre o uso desses precursores na síntese de LIG apontam diversas vantagens, devido ao seu baixo custo, biodegradabilidade e aspectos recicláveis, além de serem encontrados em abundância, já que compõem uma porção significativa da biomassa da Terra. Porém, sua fabricação vem com a necessidade de otimizar os parâmetros do laser, dificultando reproduzir a qualidade do material de forma consistente [47]. Alguns exemplos desses materiais são a madeira, folhas, rolhas, algas e resíduos agrícolas.

Existem também substratos comerciais, que apesar de não serem sustentáveis como os substratos anteriores, também são usados como precursores para a formação de LIG, como a polieterimida (PEI) e a poliimida (PI) [36]. A poliimida (PI) apresenta uma combinação excepcional de estabilidade térmica ( $>500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), resistência mecânica e resistência química. Possui também excelentes propriedades dielétricas e, intrinsecamente, baixo coeficiente de expansão térmica [48]. A polieterimida (PEI) é um termoplástico, conhecido por apresentar resistência a altas temperaturas e propriedades mecânicas e elétricas excepcionais [49].

A figura 2 a seguir mostra os diferentes substratos naturais nos quais é possível sintetizar o LIG e suas possíveis aplicações.



**Figura 3:** Visão geral esquemática dos principais precursores bioderivados e sua origem/processamento. Retirado de Bressi et al. (2023) [3].

### 3.4 MECANISMOS DE FORMAÇÃO

#### 3.4.1 REAÇÃO FOTOTÉRMICA

A reação fototérmica pode ser usada de duas maneiras na síntese de grafeno via laser: redução de óxido de grafeno via laser e irradiação em substratos orgânicos.

A irradiação em substratos orgânicos inicialmente consistia em formar o grafeno por irradiação a laser sobre uma fonte sólida de carbono depositada na superfície de níquel (Ni), um catalisador metálico, em condições ambientes. Na abordagem utilizada por Ye et al. 2014 [50], a radiação de um laser de alta densidade de potência aquece a superfície de Ni juntamente com o carbono depositado, alcançando uma temperatura de 1200 °C. Logo após alcançar essa temperatura, o laser é desligado e a superfície do material se resfria, causando uma solidificação rápida que possibilita o crescimento de grafeno a uma taxa muito superior à dos métodos convencionais. Porém em estudos mais recentes, esse método pode ser feito em materiais como papel, com o auxílio de um antichama como o Bórax, para que seja possível alcançar altas temperaturas sem destruir o substrato e sem o uso de catalisadores metálicos [51]. A reação fototérmica pode ocorrer em lasers com comprimento de onda dentro da faixa do infravermelho (laser infravermelho CO<sub>2</sub>) e com lasers com comprimento de onda na faixa do ultravioleta (laser UV de 355 nm). Isso foi demonstrado em 2020, por Wang et al., quando os autores investigaram as diferenças nos LIGs formados sob os dois tipos de lasers em um substrato de PI resfriado com água, e através de caracterização por espectroscopia Raman, perceberam que em ambos os casos ocorreu formação de LIG no substrato com características não muito diferentes [52].

Já para a redução de óxido de grafeno via laser, aumenta-se a temperatura do substrato drasticamente de forma local, quebrando as ligações N–O, C–O e C=O, formando ligações C–C, ou seja, essa técnica converte átomos de carbono sp<sup>3</sup> em sp<sup>2</sup>, de forma similar ao processo de redução citado em itens anteriores, porém de forma fototérmica [1].

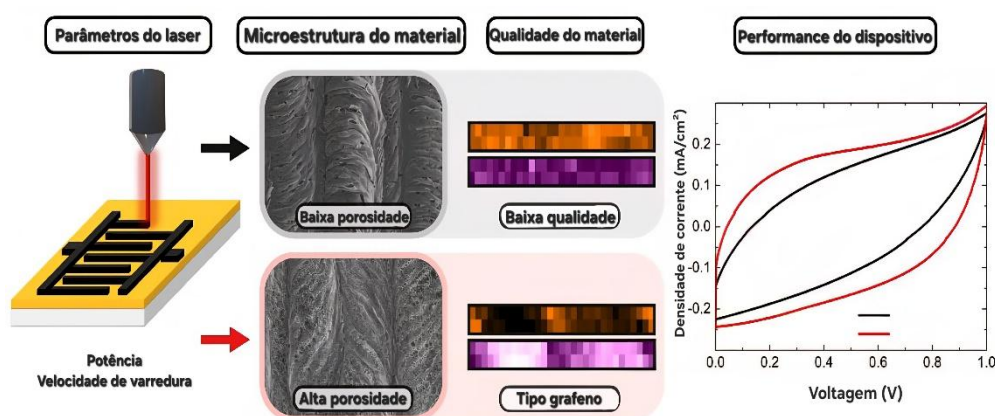
### 3.4.2 REAÇÃO FOTOQUÍMICA

Na reação fotoquímica, a energia dos fótons absorvidos pode romper diretamente as ligações químicas da estrutura carbônica, especialmente quando essa energia é maior que a energia de dissociação do material. Nesse processo, é possível ter criação de cadeias grafênicas sem o aquecimento do material [53]. Por exemplo, lasers com comprimentos de onda próximos ao ultravioleta conseguem eliminar oxigênios presentes na estrutura de grafenos oxigenados, afetando consideravelmente a formação de LIG [54]. Em lasers com comprimentos de onda dentro do intervalo de 200 nm à 400 nm, a energia dos fótons é a mais alta, e ao incidir em um substrato, quebra as ligações causando uma reorganização dos átomos formando a estrutura do LIG [55].

### 3.5 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM A FORMAÇÃO DO LIG

A formação do LIG é sensível a diversos parâmetros de processamento a laser, que influenciam diretamente a estrutura e as propriedades do material. A potência do laser, a velocidade de varredura, o número de passagens e o foco do feixe são determinantes na conversão de polímeros em grafeno poroso, afetando características como porosidade, condutividade elétrica e estabilidade mecânica [56]. Além disso, a composição do substrato, como celulose ou lignina, desempenha um papel crucial, pois diferentes materiais apresentam respostas distintas à irradiação, resultando em variações na morfologia e nas propriedades do LIG) [47]. Estudos adicionais publicados recentemente, indicam que ajustes precisos nos parâmetros do laser podem otimizar a formação de camadas de grafeno induzido, melhorando a performance em aplicações específicas, como sensores e dispositivos eletrônicos flexíveis [57].

A figura 3 a seguir apresenta um esquema que evidencia a influência dos parâmetros do laser na estrutura, qualidade e performance do LIG resultante.



**Figura 4:** Esquema ilustrativo que mostra a influência das condições do laser na síntese de LIG. Retirado de Velasco et al. (2023) [58].

## 4. ESTRUTURA E PROPRIEDADES

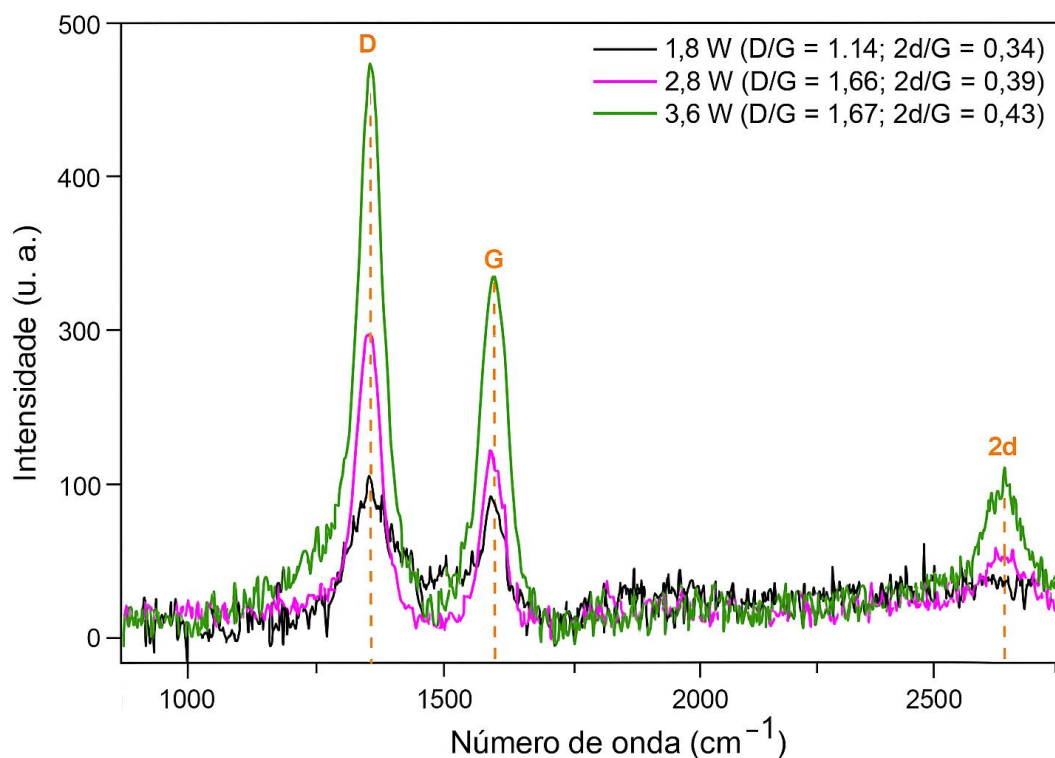
### 4.1 ESTRUTURA 3D POROSA

A estrutura do grafeno induzido por laser (LIG) é caracterizada por uma morfologia tridimensional porosa, resultante da conversão de ligações de carbono  $sp^3$  em  $sp^2$  sob irradiação localizada e da rápida liberação de gases durante o processo, que age como agente de expansão e gera cavidades interconectadas na superfície [57]. Essa dinâmica leva à formação de uma

espuma de grafeno composta por poros de diferentes dimensões, como micro (menor que 2 nm) meso (entre 2 nm e 50 nm) e macro (maior que 50 nm). Esses poros estão interligados em uma rede condutiva contínua, o que garante elevada área superficial em relação ao grafeno plano ou carbono amorfo convencional, fazendo com que haja uma área maior para interações químicas ou físicas, e transporte eletrônico eficiente. Isso faz com que os elétrons possam se mover rapidamente e com baixa resistência elétrica ao longo da rede de grafeno [31]. Além disso, a presença de defeitos estruturais, como anéis carbônicos de cinco e sete átomos, induz curvaturas e rugosidade na rede hexagonal convencional, uma vez que o grafeno ideal é composto por anéis carbônicos de 6 átomos, contribuindo para a complexidade da topologia 3D [59]. Essas características conferem ao LIG propriedades como condutividade elétrica ( $\sim 25 \text{ S cm}^{-1}$ ), permeabilidade e estabilidade mecânica, tornando-o particularmente promissor para aplicações em supercapacitores, sensores eletroquímicos e dispositivos de armazenamento de energia [37].

#### 4.2 GRAU DE GRAFITIZAÇÃO (RAMAN)

O grau de grafitização do LIG está relacionado ao quanto a estrutura obtida durante a síntese se aproxima do grafeno ideal. Como discutido na Seção 3.2, o grafeno possui uma estrutura planar composta predominantemente por ligações  $\text{sp}^2$  entre átomos de carbono. Esse grau de ordenamento pode ser avaliado por espectroscopia Raman, por meio da razão entre as intensidades das bandas D e G (D/G). Conforme apresentado na Seção 2.5, essa razão está diretamente associada ao nível de desordem estrutural: valores mais altos de D/G indicam maior concentração de defeitos e de ligações  $\text{sp}^3$ , reduzindo a proporção de regiões gráficas bem-organizadas. Assim, quanto menor o valor de D/G, maior é o grau de grafitização do material, refletindo uma estrutura mais próxima à do grafeno ideal [60].



**Figura 5:** Espectros Raman coletados para LIG produzido em 3 potências distintas, evidenciando os picos D, G e 2d. Dados obtidos no departamento de física da Unesp de Rio Claro.

#### 4.3 PROPRIEDADES DO MATERIAL

Além das já citadas durante este trabalho, o LIG possui várias propriedades que o tornam um material viável para diversas aplicações em eletrônica.

A estrutura porosa 3D do LIG confere a esse material uma grande área superficial por unidade de volume, permitindo uma maior interação entre os íons e as moléculas. Essa propriedade é essencial para armazenamento de energia (como em supercapacitores e baterias) e em sensores químicos e biossensores [60].

Apesar de sua estrutura porosa, o LIG tem a capacidade de manter a flexibilidade mecânica do polímero no qual foi sintetizado, podendo ser dobrado e moldado sem romper a estrutura. Essa característica o torna uma ótima opção para aplicações em dispositivos eletrônicos flexíveis, como sensores vestíveis, roupas inteligentes ou telas dobráveis [56].

O LIG também é termicamente estável, resistente em uma ampla faixa de temperaturas, o que o torna resistente à degradação mesmo quando colocado em situações térmicas elevadas. Essa característica faz deste material uma alternativa confiável para aplicações em dispositivos

que operam em ambientes quentes ou que sofrem picos de corrente que geram aquecimento [51].

Por fim, o LIG também apresenta uma outra propriedade muito vantajosa para os ajustes de suas características elétricas, que é a possibilidade de a sua superfície poder ser quimicamente modificada ou dopada com outros elementos (como nitrogênio, fósforo ou metais), ampliando seu o leque de aplicações, permitindo criar sensores seletivos, eletrodos catalíticos para reações eletroquímicas e filtros avançados [62].

## 5. APLICAÇÕES

### 5.1 ENERGIA

O LIG apresenta grande potencial para aplicação em supercapacitores, principalmente por ser um material de baixo custo e fácil obtenção. O processo de síntese a laser constitui um método sustentável, escalável e eficiente, capaz de produzir grafeno de alta qualidade em um tempo reduzido. Além disso, o LIG possui alta área superficial, boa condutividade elétrica e estrutura porosa, propriedades essenciais para o desempenho eletroquímico destes dispositivos.

Uma das aplicações do LIG em armazenamento de energia são os supercapacitores (SC), que são sistemas de armazenamento de energia eletroquímica que operam com a adsorção reversível de íons nas superfícies de contato entre eletrodos e eletrólitos. Esses dispositivos são úteis em sistemas eletrônicos quando há uma necessidade de altas taxas de carga e descarga, vida útil prolongada e altas densidades de potência e energia [3].

A porosidade elevada do LIG amplia a área de contato disponível para o armazenamento de carga, o que resulta em maior capacitância e melhor desempenho do supercapacitor [63].

No artigo Ma et al. [64], foi produzido com sucesso LIG a partir de carvão betuminoso de baixa volatilidade em condições de vácuo, que foi denominado por eles de C-LIG, utilizando equipamento a laser infravermelho com dióxido de carbono. Esse material foi então utilizado como ânodo para baterias de íon-lítio, apresentando uma elevada capacidade específica de  $330 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$  a  $0,1 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$ , que conseguiu superar o desempenho de baterias comerciais à base de grafite. Também segundo o artigo, as características típicas da estrutura do LIG como sua alta porosidade favorecem a rápida transferência de íons de lítio, melhorando o desempenho de armazenamento, o que faz com que esse material tenha um grande potencial em aplicações de energia [64].



**Figura 6:** Esquema de formação de grafeno de poucas camadas induzida por laser a partir de carvão. Retirado de Ma et al. (2025) [64].

## 5.2 SENSORES

Sensores baseados em grafeno destacam-se devido às suas propriedades únicas, como alta área superficial específica ( $\sim 2,630 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ) [10], excelente condutividade elétrica ( $\sim 25 \text{ S cm}^{-1}$ ) [10], biocompatibilidade, estabilidade química, facilidade de produção em larga escala e relação custo-benefício, o que os posiciona como materiais altamente promissores para aplicações em monitoramento da saúde [65]. Por exemplo, em um sensor amperométrico com grafeno, foi obtido um limite de detecção de  $0,032 \pm 0,005 \text{ } \mu\text{M}$  para glicose, evidenciando sua alta sensibilidade e baixo consumo de energia, com estabilidade mesmo quando submetido a flexão, uma característica atrativa para sensores vestíveis [66]. Em biossensores para detecção de ácido nucleico (DNA/ssDNA), uma sensibilidade extremamente alta foi alcançada. Em algumas configurações de sensores eletroquímicos a base de grafeno funcionalizado, foram relatados limites de detecção na faixa de  $5 \text{ aM}$  (attomolar), ou seja,  $5 \cdot 10^{-18} \text{ M}$ , demonstrando a capacidade de detectar quantidades muito pequenas de biomoléculas [67]. A partir desses resultados, o grafeno se sobressai como material ideal para sensores de saúde que exigem alta sensibilidade, baixo custo e compatibilidade biológica. Sensores baseados em LIG têm sido

empregados para monitorar diversos sinais fisiológicos do corpo humano, como frequência cardíaca, respiração e até biomarcadores presentes no suor. Suas aplicações em biossensores, monitoramento ambiental e segurança alimentar evidenciam seu grande potencial para fomentar inovações na área da saúde [65].

Em Barja et al. [68], foi desenvolvido um sensor de deformação vestível, flexível, leve, sensível e confiável, LIG encapsulados em polidimetilsiloxano (PDMS), capaz de medir ângulos de flexão com precisão. Essa precisão na medição de ângulos de flexão foi validada experimentalmente, evidenciando seu potencial para aplicações em monitoramento de movimentos corporais como ângulo de flexão do joelho, bem como na avaliação da integridade estrutural de materiais e dispositivos.

Sensores ambientais baseados em LIG têm se mostrado eficazes, como demonstrado por Francis et al. [69]. Sensores de gás fabricados com laser de 450 nm foram capazes de detectar compostos orgânicos voláteis (COVs) emitidos pelo *sagebrush* (*Artemisia tridentata*, arbusto típico de regiões áridas da América do Norte [70]). Estes sensores permitem monitorar a resposta química das plantas a diferentes condições ambientais, contribuindo para a compreensão da adaptação de espécies vegetais em regiões socioecológicas em transformação. Além disso, os experimentos revelaram tempos de resposta rápidos e aumento da resistência elétrica, atribuídos à adsorção dos COVs pelo material sensível de LIG. A elevada porosidade do LIG, aliada à morfologia estruturada, que favorece o contato dos gases nos sítios ativos, proporciona numerosos sítios ativos para interações gás-sólido, potencializando a eficiência na detecção de poluentes ambientais [69].



**Figura 7:** Copo de papel com sensores LIG para monitorar a qualidade do conteúdo, demonstrando propriedades chave do LIG, como fácil customização, condutividade e sustentabilidade. Retirado de Jung et al. (2022) [71].

### 5.3 ELETROCATÁLISE

A eletrocatalise, definida como o processo catalítico que ocorre na interface entre o eletrodo e o eletrólito, promovendo a transferência de carga e o transporte de massa, desempenha um papel fundamental no aprimoramento da eficiência dos sistemas de conversão de energia, além de assegurar o desempenho e durabilidade adequados dessas tecnologias. Nesse contexto, os processos sustentáveis e de elevada eficiência voltados ao armazenamento e à conversão de energia, baseados em reações envolvendo água e nitrogênio, têm despertado crescente interesse na comunidade científica, por se configurarem como alternativas promissoras para mitigar os impactos energéticos e ambientais decorrentes do uso intensivo de combustíveis fósseis [72].

Em ZHANG et al. [73], o processo de indução do LIG foi explorado para a fabricação de eletrodos catalíticos eficientes destinados à quebra das moléculas de água em hidrogênio ( $H_2$ ) e oxigênio ( $O_2$ ), a partir de uma única folha de material plástico. Durante o estudo, a elevada porosidade e a excelente condutividade elétrica do LIG favoreceram o contato eficiente e a transferência de carga com o eletrólito. Além disso, foi mostrado que os eletrodos à base de LIG apresentaram elevado desempenho nas reações de evolução de hidrogênio (HER) e de oxigênio (OER), além de notável estabilidade a longo prazo. A fabricação simples e conveniente dos eletrodos catalíticos de LIG demonstrada pelos autores não apenas fornece

uma solução prática para a produção de  $H_2$  e  $O_2$ , capaz de alimentar células a combustível, como também se apresenta como uma perspectiva promissora para o desenvolvimento de dispositivos eficientes voltados a outros processos eletrocatalíticos, como a redução de  $CO_2$  e a redução de  $O_2$ .

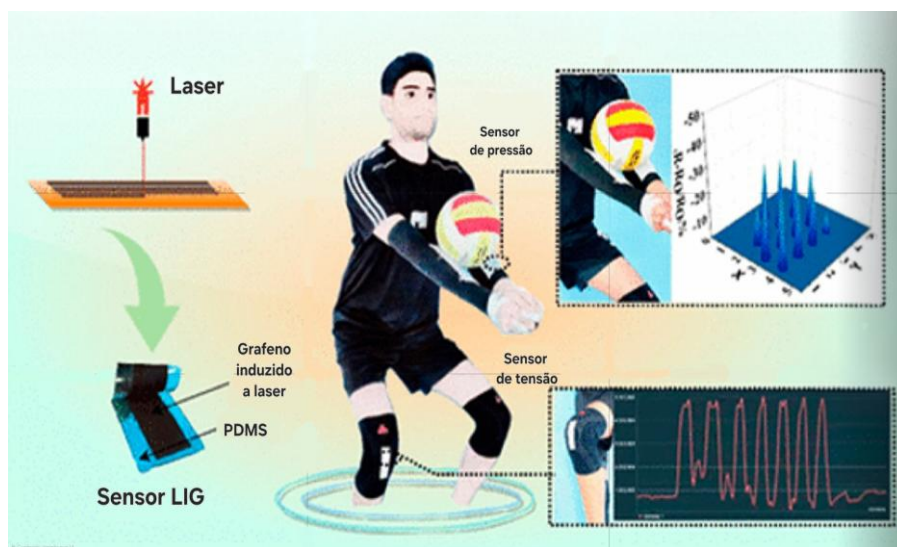
Com o objetivo de aprimorar a precisão de detecção em biossensores eletroquímicos de oxidase, ZHANG et al. (2023) [74] prepararam um substrato super-hidrofóbico de LIG com arquitetura tridimensional, utilizando um processo de fabricação a laser de  $CO_2$ , e construíram um eletrodo enzimático com interface trifásica por imobilização sequencial de catalisadores de peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) e da camada de oxidase sobre o substrato. O biossensor trifásico mantém um nível interfacial de oxigênio constante, dependente da fase gasosa, o que potencializa e estabiliza a cinética da oxidase. Além disso, permite a medição catódica do  $H_2O_2$  gerado durante o bioensaio, aumentando a faixa linear de detecção e a precisão do biossensor.

#### 5.4 DISPOSITIVOS FLEXÍVEIS (WEARABLES)

Para a aplicação prática de tecnologias vestíveis, especialmente na área saúde, é essencial o desenvolvimento de uma plataforma de detecção de alto desempenho, capaz de identificar de forma precisa e estável diversos sinais biológicos, como eletrocardiogramas (ECG), eletromiogramas (EMG), pressão arterial e temperatura corporal, atendendo a requisitos de flexibilidade mecânica, resistência química e biocompatibilidade, além de garantir baixo custo e viabilidade de produção em larga escala. O LIG atende a esses requisitos, pois é um material de baixo custo e escalável, e além das características elétricas, químicas e mecânicas já citadas nesse trabalho, ele pode ser fabricado sobre diversos substratos por meio de padronização direta ou processos de transferência simples, tornando-se adequado para aplicações em dispositivos adesivos para pele, tecidos e outras plataformas de detecção de sinais biológicos [75].

Em LIAO et al. [76], os autores desenvolveram sensores epidérmicos vestíveis baseados em LIG para análise multiplexada de suor, visando monitoramento não invasivo da saúde. Uma matriz de eletrodos flexível e miniaturizada foi fabricada por meio de gravação a laser direta em filme de poliimida (PI). Os eletrodos de LIG obtidos foram posteriormente modificados com membranas seletivas de íons, permitindo a construção de sensores vestíveis multiplexados capazes de monitorar simultaneamente os níveis de pH,  $Na^+$  e  $K^+$  no suor. Os autores relataram bom desempenho nos sensores baseados em LIG, mantendo a capacidade de detecção mesmo

sob flexão, além de apresentarem elevada reprodutibilidade, estabilidade e seletividade. Em comparação com dispositivos comerciais, os sensores desenvolvidos pelos autores se destacaram pelo baixo custo de produção.



**Figura 8:** Esquema de sensores à base de LIG para monitoramento de performance atlética. São representados sensores de pressão no pulso e de estresse no joelho. Retirado de Raza et al. (2022) [77].

## 5.5 TRATAMENTO AMBIENTAL

Íons de metais pesados, como mercúrio, chumbo, arsênio, cromo e cobre, configuram-se como substâncias de elevada toxicidade e persistência ambiental, representando uma ameaça significativa aos ecossistemas. Devido à sua estabilidade química e baixa degradabilidade, esses contaminantes podem permanecer por longos períodos no meio ambiente, acumulando-se em diferentes compartimentos ecológicos. Através de recursos essenciais como a água, os metais pesados podem ser absorvidos pelas raízes das plantas e, subsequentemente, transferidos para a cadeia alimentar por animais que consomem esses vegetais, culminando em efeitos adversos a sistemas fisiológicos essenciais no organismo humano. Nesse contexto, o LIG surge como uma opção promissora para o monitoramento ambiental, já que sua baixa toxicidade, reatividade limitada e elevada atividade catalítica tornam esses materiais a base de LIG ideais para tal aplicação [7].

Nguyen, Kang, Lee e In [78], demonstraram uma aplicação do grafeno induzido a laser (LIG) como um filtro condutor reutilizável para material particulado (MP). O material particulado, incluindo partículas finas de poeira (PM2.5), é considerado perigoso devido à

presença de metais pesados em sua composição, especialmente cádmio, arsênio, chumbo e zinco [71]. Por ser mecanicamente flexível, eletricamente condutivo e altamente poroso, LIG se torna um material filtrante promissor, capaz de oferecer o alto desempenho de filtração típico do grafeno convencional, porém com custo mais acessível [78]. O problema da utilização de LIG em filtros é a sua incapacidade de ser lavado após o uso, característica indispensável para filtros ecologicamente amigáveis, devido a sua falta de robustez mecânica. Os autores, então, melhoraram a robustez mecânica do LIG, desenvolvendo um filtro de ar lavável de alto desempenho baseado em LIG densificado (dLIG). Segundo os autores, o filtro a base de dLIG demonstrou durabilidade excepcional, sendo suficiente para reutilização após limpeza com água por ultrasonicação.

Zhang et al. [79] fabricaram de forma inédita um eficiente evaporador solar de compósito grafeno/óxido de ferro utilizando grafeno induzido a laser sobre papel de celulose, previamente revestido com um complexo de ácido tânico e ferro, seguido de carbonização por laser. O substrato processado apresentou resistência mecânica elevada, com rigidez triplicada, além de permitir dobrabilidade programável, possibilitando o desenvolvimento de evaporadores 3D personalizados para captação de água a partir de múltiplas fontes. O evaporador resultante, denominado CP/Fe-L, demonstrou potencial para dessalinização de água do mar em larga escala, combinando alto desempenho de evaporação, compatibilidade ambiental e versatilidade estrutural.

## 6. SUSTENTABILIDADE E PERSPECTIVAS FUTURAS

Por suas aplicações, características e processo de síntese, o grafeno induzido a laser (LIG) se alinha com alguns objetivos de desenvolvimento sustentável estipulados pela ONU, fazendo com que material represente um avanço em direção a novas tecnologias sustentáveis e amigáveis ao meio ambiente.

A produção de LIG se alinha aos seguintes objetivos estipulados pela ONU [80]:

- ODS 7: Energia Acessível e Limpa;
- ODS 9: Indústria, Inovação e Infraestrutura;
- ODS 12: Produção e Consumo Sustentáveis;
- ODS 17: Parcerias em prol das metas;

A fabricação de grafeno em papel via laser contribui diretamente para o ODS 7, pois utiliza um material capaz de ser utilizado em aplicações de armazenamento de energia de forma

limpa e renovável, oferecendo soluções promissoras para dispositivos de armazenamento energético como supercapacitores, reduzindo a dependência de fontes fósseis e promovendo a transição para matrizes energéticas sustentáveis. Em relação ao ODS 9, essa tecnologia apresenta um avanço significativo ao criar processos inovadores e sustentáveis voltados à produção de dispositivos eletrônicos para aplicações em diversas áreas, fomentando o desenvolvimento industrial sustentável e a inovação tecnológica. No contexto do ODS 12, a produção de LIG pode utilizar materiais ambientalmente amigáveis, empregando métodos de fabricação com menor impacto ambiental e reduzindo o consumo de recursos e a geração de resíduos, promovendo práticas de produção e consumo responsáveis. Por fim, a aplicação do LIG também se conecta ao ODS 17, uma vez que aborda um tema com grande potencial de cooperação entre universidades, setor industrial e instituições governamentais, incentivando parcerias estratégicas para o desenvolvimento de tecnologias inovadoras, sustentáveis e socialmente relevantes.

Apesar de seu grande potencial, o desenvolvimento de grafeno induzido a laser (LIG) ainda enfrenta desafios importantes, que guiam as perspectivas futuras para este material. Entre esses desafios, destaca-se a necessidade de aprimorar a reprodutibilidade e a uniformidade da fabricação em larga escala, de modo a garantir um desempenho consistente em diferentes aplicações. Além disso, a exploração de novas combinações de materiais, como compósitos LIG com óxidos metálicos ou outros elementos funcionais, oferece oportunidades para aprimorar suas funcionalidades e eficiência em dispositivos energéticos, ambientais e de biossensores. Por fim, o fortalecimento de colaborações estratégicas entre universidades, setor industrial e instituições governamentais é essencial para acelerar a transição das pesquisas para soluções tecnológicas inovadoras e sustentáveis, promovendo avanços que estejam alinhados aos objetivos globais de desenvolvimento sustentável.

Apesar dos avanços significativos na produção e aplicação de LIG, diversos desafios significativos ainda motivam pesquisas na área. O controle preciso da morfologia e da porosidade permanece complexo, uma vez que a distribuição e o tamanho dos poros dependem de múltiplos parâmetros do laser e do substrato. A escalabilidade e a uniformidade em grandes áreas também representam obstáculos, dificultando a padronização das propriedades elétricas e mecânicas para aplicações comerciais. A presença de defeitos estruturais, como anéis de 5 ou 7 átomos de carbono, embora útil para certas aplicações, pode comprometer a condutividade elétrica e estabilidade mecânica do material. A integração do LIG em dispositivos eletrônicos

flexíveis, como biossensores ou sistemas eletroquímicos de forma robusta e reproduzível continua sendo um desafio, assim como o ajuste de propriedades específicas, incluindo hidrofobicidade, funcionalização química e desempenho mecânico, para atender as exigências de diferentes aplicações.

## 7. CONCLUSÃO

A partir desta análise abrangente do grafeno induzido a laser (LIG), é possível concluir que este material apresenta um grande potencial tecnológico devido às suas propriedades estruturais e funcionais. A arquitetura 3D porosa, resultante da conversão de ligações de carbono  $sp^3$  em  $sp^2$  sob irradiação localizada e da rápida liberação de gases durante o processo de síntese, aliada ao alto grau de grafitação, relacionado ao quanto a estrutura obtida durante a síntese se aproxima do grafeno ideal, conferem ao LIG características únicas, como elevada condutividade elétrica ( $\sim 25 \text{ S cm}^{-1}$ ), área superficial específica ( $\sim 340 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ) e estabilidade mecânica, essenciais para aplicações em energia, sensores, eletrocatalisadores e dispositivos flexíveis [10].

Essas aplicações foram amplamente exploradas ao longo do trabalho, destacando o uso do LIG em diferentes contextos tecnológicos. Entre elas, incluem-se: o emprego como ânodo em baterias de íon-lítio; a construção de sensores vestíveis de deformação capazes de medir ângulos de flexão com alta precisão; a utilização como eletrodo catalítico eficiente para a quebra da molécula de água em hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) e oxigênio ( $\text{O}_2$ ); o desenvolvimento de sensores epidérmicos vestíveis baseados em LIG para análise multiplexada de suor; e a implementação em evaporadores solares de compósito grafeno/óxido de ferro. Esses exemplos evidenciam a versatilidade do material e seu potencial de aplicação em áreas variadas, desde armazenamento de energia até dispositivos biomédicos e tecnologias sustentáveis.

Os diferentes métodos de síntese de LIG e a escolha de substratos influenciam diretamente suas propriedades, como porosidade, condutividade elétrica e estabilidade mecânica, permitindo que o material seja ajustado conforme a necessidade da aplicação. Além disso, o LIG se destaca por seu caráter sustentável, uma vez que sua produção pode ser realizada a partir de materiais abundantes e com baixo impacto ambiental, contribuindo para estratégias de desenvolvimento sustentável. Perspectivas futuras incluem a otimização de processos de fabricação, a integração em dispositivos multifuncionais e a expansão de aplicações em áreas

emergentes, consolidando o LIG como um material promissor para avanços científicos e tecnológicos.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AVINASH, K. & PATOLSKY, F. Laser-induced graphene structures: From synthesis and applications to future prospects. *Materials Today*, v. 70, p. 104-136, 2023.
- [2] CLARO, Pedro I. C.; PINHEIRO, Tomás; SILVESTRE, Sara L.; MARQUES, Ana C.; COELHO, João; MARCONCINI, José M.; FORTUNATO, Elvira; MATTOSO, Luiz H. C.; MARTINS, Rodrigo. Sustainable carbon sources for green laser-induced graphene: A perspective on fundamental principles, applications, and challenges. *Applied Physics Reviews*, 9, 041305, 2022.
- [3] BRESSI, A. C.; DALLINGER, A.; STEKSOVA, Y.; GRECO, F. Bioderived Laser-Induced Graphene for Sensors and Supercapacitors. *ACS Applied Materials & Interfaces*, v. 15, n. 30, p. 35788-35814, 2023.
- [4] GUPTA, Abhishek; SHARMA, Chetan Prakash; THAMARAIS-ELVAN, Chidambaram; PISHARODY, Lakshmi; POWELL, Camilah D.; ARNUSCH, Christopher J. Low-Voltage Bacterial and Viral Killing Using Laser-Induced Graphene-Coated Non-woven Air Filters. *ACS Applied Materials & Interfaces*, v. 13, n. 49, p. 59373-59380, 15 dez. 2021.
- [5] THAMARAIS-ELVAN, Chidambaram; THAKUR, Amit K.; GUPTA, Abhishek; ARNUSCH, Christopher J. Electrochemical Removal of Organic and Inorganic Pollutants Using Robust Laser-Induced Graphene Membranes. *ACS Applied Materials & Interfaces*, v. 13, n. 1, p. 1452-1462, 2021.
- [6] AISWARYA, C. L.; SINGH, Swatantra P. Dual-Sided Superhydrophobic Laser-Induced Graphene Evaporator for Efficient Desalination and Brine Treatment under High Salinity. *ACS Applied Materials & Interfaces*, v. 17, n. 3, p. 4972-4983, 2025.
- [7] VALLEJO PAT, Mario Alejandro; EZEKIEL-HART, Harriet; POWELL, Camilah D. Nanomaterial Solutions for Environmental Applications and Bacteriological Threats: The Role of Laser-Induced Graphene. *Nanomaterials*, v. 15, n. 17, p. 1377, 2025.

- [8] GUO, Yani; ZHANG, Cheng; CHEN, Ye; NIE, Zhengwei. Research Progress on the Preparation and Applications of Laser-Induced Graphene Technology. *Nanomaterials*, v. 12, n. 14, art. 2336, 2022.
- [9] TORATI, Sri Ramulu; SLAUGHTER, Gymama. Laser-Induced Graphene for Early Disease Detection: A Review. *ChemElectroChem*, v. 12, n. 6, p. e202400672, 2025.
- [10] JO, SEUNG GEUN; RAMKUMAR, RAHUL; LEE, JUNG WOO; et al. Recent advances in laser-induced graphene-based materials for energy storage and conversion. *ChemSusChem*, [S.l.], v. 17, n. 5, p. 101146, 2024.
- [11] YANG, P.; YANG, X.; LIU, W.; GUO, R.; YAO, Z. Graphene-based electrocatalysts for advanced energy conversion. *Green Energy & Environment*, [S.l.], v. 8, n. 5, p. 1265-1278, 2023.
- [12] CHÁVEZ-CASTILLO, María; RODRIGUEZ-MEZA, Mario; MEZA-MONTES, Lilia. Grafeno y siliceno: una nueva vida gracias a la sutileza de los materiales bidimensionales. *Ciencia Ergo-Sum*, v. 20, p. 148, 2013.
- [13] KUMAR, Sanjay; HIMANSHI; PRAKASH, Jyoti; VERMA, Ankit; SUMAN; JASROTIA, Rohit; KANDWAL, Abhishek; VERMA, Ritesh; GODARA, Sachin Kumar; KHAN, M. A. Majeed; ALSHEHRI, Saad M.; AHMED, Jahangeer. A Review on Properties and Environmental Applications of Graphene and Its Derivative-Based Composites. *Catalysts*, v. 13, n. 1, p. 111, 2023.
- [14] SOFO, JORGE O.; CHAUDHARI, AJAY S.; BARBER, GREG D. Graphane: a two-dimensional hydrocarbon. *Physical Review B*, v. 75, n. 15, Article 153401, 10 abr. 2007.
- [15] NAIR, R. R.; REN, W.; JALIL, R.; RIAZ, I.; KRAVETS, V. G.; BRITNELL, L.; BLAKE, P.; SCHEDIN, F.; MAYOROV, A. S.; YUAN, S.; KATSNELSON, M. I.; GEIM, A. K.; NOVOSELOV, K. S. Fluorographene: a two-dimensional counterpart of Teflon. *Small*, v. 6, n. 24, p. 2877–2884, 2010.
- [16] ZHAN, MEIQIU; XU, MINJIE; LIN, WEIJUN; HE, HAIJIE; HE, CHUANG. Graphene Oxide Research: Current Developments and Future Directions. *Nanomaterials*, v. 15, n. 7, p. 507, 2025.

- [17] MBAYACHI, Vestince B.; NDAYIRAGIJE, Euphrem; SAMMANI, Thirasara; TAJ, Sunaina; MBUTA, Elice R.; KHAN, Atta Ullah. Graphene synthesis, characterization and its applications: A review. *Results in Chemistry*, v. 3, p. 100163, 2021.
- [18] HUTAPEA, Joys Alisa Angelina; MANIK, Yosia Gopas Oetama; NDRURU, Sun Theo Constan Lotebulo; HUANG, Jingfeng; GOEI, Ronn; TOK, Alfred Ing Yoong; SIBURIAN, Rikson. Comprehensive review of graphene synthesis techniques: advancements, challenges, and future directions. *Micro*, v. 5, n. 3, p. 40, 2025.
- [19] YI, Min; SHEN, Zhigang. A review on mechanical exfoliation for the scalable production of graphene. *Journal of Materials Chemistry A*, v. 3, n. 22, p. 11700–11715, 2015.
- [20] ARIFUTZZAMAN, A.; ISMAIL, A. F.; YAACOB, I. I.; ALAM, M. Z.; KHAN, A. A. Experimental investigation of concentration yields of liquid phase exfoliated graphene in organic solvent media. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 488, n. 1, p. 012001, 2019.
- [21] STANKOVICH, S. et al. Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide. *Carbon*, v. 45, n. 7, p. 1558-1565, 2007.
- [22] DREYER, Daniel R.; PARK, Sungjin; BIELAWSKI, Christopher W.; RUOFF, Rodney S. The chemistry of graphene oxide. *Chemical Society Reviews*, v. 39, n. 1, p. 228-240, 2010.
- [23] PEI, Songfeng; CHENG, Hui-Ming. The reduction of graphene oxide. *Carbon*, v. 50, n. 9, p. 3210–3228, 2012.
- [24] CHEN, Da; FENG, Hongbin; LI, Jinghong. Graphene oxide: preparation, functionalization, and electrochemical applications. *Chemical Reviews*, v. 112, n. 11, p. 6027–6053, 2012.
- [25] REINA, A.; JIA, X.; HO, J.; NEZICH, D.; SON, H.; BULOVIĆ, V.; DRESSELHAUS, M. S.; KONG, J. Large area, few-layer graphene films on arbitrary substrates by chemical vapor deposition. *Nano Letters*, v. 9, n. 1, p. 30–35, 2009.
- [26] LI, Xuesong; CAI, Weiwei; AN, Jianghong; KIM, Sungjin; NAIR, Ramakrishnan; YU, Boryung; LODHIA, Shaifali; ZHANG, Dong; BAE, Sang H.; SHERIDAN, William; et al. Large-area synthesis of high-quality and uniform graphene films on copper foils. *Science*, v. 324, n. 5932, p. 1312–1314, 2009.

- [27] RIEDL, Christian; COLETTI, Camilla; STARKE, Ulrich. Structural and electronic properties of epitaxial graphene on SiC(0001): A review of growth, characterization, transfer doping and hydrogen intercalation. *Journal of Physics D: Applied Physics*, v. 43, n. 37, p. 374009, 2010.
- [28] EMTSEV, K. V.; BLEIKAMP, S.; SEYLLER, T.; GRAUPNER, R.; LEY, L. Towards wafer-size graphene layers by atmospheric pressure graphitization of silicon carbide. *Nature Materials*, v. 8, p. 203–207, 2009.
- [29] WU, J.; NAIR, R. R.; BLANTON, T.; FAZL, A.; HEER, W. A.; SHEEHAN, P.; GEIM, A. K. Synthesis of few-layer graphene via arc-discharge method. *Nano Research*, v. 3, n. 6, p. 317–325, 2010.
- [30] YANG, Na-Kyoung; SHIN, Yoo-Kyum; PARK, Saeyoung; et al. Exploring graphene structure, material properties, and electrochemical characteristics through laser-induced temperature analysis. *Micro and Nano Systems Letters*, [S.l.], v. 12, p. 8, 2024.
- [31] BRESSI, Anna Chiara; AMARO, Lucía Pérez; PIZZO, Benedetto; MARINO, Attilio; CIOFANI, Gianni; GRECO, Francesco. Laser-Induced Graphene from Wood-Based Composites: Integrating Circuits in Bioderived Furniture. *Advanced Sustainable Systems*, v. 9, n. 9, p. e00565, 2025.
- [32] NAM, Han Ku; CHOI, Jungrak; JING, Tongmei; YANG, Dongwook; LEE, Younggeun; KIM, Young-Ryeul; LE, Truong Son Dinh; KIM, Byunggi; YU, Liandong; KIM, Seung Woo; PARK, Inkyu; KIM, Young Jin. Laser-induced graphene formation on recycled wood for green smart furniture. *EcoMat*, v. 6, n. 4, p. e12447, 2024.
- [33] LIM, Soomook; PARK, Hyunsoo; YAMAMOTO, Go; LEE, Changgu; SUK, Ji Won. Measurements of the electrical conductivity of monolayer graphene flakes using conductive atomic force microscopy. *Nanomaterials*, Basel, v. 11, n. 10, art. no. 2575, 2021.
- [34] NAIR, R. R.; REN, W.; JALIL, R.; RIAZ, I.; KRAVETS, V. G.; BRITNELL, L.; BLAKE, P.; SCHEDIN, F.; MAYOROV, A. S.; YUAN, S.; KATSELSO, M. I.; CHENG, H. M.; STRUPINSKI, W.; BULUSHEVA, L. G.; OKOTRUB, A. V.; GRIGORIEVA, I. V.; GRIGORENKO, A. N.; NOVOSELOV, K. S.; GEIM, A. K. Fluorographene: A two-dimensional counterpart of Teflon. *Small*, v. 6, n. 24, p. 2877–2884, 2010.

- [35] POLITANO, Grazia Giuseppina; VERSACE, Carlo. Electrical and Optical Characterization of Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxide Thin Films. *Crystals*, v. 12, n. 9, art. 1312, 2022.
- [36] LIN, J.; PENG, Z.; LIU, Y.; RUIZ-ZEPEDA, F.; YE, R.; SAMUEL, E. L. G.; YACAMAN, M. J.; YAKOBSON, B. I.; TOUR, J. M. Laser-induced porous graphene films from commercial polymers. *Nature Communications*, v. 5, art. 5714, 2014.
- [37] SCHRODER, D. K. (2006). *Semiconductor material and device characterization*. Wiley.
- [38] JONES, R. R.; HOOPER, D. C.; ZHANG, L.; WOLVERSON, D.; VALEV, V. K. Raman Techniques: Fundamentals and Frontiers. *Nanoscale Research Letters*, v. 14, n. 1, p. 231, 2019.
- [39] HAACK, Micheli de Souza. Identificação e caracterização de materiais por espectroscopia Raman. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Física) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- [40] HUANG, Libei; SU, Jianjun; SONG, Yun; et al. Laser-Induced Graphene: En Route to Smart Sensing. *Nano-Micro Letters*, v. 12, art. 157, 2020.
- [41] SCARDACI, Vittorio. Laser Synthesized Graphene and Its Applications. *Applied Sciences*, v. 11, n. 14, p. 6304, 2021.
- [42] YE, Ruquan; CHYAN, Yieu; ZHANG, Jibo; LI, Yilun; HAN, Xiao; KITTRELL, Carter; TOUR, James M. Laser-Induced Graphene Formation on Wood. *Advanced Materials*, v. 29, n. 37, 2017.
- [43] CHENG, L.; GUO, W.; CAO, X.; DOU, Y.; HUANG, L.; SONG, Y.; SU, J.; ZENG, Z.; YE, R. Laser-induced graphene for environmental applications: progress and opportunities. *Materials Chemistry Frontiers*, v. 5, p. 4874-4891, 2021.
- [44] VIVALDI, F. Maria; DALLINGER, Alexander; BONINI, Andrea; POMA, Noemi; SEMBRANTI, Lorenzo; BIAGINI, Denise; SALVO, Pietro; GRECO, Francesco; DI FRANCESCO, Fabio. Three-Dimensional (3D) Laser-Induced Graphene: Structure, Properties, and Application to Chemical Sensing. *ACS Applied Materials & Interfaces*, [S.l.], v. 13, n. 26, p. 30245-30260, 2021.

- [45] ZHANG, Z.; ZHU, H.; ZHANG, W.; ZHANG, Z.; LU, J.; XU, K.; et al. A review of laser-induced graphene: From experimental and theoretical fabrication processes to emerging applications. *Carbon*, v. 214, p. 118356, 2023.
- [46] HRISTOVSKI, Ilija R.; HERMAN, Luke A.; MITCHELL, Michael E.; LESACK, Nikolai I.; REICH, Jason; HOLZMAN, Jonathan F. Manifestations of Laser-Induced Graphene under Ultraviolet Irradiation of Polyimide with Varied Optical Fluence. *Nanomaterials*, [S.l.], v. 12, n. 8, p. 1241, 2022.
- [47] GHAVIPANJEH, Ali; SADEGHZADEH, Sadegh. Simulation and experimental evaluation of laser-induced graphene on the cellulose and lignin substrates. *Scientific Reports*, [S.l.], v. 14, art. 4475, 2024.
- [48] McKEEN, L. Polyimides. In: *The Effect of Sterilization on Plastics and Elastomers*. 3. ed. Oxford: Elsevier B.V., 2012. p. 169–182.
- [49] HASAN, Z. Composite materials. In: *Tooling for Composite Aerospace Structures*. Elsevier, 2020. p. 21-48.
- [50] YE, Xiaohui; LONG, Jiangyou; LIN, Zhe; ZHANG, Hongjun; ZHANG, Hongjun; ZHANG, Hongjun. Direct laser fabrication of large-area and patterned graphene at room temperature. *Carbon*, v. 68, p. 784–790, 2014.
- [51] COELHO, João; CORREIA, Ricardo F.; SILVESTRE, Sara; PINHEIRO, Tomás; MARQUES, Ana C.; CORREIA, M. Rosário P.; PINTO, Joana Vaz; FORTUNATO, Elvira; MARTINS, Rodrigo. Paper-based laser-induced graphene for sustainable and flexible microsupercapacitor applications. *Microchimica Acta*, v. 190, n. 1, Art. 40, 2023.
- [52] WANG, Liyong; WANG, Zhiwen; BAKHTIYARI, Ali Naderi; ZHENG, Hongyu. A comparative study of laser-induced graphene by CO<sub>2</sub> infrared laser and 355 nm ultraviolet (UV) laser. *Micromachines*, v. 11, n. 12, p. 1094, 2020.
- [53] YUNG, K. C.; LIEM, H.; CHOY, H. S.; CHEN, Z. C.; CHENG, K. H.; CAI, Z. X. Laser direct patterning of a reduced-graphene oxide transparent circuit on a graphene oxide thin film. *Journal of Applied Physics*, [S.l.], v. 113, n. 24, p. 244903-1–244903-5, jun. 2013.
- [54] KOINUMA, M.; OGATA, C.; KAMEI, Y.; HATAKEYAMA, K.; TATEISHI, H.; WATANABE, Y.; TANIGUCHI, T.; HATAKEYAMA, K.; KUWAHARA, Y.; FUNATSU,

- A.; SAKATA, M.; HAYAMI, S.; MATSUMOTO, Y. Photochemical Engineering of Graphene Oxide Nanosheets. *The Journal of Physical Chemistry C*, v. 116, n. 37, p. 19822-19827, 2012.
- [55] ARUL, R.; OOSTERBEEK, R. N.; ROBERTSON, J.; XU, G.; JIN, J.; SIMPSON, M. C. The mechanism of direct laser writing of graphene features into graphene oxide films involves photoreduction and thermally assisted structural rearrangement. *Carbon*, v. 99, p. 423-431, 2016.
- [56] MOVAGHGHARNEZHAD, Shirin; KANG, Pilgyu. Laser-induced graphene: synthesis advances, structural tailoring, enhanced properties, and sensing applications. *Journal of Materials Chemistry C*, v. 12, n. 19, p. 6718–6742, 2024.
- [57] WU, J.; ZHANG, Z.; LIU, Y.; et al. Laser-induced graphene: synthesis advances, structural tailoring, enhanced properties, and sensing applications. *Journal of Materials Chemistry C*, v. 12, n. 19, p. 6718–6742, 2024.
- [58] VELASCO, A.; RYU, Y. K.; HAMADA, A.; DE ANDRÉS, A.; CALLE, F.; MARTÍNEZ, J. Laser-Induced Graphene Microsupercapacitors: Structure, Quality, and Performance. *Nanomaterials*, [S.l.], v. 13, n. 5, p. 788, 2023.
- [59] ARYA, N. et al. Tuning the Electronic and Electrochemical Properties of 3D Porous Laser-Induced Graphene by Electrochemically Induced Deposition of Polyoxovanadate Nanoclusters for Flexible Supercapacitors. *Advanced Functional Materials*, 2024.
- [60] BAI, S.; RUAN, L.; CHEN, H.; DU, Y.; DENG, H.; DAI, N.; TANG, Y. Laser-induced graphene: Carbon precursors, fabrication mechanisms, material characteristics, and applications in energy storage. *Chemical Engineering Journal*, v. 493, p. 152805, 2024.
- [61] LE, T. S. D. et al. Recent advances in laser-induced graphene: Mechanism, material characteristics, and applications. *Advanced Functional Materials*, v. 32, n. 52, p. 2205158, 2022.
- [62] WENTAO, Y. et al. Surface and interface functionalization of laser induced graphene: Properties, fabrication, and applications to flexible sensors. *Results in Surfaces and Interfaces*, v. 18, p. 100362, 2024.

- [63] UC, J. R. J.; BHAT, S.; SUDHAKAR, Y. N.; RAO, A.; CYRIAC, V.; DE, S. Laser-induced graphene electrode-based supercapacitors: insight on the influence of aqueous electrolytes on its energy storage potential. *Journal of Materials Science*, v. 60, n. 26, p. 10944-10964, 2025.
- [64] MA, X. et al. Laser-induced porous graphene-based materials and its application in energy storage. *ACS Omega*, [S.l.], v. 10, n. 3, p. 3456-3463, 2025.
- [65] LI, Z.; HUANG, L.; CHENG, L.; GUO, W.; YE, R. Laser-induced graphene-based sensors in health monitoring: progress, sensing mechanisms, and applications. *Small Methods*, v. 8, n. 11, p. e2400118, nov. 2024.
- [66] RAMOSO, John Paolo; RASEKH, Manoochehr; BALACHANDRAN, Wamadeva. Graphene-Based Biosensors: Enabling the Next Generation of Diagnostic Technologies — A Review. *Biosensors*, Basel, v. 15, n. 9, p. 586, 2025.
- [67] PEÑA-BAHAMONDE, J., Nguyen, H.N., FANOURAKIS, S.K. et al. — “Recent advances in graphene-based biosensor technology with applications in life sciences”. *Journal of Nanobiotechnology*, v. 16, n. 1, p. 400, 2018.
- [68] BARJA, A. M.; RYU, Y. K.; TARANCÓN, S.; MARTÍNEZ, J. Laser-Induced Graphene Strain Sensors for Body Movement Monitoring. *Optics and Laser Technology*, v. 157, p. 108614, 2024.
- [69] C. FRANCIS et al. Laser-Induced Graphene Gas Sensors for Environmental Monitoring. *Frontiers in Chemistry*, v. 12, p. 1448205, 2024.
- [70] KOLB, K. J.; SPERRY, J. S. Differences in drought adaptation between subspecies of big sagebrush (*Artemisia tridentata*). *Ecology*, v. 80, n. 7, p. 2373–2384, 1999.
- [71] JUNG, Y.; MIN, J.; CHOI, J.; BANG, J.; JEONG, S.; PYUN, K. R.; AHN, Y.; CHO, S.; HONG, S.; LEE, J. Smart paper electronics by laser-induced graphene for biodegradable real-time food spoilage monitoring. *Applied Materials Today*, [S.l.], v. 29, p. 101589, 2022.
- [72] LI, Yi; WANG, Huanhuan; PRIEST, Cameron; LI, Siwei; XU, Ping; WU, Gang. Advanced Electrocatalysis for Energy and Environmental Sustainability via Water and Nitrogen Reactions. *Advanced Materials*, v. 33, n. 6, art. 2000381, 2021.

- [73]. ZHANG, Jibo; ZHANG, Chenhao; FEI, Huilong; LI, Yilun; SHA, Junwei; TOUR, James M. *Efficient Water-Splitting Electrodes Based on Laser-Induced Graphene*. ACS Applied Materials & Interfaces, v. 9, n. 32, p. 26840–26847, 2017. DOI: 10.1021/acsami.7b06727.
- [74] ZHANG, M.; ZHANG, J.; DING, Z.; WANG, H.; HUANG, L.; FENG, X. Laser-Induced Graphene Arrays-Based Three-Phase Interface Enzyme Electrode for Reliable Bioassays. Biomimetics, v. 8, n. 1, p. 26, 2023.
- [75] KIM, Hyeonwoo; KIM, Young-Jin. Wearable healthcare using laser-induced graphene. JMST Advances, v. 7, p. 177–185, 2025.
- [76] LIAO, Jianjun; ZHANG, Xiangya; SUN, Zihan; et al. Laser-induced graphene-based wearable epidermal ion-selective sensors for noninvasive multiplexed sweat analysis. Biosensors, v. 12, n. 6, p. 397, 2022.
- [77] RAZA, T.; TUFAIL, M. K.; ALI, A.; BOAKYE, A.; QI, X.; MA, Y.; ALI, A.; QU, L.; TIAN, M. Wearable and flexible multifunctional sensor based on laser-induced graphene for the sports monitoring system. ACS Applied Materials & Interfaces, [S.l.], v. 14, n. 48, p. 54170–54181, 2022..
- [78] NGUYEN, Anh-Phan; KANG, Won-Kyu; LEE, Jung-Bae; IN, Jung-Bin. High-performance washable PM2.5 filter fabricated with laser-induced graphene. Materials, v. 14, n. 19, p. 5551, 2021.
- [79]. ZHANG, Jing; WEI, Yujun; CHEN, Penghui; HUANG, Zhijian; YU, Qixu; TAN, Jing; ZENG, Hongzhen; YU, Shudong. Iron-catalyzed laser-induced graphene on cellulose paper for solar-driven interfacial evaporation. Materials Horizons, v. 12, p. 7346–7357, 2025.
- [80]. ONU. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Agenda 2030. Disponível em: [Take Action for the Sustainable Development Goals - United Nations Sustainable Development](#) Acesso em: 19 jul. 2025.