

PROPRIEDADES ELÉTRICAS DO GRAFENO E SEU IMPACTO NA INDÚSTRIA ELETRÔNICA

ELECTRICAL PROPERTIES OF GRAPHENE AND ITS IMPACT ON THE ELECTRONICS INDUSTRY

PROPIEDADES ELÉCTRICAS DEL GRAPENO Y SU IMPACTO EN LA INDUSTRIA ELECTRÓNICA

Weverson Cirino¹; Célio N. de Oliveira²; Celso V. L. Martins³; Gabriel P. de Souza⁴

¹Universidade do Estado do Amazonas; weverson.cirino@gmail.com

²Universidade do Estado do Amazonas; cndo.eng22@uea.edu.br

³Universidade do Estado do Amazonas; cvlm.eng22@uea.edu.br

⁴Universidade do Estado do Amazonas; gpds.eng22@uea.edu.br

Resumo: O grafeno destaca-se como um material bidimensional com propriedades excepcionais, incluindo elevada mobilidade eletrônica, excelente condutividade térmica e notável flexibilidade mecânica, tornando-o promissor para aplicações em eletrônica e optoeletrônica. Este artigo apresenta uma revisão abrangente de suas propriedades fundamentais e compara seu desempenho com materiais tradicionais como silício e óxido de índio e estanho (ITO), com foco em transistores, sensores e eletrodos transparentes. Aborda-se também o uso de dicalcogenetos metálicos de transição (TMDCs) em conjunto com o grafeno, que oferecem alternativas com *bandgap* adequado para lógica digital. A análise inclui os desafios relacionados à confiabilidade desses materiais, como oxidação, instabilidade térmica e degradação em substratos flexíveis. Por fim, são avaliadas as perspectivas de mercado do grafeno e dos TMDCs em setores estratégicos como energia, biomedicina, construção e eletrônica, ressaltando a necessidade de superar barreiras tecnológicas para viabilizar sua adoção comercial e o impacto social e ambiental de sua inovação.

Palavras-chave: Grafeno; condutividade elétrica; eletrônica flexível; transistores; nanomateriais; TMDCs; inovação tecnológica.

Abstract: Graphene stands out as a two-dimensional material with exceptional properties, including high electron mobility, excellent thermal conductivity, and remarkable mechanical flexibility, making it a promising candidate for applications in electronics and optoelectronics. This article presents a comprehensive review of its fundamental properties and compares its performance with traditional materials such as silicon and indium tin oxide (ITO), focusing on transistors, sensors, and transparent electrodes. The use of transition metal dichalcogenides (TMDCs) in conjunction with graphene is also addressed, as they offer alternatives with a bandgap suitable for digital logic. The analysis includes challenges related to the reliability of these materials, such as oxidation, thermal instability, and degradation on flexible substrates. Finally, the market prospects for graphene and TMDCs in strategic sectors such as energy, biomedicine, construction, and electronics are evaluated, highlighting the need to overcome technological barriers to enable their commercial adoption and the social and environmental impact of this innovation.

Keywords: Graphene; electrical conductivity; flexible electronics; transistors; nanomaterials; TMDCs; technological innovation.

Resumen: El grafeno destaca como un material bidimensional con propiedades excepcionales, entre las que se incluyen una elevada movilidad electrónica, una excelente conductividad térmica y una notable flexibilidad mecánica, lo que lo convierte en un material prometedor para aplicaciones en electrónica y optoelectrónica. Este artículo presenta una revisión exhaustiva de sus propiedades fundamentales y compara su rendimiento con el de materiales tradicionales como el silicio y el óxido de indio y estaño (ITO), centrándose en transistores, sensores y electrodos transparentes. También se aborda el uso de dicalcogenuros de metales de transición (TMDC) junto con el grafeno, que ofrecen alternativas con una banda prohibida adecuada para la lógica digital. El análisis incluye los retos relacionados con la fiabilidad de estos materiales, como la oxidación, la inestabilidad térmica y la degradación en sustratos flexibles. Por último, se evalúan las perspectivas de mercado del grafeno y los TMDC en sectores estratégicos como la energía, la biomedicina, la construcción y la electrónica, destacando la

necesidad de superar las barreras tecnológicas para viabilizar su adopción comercial y el impacto social y ambiental de su innovación.

Palabras clave: Grafeno; conductividad eléctrica; electrónica flexible; transistores; nanomateriales; TMDC; innovación tecnológica.

1. INTRODUÇÃO

Desde sua descoberta experimental em 2004 por Andre Geim e Konstantin Novoselov [1], o grafeno tem se destacado como um dos materiais mais promissores da ciência moderna, despertando amplo interesse nas comunidades científica e tecnológica. A obtenção do material por meio da esfoliação mecânica do grafite contrariou expectativas teóricas sobre a instabilidade de estruturas bidimensionais, o que rendeu aos autores o Prêmio Nobel de Física em 2010 e impulsionou o início de uma nova era na física do estado sólido e na engenharia de materiais [2].

O grafeno é constituído por uma única camada de átomos de carbono organizados em uma rede hexagonal plana, com apenas um átomo de espessura. Essa estrutura confere ao material uma combinação de propriedades físicas e eletrônicas excepcionais, como alta condutividade elétrica (da ordem de $\sim 10^6 S/cm$, mobilidade eletrônica ultraelevada (acima de $200.000 cm^2/V.s$ em condições ideais) e a observação do efeito Hall quântico a temperatura ambiente [3]. Além disso, seus portadores de carga comportam-se como férmions de Dirac sem massa, regidos por uma relação linear entre energia e momento, o que lhe confere uma estrutura de bandas singular, o chamado cone de Dirac.

Essas características colocam o grafeno em posição de destaque frente a semicondutores convencionais, como o silício, e viabilizam sua aplicação em uma nova geração de dispositivos eletrônicos mais rápidos, miniaturizados, flexíveis e energeticamente eficientes. No contexto da crescente demanda por tecnologias de alto desempenho, o grafeno surge como um candidato-chave para aplicações em transistores de alta frequência, sensores eletrônicos de alta sensibilidade, eletrônica flexível e dispositivos optoeletrônicos avançados.

Este artigo tem como objetivo analisar de forma abrangente as propriedades elétricas do grafeno, bem como explorar suas principais aplicações tecnológicas na indústria eletrônica. Adicionalmente, busca-se discutir os desafios técnicos e industriais que ainda limitam sua adoção em larga escala, além de apresentar o papel dos dicalcogenetos de metais de transição (TMDCs) como materiais complementares em dispositivos híbridos baseados em grafeno. Por fim, são examinadas as perspectivas futuras e o potencial impacto desses materiais bidimensionais em setores estratégicos da economia, com uma análise aprofundada das perspectivas de mercado e dos impactos sociais e ambientais.

2. METODOLOGIA

Este trabalho consiste em uma revisão narrativa da literatura científica sobre as

propriedades elétricas do grafeno e suas aplicações na indústria eletrônica. A seleção dos artigos e publicações foi realizada por meio de buscas em bases de dados acadêmicas como Scopus, Web of Science e Google Scholar, utilizando termos-chave como "*graphene electrical properties*", "*graphene electronics*", "TMDCs", "*graphene applications*", "*flexible electronics*" e "*graphene market*". Foram priorizadas fontes primárias, como artigos de periódicos científicos revisados por pares, teses e dissertações, com foco em publicações dos últimos 10 anos para garantir a atualidade das informações. Fontes secundárias, como livros e *reviews* abrangentes, foram utilizadas para contextualização e aprofundamento conceitual. Artigos de blogs e notícias foram consultados apenas para ilustrar exemplos de aplicações ou avanços recentes, com a devida ressalva sobre sua natureza não científica e sem serem utilizados como base para afirmações técnicas ou científicas. A análise e síntese das informações foram realizadas de forma qualitativa, buscando identificar os principais conceitos, avanços tecnológicos, desafios e perspectivas futuras do grafeno e dos TMDCs.

3. O GRAFENO E AS SUAS PROPRIEDADES.

O grafeno é um material bidimensional constituído por uma única camada de átomos de carbono organizados em uma rede hexagonal plana, semelhante a um favo de mel. Essa estrutura cristalina não corresponde a uma rede de Bravais simples, uma vez que sua célula unitária contém dois átomos de carbono distintos, denominados sítios A e B. Cada átomo forma três ligações σ fortes com seus vizinhos mais próximos (hibridização sp^2), deixando um orbital p_z não hibridizado. Esse orbital p_z , orientado perpendicularmente ao plano da camada, é responsável pela formação das ligações π e π^* fundamentais para as propriedades eletrônicas do grafeno.

O carbono pode formar diversas estruturas alotrópicas, entre elas o fulereno, os nanotubos de carbono e o grafite, todos intimamente relacionados ao grafeno. A Figura 1 ilustra essas formas: à esquerda, os fulerenos, caracterizados por sua geometria esférica ou quase esférica, com aplicações na nanotecnologia; ao centro, os nanotubos de carbono, que apresentam elevada resistência mecânica e propriedades elétricas excepcionais, formados por enrolamento do grafeno em estruturas tubulares; e à direita, o grafite, composto por múltiplas camadas de grafeno empilhadas por interações de Van der Waals, sendo a principal matéria-prima para a extração do grafeno.

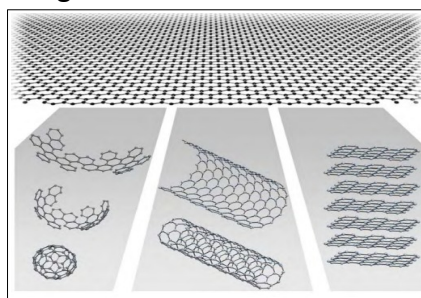


Figura 1: Estruturas alotrópicas de carbono associadas ao grafeno.

Fonte: Geim e Novoselov (2007) [2].

Do ponto de vista estrutural, o grafeno pode ser descrito como a menor espessura possível de carbono, com altura equivalente a um único átomo. Essa característica confere ao material uma combinação única de propriedades físico-químicas e eletrônicas que o tornam especialmente atrativo para aplicações avançadas na eletrônica, fotônica e nanociência.

Diversos métodos vêm sendo empregados para a obtenção do grafeno, sendo a Deposição Química de Vapor (*Chemical Vapour Deposition – CVD*) um dos mais eficazes em termos de qualidade do material obtido. Nesse processo, hidrocarbonetos são decompostos em substratos metálicos, como o cobre, em ambiente controlado de vácuo, com temperaturas em torno de 1000°C . Embora a técnica produza grafeno com excelente cristalinidade, a transferência do material para outros substratos pode comprometer suas propriedades elétricas. Estratégias alternativas vêm sendo desenvolvidas, como o uso de camadas intermediárias de óxido ou polímeros de suporte que facilitam a separação sem comprometer a integridade estrutural [4].

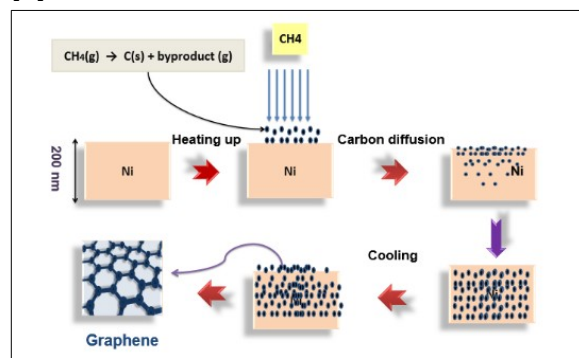


Figura 2: Representação esquemática do processo de obtenção do grafeno via CVD.

Fonte: Adaptado de Cunningham (2014) [5].

Outro método amplamente utilizado é a esfoliação em fase líquida (*Liquid Phase Exfoliation – LPE*), que consiste na dispersão de partículas de grafite em solventes apropriados contendo estabilizantes, seguida da aplicação de energia mecânica por ultrassonicação ou cisalhamento. Esse processo promove a separação das camadas de grafeno, resultando em folhas isoladas com razoável controle de espessura e qualidade. Embora o LPE permita a produção em escala com custos reduzidos, os materiais obtidos apresentam maior variabilidade estrutural em comparação ao CVD [6].

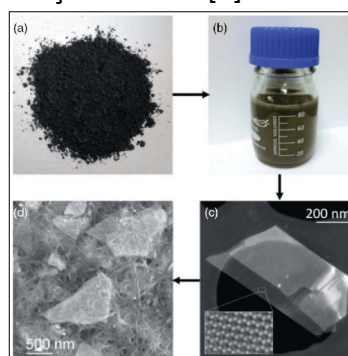


Figura 3: Etapas do processo de esfoliação em fase líquida (LPE).

Fonte: Adaptado de Guo (2018) [7].

A esfoliação mecânica, apesar de pouco escalável, permanece relevante na pesquisa acadêmica devido à sua simplicidade e à alta qualidade do grafeno obtido. A técnica pode ser dividida em cunhagem micromecânica e cunhagem por abrasão, sendo a primeira realizada com auxílio de fitas adesivas para remover sucessivas camadas de grafite, até a obtenção de monocamadas. Este método foi o responsável pelo isolamento inicial do grafeno em 2004 por Geim e Novoselov [1]. Já a cunhagem mecânica utiliza ferramentas de precisão, como cunhas de diamante associadas a ondas ultrassônicas, para promover a separação física das camadas.

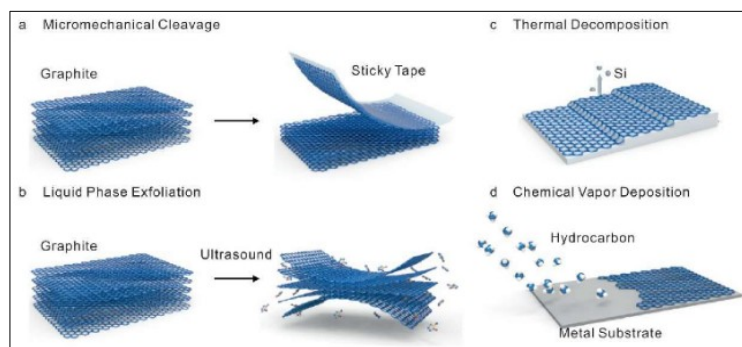


Figura 4: Métodos de obtenção do Grafeno.

Fonte: Adaptado de Lee, Park e Choi (2019) [8].

Cabe destacar que outras rotas sintéticas continuam sendo objeto de intensa investigação, incluindo epitaxia em carbeto de silício (SiC), redução de óxido de grafeno (GO) e métodos híbridos. A recente descoberta do grafeno e seu impacto em múltiplas áreas da ciência têm motivado avanços significativos na engenharia de materiais, visando superar as limitações de escalabilidade, controle estrutural e integridade industrial.

3.1. Bandas de Energia e Cone de Dirac

A estrutura de bandas do grafeno, descrita por modelos de *tight-binding*, revela que as bandas de valência (π) e de condução (π^*) se encontram nos pontos de alta simetria K e K' da zona de Brillouin. Esses pontos são conhecidos como pontos de Dirac, onde ocorre a formação do cone de Dirac. A relação de dispersão próxima aos pontos de Dirac é notavelmente linear, o que distingue o grafeno de semicondutores convencionais, cuja dispersão é parabólica. Essa linearidade é expressa por:

$$E(k) = \hbar \cdot v_F \cdot |k - K| \quad (\text{equação 1}) \quad \text{onde: } -v_F \approx 10^6 \text{ m/s é a velocidade de Fermi.}$$

Essa dispersão linear faz com que os portadores de carga (elétrons e buracos) tenham massa efetiva nula, comportando-se como férmions relativísticos bidimensionais. Ou seja, os elétrons próximos aos pontos de Dirac se comportam como partículas sem massa, e a relação momento-energia deles passa a ser linear como na equação de Dirac 2D. Essa singularidade é o que confere ao grafeno suas distintas propriedades elétricas, altíssima condutividade e mobilidade eletrônica, e a ocorrência de efeitos quânticos raros, como o efeito Hall quântico,

que, diferente de outros materiais que necessitam de baixas temperaturas, nele pode ocorrer em temperaturas ambientes [3].

Na Figura 5, é apresentada a estrutura de bandas eletrônicas do grafeno obtida por meio do modelo de ligação forte (*tight-binding*). Observa-se a presença dos pontos de Dirac, localizados nas interseções entre as bandas de valência (inferior) e condução (superior), caracterizando a ausência de *bandgap*. A dispersão linear ao redor desses pontos evidencia o comportamento relativístico dos portadores de carga, responsáveis pelas propriedades eletrônicas singulares do material.

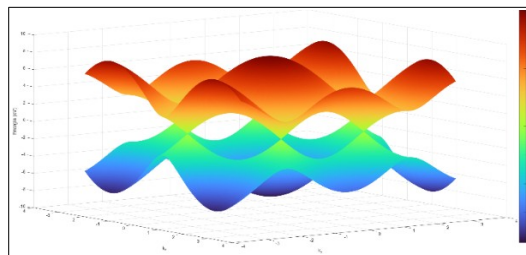


Figura 5: Estrutura de bandas eletrônicas do grafeno calculada pelo modelo *tight-binding*, evidenciando os pontos de Dirac onde ocorre a interseção entre as bandas de valência (inferior) e condução (superior).

Fonte: Autoria Própria.

3.2. Transporte Balístico e Efeito de Klein

O grafeno, devido à sua estrutura altamente ordenada e bidimensional, permite o regime de transporte balístico, no qual elétrons percorrem longas distâncias sem espalhamento significativo por impurezas ou fônons. Em amostras de alta qualidade, a mobilidade eletrônica pode ultrapassar $3 \times 10^6 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$, com comprimentos de livre percurso superiores a $25 \mu\text{m}$ mesmo à temperatura ambiente, que são valores muito superiores aos observados em semicondutores tradicionais, como o silício [9]. Nesse regime, a condução elétrica deixa de obedecer à Lei de Ohm clássica e passa a ser descrita por modelos quânticos, como o de Landauer–Büttiker, nos quais a condutância é quantizada conforme o número de canais de transporte disponíveis.

Outro fenômeno notável associado aos férmions de Dirac presentes no grafeno é o efeito de Klein, que permite a travessia de elétrons por barreiras de potencial mesmo com energia inferior à altura da barreira, sem reflexão. Isso ocorre devido à conservação do pseudospin e à ausência de massa efetiva dos portadores. Esse efeito foi demonstrado experimentalmente em 2009 [10], em heteroestruturas de grafeno, e representa a base para dispositivos inovadores de óptica eletrônica, como colimadores e transistores baseados em filtragem angular.

3.3. Efeito Hall Quântico Anômalo

O grafeno possui uma variação incomum do efeito Hall Quântico. Em baixas temperaturas e campos magnéticos intensos (acima de 10 Tesla), seus portadores de carga descrevem níveis de Landau quantizados, mas, diferente de outros materiais, devido à natureza dos férmions de Dirac, ele se quantiza de uma forma única:

$$\sigma_{xy} = \pm 4 \left(n + \frac{1}{2} \right) \left(\frac{e^2}{h} \right) \quad (\text{equação 2})$$

Essa expressão nos indica que o fator de preenchimento ν assume valores semi-inteiros e múltiplos de 4:

$$\nu = \pm 2, \pm 6, \pm 10, \dots$$

Essa quantização incomum provém de duas características do grafeno: a dispersão linear $E(k)$ dos portadores e a degenerescência dupla dos níveis de Landau $n=0$, duas do spin eletrônico, e duas dos vales de Dirac (K e K'). A Figura 6 compara o efeito Hall quântico em três sistemas: (a) elétron livre, (b) grafeno bicamada e (c) grafeno monocamada. No elétron livre, os níveis são igualmente espaçados e refletem à estrutura parabólica clássica, enquanto nos modelos com grafeno temos a geometria anômala do material, uma delas sendo a relação quântica relativista do grafeno monocamada [11].

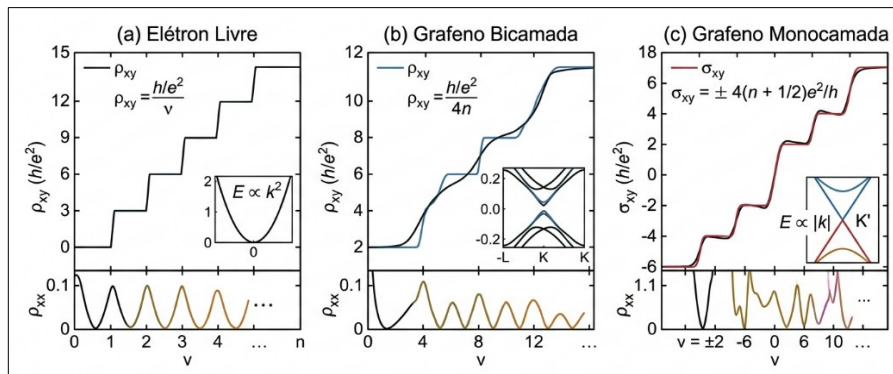


Figura 6: Comparação do efeito Hall quântico em (a) elétron livre, (b) grafeno bicamada e (c) grafeno monocamada, evidenciando a quantização anômala no grafeno.

Fonte: Adaptado de Bischoff et al. (2015) [9].

4. APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS DO GRAFENO E TMDCs

Todas as propriedades citadas do grafeno na seção anterior o destacam como um material chave para aplicação em dispositivos eletrônicos avançados. Em conjunto com os dicalcogenetos de metais de transição (TMDCs) como MoS_2 , ele forma a base de uma nova geração de tecnologias além do silício tradicional. Transistores de efeito de campo (FET) baseados em grafeno apresentam um desempenho excelente em altas frequências. Mesmo com a ausência de *bandgap*, pesquisadores têm desenvolvido estruturas híbridas com os TMDCs, combinando a alta condutividade do grafeno com as propriedades semicondutoras desses materiais.

Essa combinação de materiais une a condutividade e transparência do grafeno com a seletividade espectral e sensibilidade ótica dos TMDCs, sendo especialmente útil em sensores. O grafeno já possui uma alta sensibilidade a cargas elétricas e mudanças de ambiente químico, enquanto os TMDCs ampliam essas capacidades, possibilitando o ajuste fino dos sensores, de forma a criar dispositivos extremamente precisos e miniaturizados.

4.1. Transistores de Alta Frequência

Uma das áreas de pesquisa de grande interesse relacionada ao grafeno são os transistores de alta frequência, já que possui altíssima mobilidade eletrônica (até $2 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$), o que permite frequências de corte de até 300 GHz [12]. Isso demonstra um grande potencial para futuras aplicações na área de telecomunicações, como radiofrequência (RF). Mesmo que o grafeno necessite dos dicalcogenetos de metais de transição para obter um *bandgap*, sua combinação se torna um excelente dispositivo de chaveamento, sendo capaz de excelente modulação de corrente, podendo ter razões *on/off* até mesmo acima de 10^8 em monocamadas.

Diversos avanços relevantes já foram alcançados nessa área de pesquisa, como por exemplo a IBM, que produziu GFETs (transistor de efeito de campo baseado em grafeno) com frequência de corte de até 100 GHz [13], ou a Samsung, que em 2014 apresentou transistores de grafeno flexíveis integrados em circuitos impressos [14]. Esses avanços ilustram o potencial do grafeno na criação de uma nova geração avançada de dispositivos eletrônicos de alta performance.

4.2. Sensores Químicos e Biológicos

Entre as aplicações mais promissoras do grafeno, destaca-se seu uso em sensores químicos e biológicos. Sua espessura atômica, aliada à elevada área superficial e condutividade elétrica, permite detectar variações mínimas de carga ou adsorção de moléculas na superfície. Essas características conferem ao material sensibilidade excepcional, mesmo diante de baixíssimas concentrações de analitos [8].

A funcionalização da superfície do grafeno, bem como sua combinação com TMDCs, potencializa a seletividade química dos sensores, permitindo o ajuste de sua resposta a diferentes alvos moleculares. Dispositivos híbridos já demonstraram desempenho eficaz na detecção seletiva de gases como NO_2 , NH_3 , CO e H_2 [15].

Um exemplo marcante do uso do grafeno na área biomédica foi apresentado em 2019, quando pesquisadores norte-americanos desenvolveram um sensor baseado no material capaz de identificar o vírus da COVID-19 em amostras de saliva em apenas 10 segundos [16]. Além da velocidade, o dispositivo demonstrou alta sensibilidade, mesmo em concentrações muito baixas, evidenciando o potencial do grafeno em diagnósticos rápidos e portáteis, com um impacto social significativo na saúde pública.

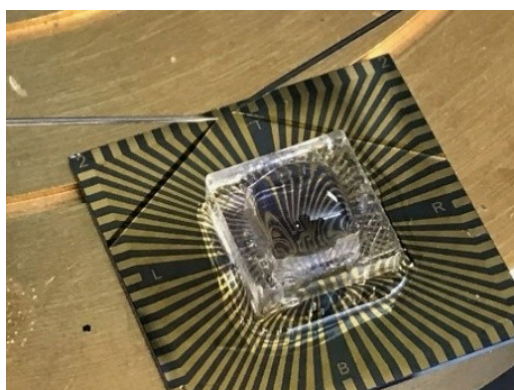


Figura 7: Sensor de COVID-19 à base de grafeno.

Fonte: Adaptado de [16].

4.3. Eletrônica Flexível

A combinação singular de propriedades do grafeno e de outros materiais bidimensionais, como alta condutividade elétrica, transparência óptica ($\approx 97,7\%$) e flexibilidade mecânica, tem impulsionado significativamente o avanço da eletrônica flexível. Esses materiais permitem a fabricação de sistemas leves, dobráveis, transparentes e com excelente desempenho elétrico, tornando-se alternativas promissoras aos materiais tradicionais, como o óxido de índio-estanho (ITO) [17].

Nesse contexto, o grafeno tem sido amplamente investigado como eletrodo transparente e flexível em tecnologias de visualização, iluminação e circuitos integrados de nova geração. Entre as aplicações mais relevantes, destacam-se:

Tabela 1. Aplicações do Grafeno em Eletrônica Flexível.

Aplicação	Descrição	Benefício Técnico
Telas OLED e e-paper dobráveis	Grafeno como camada condutora transparente em displays ultrafinos	Resistência à fratura e maior durabilidade que o ITO
Circuitos Eletrônicos Flexíveis	Integração de grafeno e TMDCs com substrates como PET ou PEN	Viabiliza circuitos em superfícies curvas ou dobráveis
Eletrodos condutores transparentes	Estabilidade após até 5.000 ciclos de dobra em testes mecânicos	Alta confiabilidade mecânica e elétrica

Fonte: Autoria Própria.

4.4. Aplicações em Memórias e Dispositivos Lógicos

O uso de grafeno com TMDCs tem impulsionado a indústria de memórias e dispositivos lógicos. Uma das tecnologias em que o grafeno atuou como um avanço tecnológico foi a de Memórias Resistivas de Acesso Aleatório (ReRAM). Memórias desse tipo utilizam dois eletrodos metálicos (como, por exemplo, o grafeno) separados por um isolante. Ao aplicar-se uma tensão, ocorre a formação ou ruptura de filamentos condutivos dentro do material, o que varia sua resistência. Com base na resistência desses filamentos, os dados salvos são interpretados (resistência baixa = bit 1, resistência alta = bit 0). Memórias ReRAM feitas com grafeno e TMDCs são extremamente rápidas e podem ser fabricadas em tamanhos menores devido às características desses materiais, tornando-se mais eficientes até mesmo em consumo de energia [18].

Um dos exemplos de avanços nessa área ocorreu no Brasil, onde a pesquisadora da USP Marina Sparvoli liderou, com outros pesquisadores, a criação de um memristor constituído de uma camada de grafeno depositada entre contatos de ITON (óxido de índio-estanho dopado com nitrogênio) e de alumínio [19]. Dependendo da tensão aplicada no dispositivo, forma-se o filamento responsável pela memória. A principal vantagem desse tipo de dispositivo é que, mesmo após desligado de forma repentina, ele não perde os dados salvos. Outra vantagem é sua aplicabilidade em tamanho reduzido, que agora, com o uso do grafeno, se tornou ainda mais eficaz. Os testes do protótipo demonstraram uma velocidade até 100 vezes mais rápida que as memórias *flash* atuais.

Um dos avanços mais recentes na indústria de computadores foi a criação de uma nova memória RAM por pesquisadores da Universidade de Fudan, em Xangai, na China. A memória utiliza um novo tipo de tecnologia chamada PoX (*Phase-change Oxide*), e uma das características inovadoras adicionadas foi a substituição do silício pelo grafeno, o que permitiu velocidades extremamente rápidas de operação. A memória é capaz de realizar operações de escrita em 400 picossegundos. Além disso, ela possui uma memória não-volátil, ou seja, ao ser desligada, nenhuma informação é perdida, representando um possível marco para as tecnologias mais atuais como IAs ou até mesmo a indústria de jogos que necessita de alta performance [20]. A empresa já foi capaz de produzir dispositivos em menor escala e os testes dessa versão foram promissores. Esses avanços podem representar uma melhoria significativa nas tecnologias de memórias no futuro, com implicações para a eficiência energética e o desempenho computacional.

4.5. Comparação com Silício e Outros Materiais Tradicionais

A Tabela 2 apresenta uma comparação das propriedades do grafeno com o silício e outros materiais tradicionais, evidenciando as vantagens e desvantagens de cada um no contexto da eletrônica.

Tabela 2. Comparação do Grafeno com o Silício e outros Materiais Tradicionais.

Propriedades	Grafeno	Silício	ITO
Mobilidade Eletrônica	~200.000 (ideal) / ~15.000 (em SiO ₂)	~1.400 (elétrons) / ~450 (lacunas)	Média: ~40–60
BandGap	0 eV	~1,1 eV	~3,5–4,3 eV
Condutividade elétrica (S/m)	~10 ⁶	~10 ⁴	~10 ⁵
Transparência óptica (%)	~97,7% (monocamada)	Baixa	Alta (~90%)
Flexibilidade mecânica	Alta	Baixa	Baixa

Fonte: Autoria Própria.

5. DESAFIOS E CAMINHOS PARA VIABILIZAÇÃO INDUSTRIAL

Embora o grafeno possua excelentes propriedades elétricas e mecânicas, que até mesmo superam os materiais mais utilizados hoje em dia na maioria dos dispositivos eletrônicos, ele ainda enfrenta diversos obstáculos para que sua industrialização em larga

escala passe a ser uma realidade.

Um dos principais desafios para a comercialização do grafeno é a sua produção em larga escala. Embora existam diversas maneiras de obtê-lo, todas têm suas vantagens e desvantagens, algumas delas apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Métodos de obtenção do Grafeno: Vantagens, Desvantagens e Uso Comum.

Método	Vantagem	Desvantagem	Uso mais comum
Esfoliação Mecânica	Simplicidade, elevada qualidade estrutural e eletrônica	Delicado, demorado e baixo rendimento	Pesquisa fundamental
Esfoliação em fase líquida	Simples, Direto e produção em larga escala	Demorado e impuro	Dispositivos eletrônicos
CVD	Produção em larga escala, excelente qualidade	Complexidade e custo elevado	Pesquisa básica e eletrônicos a base de grafeno

Fonte: Autoria Própria.

Apesar dos três métodos listados estarem entre os mais comuns, suas desvantagens impedem a produção em larga escala se comparado com o silício, que domina o mercado atualmente. No entanto, existem diversas pesquisas que visam a melhoria dos processos de produção do grafeno, um exemplo é o uso de IA preditiva no auxílio do processo de deposição química a vapor (CVD) [21]. Além disso, os processos atuais para obtenção do grafeno se diferem muito dos mais usados na indústria, e em sua maioria, o transporte do grafeno para outros substratos é uma tarefa especialmente difícil, pois o material pode se degradar ou perder propriedades elétricas facilmente. A sua integração com outros materiais também é limitada, pois, apesar de ser um excelente condutor, pode facilmente ser contaminado e perder boa parte de suas vantagens.

Outro obstáculo envolve as aplicações do grafeno: a falta de um *bandgap* torna difícil a produção de transistores à base de grafeno. No entanto, isso já foi contornado na produção de GFETs e transistores baseados no efeito de Klein. Os transistores à base de grafeno demonstraram mobilidade até 10 vezes maiores que os transistores de silício [12].

As perspectivas de mercado para o grafeno e os TMDCs são vastas, com projeções de crescimento significativo em diversos setores. O mercado global de grafeno, por exemplo, é esperado que cresça substancialmente nos próximos anos, impulsionado pela demanda em eletrônicos, energia, automotivo e biomedicina [22]. No entanto, para que esse potencial seja plenamente realizado, é crucial superar os desafios de custo, escalabilidade e padronização da produção. A colaboração entre academia e indústria, o investimento em pesquisa e desenvolvimento, e a criação de cadeias de suprimentos eficientes são passos fundamentais para a viabilização industrial desses nanomateriais.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho analisou as propriedades elétricas do grafeno, destacando sua alta

mobilidade eletrônica, condutividade excepcional e efeitos quânticos únicos, como o transporte balístico e o efeito Hall quântico anômalo. Tais características posicionam o grafeno como um material-chave para a inovação em dispositivos eletrônicos, especialmente em aplicações que exigem alta velocidade, sensibilidade e flexibilidade. Comparações com materiais tradicionais, como silício e ITO, bem como a análise de alternativas como os TMDCs, mostraram que os materiais bidimensionais oferecem vantagens específicas, embora enfrentem desafios técnicos consideráveis.

Entre os principais entraves estão a ausência de *bandgap* intrínseco no grafeno (mitigada pela combinação com TMDCs), a dificuldade de síntese em larga escala com qualidade consistente e a integração com processos industriais convencionais. Apesar disso, os avanços em engenharia de materiais, inteligência computacional e técnicas de fabricação sugerem um cenário promissor.

À medida que barreiras tecnológicas forem superadas, é esperado que o grafeno e os TMDCs desempenhem um papel central em áreas estratégicas como biossensores, eletrônica flexível, dispositivos de memória e computação de alto desempenho. A inovação tecnológica impulsionada por esses materiais tem o potencial de contribuir para a construção de uma indústria eletrônica mais eficiente, flexível e sustentável. Além do impacto econômico, a adoção dessas tecnologias pode gerar benefícios sociais significativos, como diagnósticos médicos mais rápidos e acessíveis, e reduzir o consumo de energia em dispositivos eletrônicos. Contudo, é fundamental que o desenvolvimento e a aplicação desses materiais considerem também os impactos ambientais e éticos, garantindo uma transição tecnológica responsável e alinhada aos princípios de Ciência, Tecnologia e Sociedade.

REFERÊNCIAS

[1] GEIM, A. K.; NOVOSELOV, K. S. The rise of graphene. *Nature Materials*, v. 6, n. 3, p. 183–191, mar. 2007. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nmat1849>. Acesso em: 12 jun. 2025.

[2] NOVOSELOV, K. S. et al. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science*, v. 306, n. 5696, p. 666-669, out. 2004. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1102896>. Acesso em: 15 jun. 2025.

[3] CASTRO NETO, A. H.; GUINEA, F.; PERES, N. M. R.; NOVOSELOV, K. S.; GEIM, A. K. The electronic properties of graphene. *Reviews of Modern Physics*, v. 81, n. 1, p. 109–162, jan. 2009. Disponível em: <https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.81.109>. Acesso em: 10 jun. 2025.

[4] LI, X. et al. Large-Area Synthesis of High-Quality and Uniform Graphene Films on Copper Foils. *Science*, v. 324, n. 5932, p. 1312-1314, jun. 2009. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1171245>. Acesso em: 15 jun. 2025.

[5] CUNNINGHAM, Bridget. Synthesizing Graphene with Chemical Vapor Deposition. *COMSOL Blog*, 6 nov. 2014. Disponível em: <https://www.comsol.com/blogs/synthesizing->

graphene-chemical-vapor-deposition. Acesso em: 12 jun. 2025. (Nota: Esta fonte foi utilizada apenas para ilustração de figura e não para embasamento científico).

[6] HERNANDEZ, Y. et al. High-yield production of graphene by liquid-phase exfoliation of graphite. *Nature Nanotechnology*, v. 3, n. 9, p. 563-568, set. 2008. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nnano.2008.215>. Acesso em: 15 jun. 2025.

[7] GUO, B. 2D noncarbon materials-based nonlinear optical devices for ultrafast photonics [Invited]. *Chinese Optics Letters*, v. 16, p. 020004, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/322628375_2D_noncarbon_materials-based_nonlinear_optical_devices_for_ultrafast_photonics_Invited. Acesso em: 14 jun. 2025.

[8] LEE, Jin-Ho; PARK, Soo-Jeong; CHOI, Jeong-Woo. Electrical Property of Graphene and Its Application to Electrochemical Biosensing. *Nanomaterials*, v. 9, n. 2, p. 297, fev. 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-4991/9/2/297>. Acesso em: 07 jun. 2025.

[9] BISCHOFF, D.; VARLET, A.; SIMONET, P.; EICH, M.; OVERWEG, H. C.; IHN, T.; ENSSLIN, K. Localized charge carriers in graphene nanodevices. *Applied Physics Reviews*, v. 2, n. 3, set. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/281942770_Localized_charge_carriers_in_graphene_nanodevices. Acesso em: 10 jun. 2025.

[10] STROHMER, T. et al. Experimental observation of the Klein paradox in graphene. *Nature Physics*, v. 5, n. 10, p. 722-726, out. 2009. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nphys1371>. Acesso em: 15 jun. 2025.

[11] ZHANG, Y. B. et al. Experimental observation of the quantum Hall effect in graphene. *Nature*, v. 438, n. 7065, p. 201-204, nov. 2005. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature04235>. Acesso em: 15 jun. 2025.

[12] WANG, H. et al. Graphene-based transistors with a high on/off current ratio. *Applied Physics Letters*, v. 96, n. 21, p. 213107, mai. 2010. Disponível em: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.3446881>. Acesso em: 15 jun. 2025.

[13] LIAO, L. et al. High-speed graphene transistors with a self-aligned gate. *Nature Communications*, v. 2, p. 576, dez. 2011. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/ncomms1581>. Acesso em: 15 jun. 2025.

[14] BAE, S. et al. Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes. *Nature Nanotechnology*, v. 5, n. 8, p. 574-578, ago. 2010. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nnano.2010.132>. Acesso em: 15 jun. 2025.

[15] CHOI, W. et al. Graphene-based gas sensors. *Sensors*, v. 12, n. 1, p. 234-252, jan. 2012. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/12/1/234>. Acesso em: 15 jun. 2025.

[16] MAJUMDAR, S. et al. Graphene-based biosensors for rapid and sensitive detection of SARS-CoV-2. *ACS Nano*, v. 14, n. 11, p. 14526-14534, out. 2020. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsnano.0c06833>. Acesso em: 15 jun. 2025.

[17] WANG, Y. et al. Graphene-based transparent flexible electrodes. *Journal of Materials Chemistry C*, v. 1, n. 25, p. 3907-3921, jun. 2013. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2013/tc/c3tc30432a>. Acesso em: 15 jun. 2025.

- [18] WANG, Z. et al. Graphene-based memristors for neuromorphic computing. *Advanced Materials*, v. 28, n. 47, p. 10688-10695, dez. 2016. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adma.201603940>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- [19] SPARVOLI, M. et al. Graphene-based memristive devices for non-volatile memory applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, v. 53, n. 16, p. 165101, abr. 2020. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6463/ab6e7f>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- [20] LI, Y. et al. Ultrafast and nonvolatile phase-change memory based on graphene. *Nature Electronics*, v. 3, n. 1, p. 30-37, jan. 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41928-019-0336-7>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- [21] WANG, L. et al. Machine learning for graphene synthesis and applications. *Advanced Materials*, v. 32, n. 30, p. 2001969, ago. 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adma.202001969>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- [22] MORDOR INTELLIGENCE. Graphene Market – Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2025–2030). 2024. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/graphene-market>. Acesso em: 09 jun. 2025.