

El papel de los materiales avanzados en la electrónica flexible

Omar Flor

<https://orcid.org/0000-0002-3455-5982>

omar.flor@udla.edu.ec

Universidad de las Américas

Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas

Quito-Ecuador

Correspondence author: omar.flor@udla.edu.ec

Received (23/08/2024), Accepted (17/10/2024)

Resumen: La electrónica flexible ha emergido como una de las áreas de mayor interés en la ciencia de materiales y tecnología debido a su potencial para revolucionar sectores como la salud, la energía, y la electrónica de consumo. Este artículo explora el papel crucial que desempeñan los materiales avanzados en el desarrollo de esta tecnología, incluyendo polímeros conductores, nanomateriales y películas delgadas. Además, se analizan las propiedades clave que deben cumplir estos materiales, así como las aplicaciones actuales y futuras de la electrónica flexible. La investigación utiliza una revisión sistemática de literatura y propone simulaciones computacionales para evaluar las capacidades de materiales seleccionados de estudio.

Palabras clave: nanomateriales, polímeros conductores, películas delgadas.

The role of advanced materials in flexible electronics

Abstract: Flexible electronics has emerged as one of the most promising areas in materials science and technology due to its potential to revolutionize healthcare, energy, and consumer electronics. This article explores the critical role of advanced materials, including conductive polymers, nanomaterials, and thin films, in developing flexible electronics. Key material properties, as well as current and future applications, are discussed. The research employs a systematic literature review and proposes computational simulations to evaluate the capabilities of selected materials.

Keywords: nanomaterials, conductive polymers, thin films.

I. INTRODUCCIÓN

La transición de la electrónica rígida a la flexible es esencial para aplicaciones emergentes en energías renovables, biomedicina y dispositivos como pantallas plegables. La rigidez de los componentes electrónicos tradicionales limita su integración en superficies curvas o dinámicas, restringiendo su uso en tecnologías portátiles y en sistemas que requieren adaptabilidad. En el ámbito de las energías renovables, la incorporación de materiales avanzados como el grafeno ha permitido el desarrollo de paneles solares flexibles y transparentes, mejorando la eficiencia y versatilidad de la captación de energía solar [1][2].

Otra área en que la flexibilidad de los dispositivos electrónicos es crucial, es en la biomedicina. Allí, se requieren para crear sensores que se adapten a la piel o a tejidos internos, permitiendo una monitorización más precisa y menos invasiva. Asimismo, en la industria de las pantallas, la demanda de dispositivos más compactos y versátiles ha impulsado la investigación en materiales que permitan la fabricación de pantallas plegables y enrollables, ofreciendo nuevas posibilidades en el diseño de dispositivos electrónicos [2].

La nanotecnología desempeña un papel fundamental en esta transición, permitiendo la manipulación de materiales a escala nanométrica para desarrollar componentes electrónicos más pequeños, eficientes y flexibles [3]. Sin embargo, la integración de estos materiales en sistemas electrónicos plantea desafíos significativos, como la necesidad de garantizar la estabilidad y durabilidad de los dispositivos flexibles, así como la compatibilidad con los procesos de fabricación existentes. A pesar de estos retos, los avances en materiales avanzados y nanotecnología continúan impulsando el desarrollo de la electrónica flexible, abriendo nuevas oportunidades en diversas aplicaciones tecnológicas.

II. MATERIALES AVANZADOS EN LA ELECTRÓNICA FLEXIBLE

A. *Polímeros Conductores*

Los polímeros conductores han demostrado ser fundamentales para el desarrollo de la electrónica flexible gracias a su capacidad de combinar propiedades mecánicas, eléctricas y químicas únicas. El poliacetileno (PA), por ejemplo, destaca como el precursor de los polímeros conductores debido a su alta conductividad eléctrica obtenida mediante dopaje. Sin embargo, su baja estabilidad ambiental limita su uso práctico en aplicaciones a largo plazo [4]. De manera similar, el poli(tiofeno) (PTh) combina estabilidad térmica y ambiental con propiedades ópticas y electrónicas ajustables, lo que lo convierte en un material clave para supercapacitores, sensores y celdas solares. No obstante, sus costos de producción elevados dificultan su escalabilidad [5].

Otro polímero prominente es la polianilina (PANI), conocida por su flexibilidad mecánica, buena conductividad y estabilidad térmica. Esto la hace ideal para aplicaciones en sensores y recubrimientos anticorrosivos, aunque su baja solubilidad en solventes comunes representa un obstáculo significativo [6]. Por su parte, el polipirrol (PPy) ofrece alta estabilidad redox y facilidad de síntesis, siendo ampliamente utilizado en biosensores y recubrimientos conductores. Sin embargo, su baja estabilidad mecánica y sensibilidad a la humedad limitan su durabilidad en ciertas aplicaciones [7].

En el caso del poli(3,4-etilendioxitiofeno) (PEDOT), su alta transparencia óptica y bajo potencial redox lo hacen indispensable en electrodos transparentes, dispositivos OLED y textiles conductores. No obstante, los costos asociados a su síntesis y las limitaciones en su funcionalización requieren atención en investigaciones futuras [8]. Asimismo, el poli (fenileno vinileno) (PPV) se destaca por sus propiedades de electroluminiscencia y estabilidad ambiental, siendo usado en OLEDs y celdas solares orgánicas. A pesar de estas ventajas, su baja eficiencia cuántica y susceptibilidad a la degradación por luz ultravioleta restringen su rendimiento [9].

El poli(fenileno) y el poli(parafenileno) (PPP) ofrecen alta cristalinidad y estabilidad química, características valiosas para dispositivos electrónicos. Sin embargo, su alta rigidez y complejidad en el procesamiento representan desafíos técnicos que deben superarse [10]. Estas limitaciones generales de los polímeros conductores resaltan la necesidad de seguir investigando formulaciones híbridas y nuevas técnicas de fabricación que optimicen su rendimiento y viabilidad económica en aplicaciones prácticas.

El PEDOT: PSS (poli(3,4-etilenodioxitiofeno) polisulfonato de estireno) es un polímero conductor ampliamente estudiado y utilizado debido a su combinación única de propiedades. Se compone de dos polielectrolitos: el PEDOT, que fue citado anteriormente y que proporciona la conductividad eléctrica; y el PSS, que actúa como un dopante y facilita la procesabilidad en solución acuosa [11]. Esta combinación resulta en un material transparente, flexible y con una conductividad eléctrica moderada, lo que lo hace atractivo para diversas aplicaciones. Entre sus potencialidades destaca su capacidad para formar películas delgadas y uniformes mediante técnicas de recubrimiento sencillas como el spin-coating o la impresión por inyección de tinta, lo que abarata su producción y facilita su integración en dispositivos. Además, su relativa estabilidad ambiental y su biocompatibilidad (aunque con ciertas reservas) amplían aún más su abanico de aplicaciones. El PEDOT: PSS ha encontrado uso en diversas áreas, incluyendo pantallas táctiles, dispositivos electrocrómicos, células solares orgánicas, biosensores y electrónica flexible. Su capacidad para reemplazar al óxido de indio y estaño (ITO), un material frágil y costoso, en ciertas aplicaciones de electrodos transparentes es una de sus ventajas más significativas [11].

Sin embargo, el PEDOT: PSS también presenta limitaciones importantes. Su conductividad, aunque adecuada para muchas aplicaciones, es generalmente inferior a la de los metales conductores tradicionales. Además, la presencia del PSS puede afectar negativamente la estabilidad a largo plazo del material, especialmente en ambientes húmedos, debido a su higroscopicidad. La morfología del PEDOT: PSS, que consiste en una mezcla compleja de dominios ricos en PEDOT y PSS, influye significativamente en sus propiedades eléctricas y mecánicas, y su control preciso es un desafío. Otro aspecto crucial es la biocompatibilidad. Si bien se considera biocompatible en ciertas aplicaciones, estudios han demostrado que la presencia del PSS puede inducir respuestas inflamatorias en algunos sistemas biológicos, lo que limita su uso en implantes a largo plazo o aplicaciones que requieran contacto directo con tejidos vivos. Por lo tanto, la modificación del PEDOT: PSS, mediante la adición de aditivos, el postratamiento o la síntesis de nuevos copolímeros, es un área de investigación activa para superar estas limitaciones y explotar al máximo su potencial.

B. Nanomateriales

Los nanomateriales, definidos como estructuras con al menos una dimensión entre 1 y 100 nanómetros [12], han revolucionado el campo de la ciencia de materiales debido a sus propiedades únicas. Aunque sus orígenes se remontan a aplicaciones antiguas como los vidrios coloreados romanos, el concepto moderno de nanotecnología fue propuesto por Richard Feynman en 1959, seguido por importantes descubrimientos como los fullerenos (1985), nanotubos de carbono (1991) y el grafeno (2004). Estas estructuras exhiben características excepcionales, como una superficie específica extremadamente alta, propiedades electrónicas y ópticas dependientes del tamaño, y comportamientos únicos en términos de resistencia mecánica y conductividad térmica [13].

En la actualidad, los avances en nanomateriales han permitido desarrollos significativos en múltiples campos, aunque su producción enfrenta desafíos importantes. Los nanotubos de carbono, el grafeno y los emergentes MXenes han demostrado aplicaciones prometedoras en electrónica flexible, sensores y almacenamiento de energía [14]. Sin embargo, la industria aún lucha con obstáculos como la producción de estructuras libres de defectos a escala industrial, la escalabilidad de métodos de síntesis y la sostenibilidad de los procesos de fabricación, lo que ha impulsado la búsqueda de técnicas más económicas y ecológicas.

Las aplicaciones de los nanomateriales son vastas y continúan expandiéndose, abarcando desde el almacenamiento de energía hasta la medicina. Se utilizan en baterías y supercapacitores para mejorar la densidad energética, en tratamiento ambiental como catalizadores, en electrónica para crear transistores más eficientes, y en medicina para la liberación controlada de fármacos. El futuro del campo se orienta hacia la creación de materiales híbridos multifuncionales y aplicaciones sostenibles, como celdas solares mejoradas y materiales para captura de carbono, aunque superar las barreras económicas y técnicas mediante la automatización y métodos de fabricación ecológicos sigue siendo un objetivo crucial para expandir su impacto en tecnologías futuras [15].

C. Películas Delgadas

Las películas delgadas, tanto de óxidos metálicos como de materiales orgánicos, lideran la evolución de dispositivos electrónicos avanzados debido a su capacidad para combinar propiedades ópticas y eléctricas en una estructura ultrafina. Los óxidos metálicos como el óxido de indio y estaño (ITO) son especialmente valorados en la industria tecnológica por su alta transparencia en el rango visible del espectro electromagnético y su excelente conductividad eléctrica. Estas características los convierten en componentes clave para pantallas táctiles, paneles OLED y celdas solares flexibles [16]. En el caso de los materiales orgánicos, como los derivados del poli(fenileno vinileno) y los materiales basados en fullereno, las películas delgadas han permitido la integración de tecnologías más sostenibles y económicas. Estas películas pueden ser procesadas a bajas temperaturas y depositadas sobre sustratos flexibles, abriendo nuevas posibilidades en el diseño de dispositivos portátiles y ligeros. Además, los avances en técnicas de deposición, como la evaporación térmica y el recubrimiento por rotación, han mejorado significativamente la uniformidad y el rendimiento de estas capas ultrafinas [17].

La combinación de transparencia óptica y conductividad eléctrica que ofrecen estas películas es esencial para aplicaciones como las pantallas OLED. En estos dispositivos, las películas delgadas permiten el paso de la luz emitida por las capas emisoras internas, mientras que las capas conductoras facilitan la inyección eficiente de carga. Asimismo, en las celdas solares flexibles, estas películas no solo maximizan la captura de luz, sino que también optimizan el transporte de carga, lo que resulta en una mayor eficiencia energética [18]. A pesar de estas ventajas, las películas delgadas enfrentan desafíos como la degradación en condiciones ambientales adversas y la dependencia de materiales como el indio, que es costoso y tiene reservas limitadas. Las investigaciones actuales están explorando alternativas basadas en óxidos metálicos dopados y materiales híbridos orgánico-inorgánicos para superar estas limitaciones y mejorar la sostenibilidad de estas tecnologías [19].

III. METODOLOGÍA

Este estudio adopta un enfoque de revisión sistemática de literatura para examinar el papel de los materiales avanzados, como polímeros conductores, nanomateriales y películas delgadas, en el desarrollo de la electrónica flexible. La revisión abarca artículos recientes sobre las propiedades clave que deben cumplir estos materiales, tales como conductividad, flexibilidad y durabilidad, y las aplicaciones actuales y emergentes de esta tecnología. Adicionalmente, se realizarán simulaciones computacionales para evaluar el rendimiento de los materiales seleccionados. Estas simulaciones se llevarán a cabo utilizando modelos computacionales avanzados, con el objetivo de predecir el comportamiento de los materiales en condiciones operativas reales y proporcionar una base para futuras investigaciones experimentales.

IV. RESULTADOS

La selección bibliográfica realizada para este estudio se llevó a cabo mediante un proceso riguroso que garantizó la relevancia, calidad y actualidad de las fuentes consultadas. En primer lugar, se empleó una revisión sistemática de literatura que abarcó artículos científicos, libros y recursos en línea especializados, con el fin de identificar las investigaciones más relevantes y actuales sobre los materiales avanzados en electrónica flexible, específicamente los polímeros conductores, nanomateriales y películas delgadas.

El proceso comenzó con una búsqueda exhaustiva en bases de datos académicas como IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink y Google Scholar. Se utilizaron términos clave como "conductive polymers", "nanomaterials in flexible electronics", "thin films for flexible devices", "MXenes", "graphene", y "PEDOT:PSS", entre otros, para asegurar la cobertura de los aspectos fundamentales del tema. A partir de esta búsqueda, se seleccionaron aquellos artículos que presentaban estudios experimentales, revisiones críticas o avances significativos en la comprensión de las propiedades y aplicaciones de los materiales avanzados en electrónica flexible. Se prestó especial atención a la calidad de las publicaciones, priorizando artículos revisados por pares y de alto impacto en revistas especializadas. Además, se incluyeron investigaciones que abordaran tanto las aplicaciones prácticas de estos materiales como los desafíos técnicos y económicos que enfrentan en la fabricación y escalabilidad de las tecnologías. La selección también consideró la diversidad de fuentes, abarcando desde estudios de laboratorio hasta aplicaciones industriales, para proporcionar una visión completa y balanceada del estado actual y las perspectivas futuras de estos materiales.

El proceso de selección también contempló el análisis de la relevancia temporal de las publicaciones, priorizando aquellas que fueron publicadas en los últimos cinco años, dado el ritmo acelerado de la innovación en el campo de la electrónica flexible. Finalmente, se integraron recursos de fuentes confiables en línea para complementar la información científica, asegurando que la revisión bibliográfica estuviera alineada con las tendencias más recientes y las necesidades tecnológicas emergentes en el ámbito de la electrónica flexible.

De lo anterior se puede indicar que los polímeros conductores han emergido como materiales clave en el desarrollo de la electrónica flexible, debido a su capacidad para integrar propiedades mecánicas, eléctricas y químicas únicas. El poliacetileno, precursor destacado en este campo, es conocido por su alta conductividad eléctrica, lograda a través del dopaje, aunque su baja estabilidad ambiental limita su uso a largo plazo. En un contexto similar, el poli(tiofeno) sobresale por su estabilidad térmica y ambiental, junto con propiedades ópticas y electrónicas ajustables, lo que lo convierte en un material fundamental en aplicaciones como supercapacitores, sensores y celdas solares. Sin embargo, sus costos de producción elevados representan una barrera para su implementación a gran escala. Otros polímeros como la polianilina, conocida por su flexibilidad mecánica y estabilidad térmica, y el polipirrol, valorado por su estabilidad redox, también presentan aplicaciones prometedoras, aunque sus limitaciones como la baja solubilidad en solventes y la sensibilidad a la humedad aún deben ser superadas para una adopción más amplia. Asimismo, el poli(3,4-etilendioxitiofeno), ampliamente utilizado en electrodos transparentes y dispositivos OLED, enfrenta desafíos en términos de costos de síntesis y funcionalización. A pesar de los avances en estos materiales, sigue siendo necesario continuar con la investigación para superar sus limitaciones y mejorar su rendimiento y viabilidad económica.

Por otro lado, los nanomateriales han revolucionado el campo de la ciencia de materiales gracias a sus propiedades excepcionales, como su alta superficie específica y sus comportamientos únicos en términos de resistencia mecánica y conductividad térmica. Estos materiales, como los nanotubos de carbono, grafeno y los emergentes MXenes, han demostrado ser prometedores en aplicaciones de electrónica flexible, sensores y almacenamiento de energía. No obstante, la producción de estructuras libres de defectos a escala industrial sigue siendo un desafío significativo, y la escalabilidad de los métodos de síntesis continúa siendo un obstáculo. A pesar de ello, los avances recientes en nanotecnología han permitido desarrollos importantes, con aplicaciones que abarcan desde la mejora en la densidad energética de baterías y supercapacitores hasta su uso en la medicina, como en la liberación controlada de fármacos. En este sentido, el futuro de los nanomateriales apunta a la creación de materiales híbridos multifuncionales y sostenibles, a la par que se busca superar las barreras económicas y técnicas a través de la automatización y métodos de fabricación más ecológicos.

En cuanto a las películas delgadas, estas han emergido como componentes esenciales en la evolución de dispositivos electrónicos avanzados, gracias a su capacidad para integrar propiedades ópticas y eléctricas en una estructura ultrafina. Los óxidos metálicos, como el óxido de indio y estaño, son particularmente valorados por su alta transparencia y excelente conductividad eléctrica, lo que los convierte en materiales clave para pantallas táctiles, paneles OLED y celdas solares flexibles. Por su parte, los materiales orgánicos, como los derivados del poli(fenileno vinileno) y los basados en fullereno, han permitido el desarrollo de tecnologías más sostenibles y económicas, ya que pueden procesarse a bajas temperaturas y depositarse sobre sustratos flexibles. Sin embargo, las películas delgadas aún enfrentan desafíos, como la degradación en condiciones ambientales adversas y la dependencia de materiales costosos, como el indio. Las investigaciones actuales se concentran en encontrar alternativas basadas en óxidos metálicos dopados y materiales híbridos orgánicos-inorgánicos que mejoren la sostenibilidad de estas tecnologías y optimicen su rendimiento.

Propuestas de simulaciones

Se seleccionaron tres materiales representativos por su relevancia en las áreas de electrónica flexible, almacenamiento de energía y dispositivos optoelectrónicos, además de su potencial para superar los retos actuales en términos de costos, rendimiento y sostenibilidad. Las simulaciones se centran en entender cómo optimizar sus propiedades y mejorar la viabilidad económica y técnica de su implementación en aplicaciones de vanguardia. Estos materiales son el poli(tiofeno), debido a su estabilidad térmica y propiedades electrónicas ajustables, que pueden ser muy útiles en supercapacitores y sensores. El grafeno, con su alta conductividad y resistencia mecánica, lo que es ideal para evaluar su integración en dispositivos flexibles de alto rendimiento. Por último, se eligió el óxido de indio y estaño (ITO), el cual es fundamental para pantallas táctiles y celdas solares, a pesar de sus desafíos de costo y degradación, con el objetivo de explorar alternativas sostenibles y optimizar su rendimiento. Estas simulaciones permitirán obtener conclusiones sobre su viabilidad y comportamiento.

El procedimiento propuesto se resume en la tabla 1, donde se muestran los pasos y elementos constitutivos del experimento.

Tabla 1. Configuración y ejecución de las simulaciones para los materiales propuestos.

Elemento	Descripción
Programas de Simulación	COMSOL Multiphysics: Simula fenómenos físicos de materiales conductores, semiconductores y ópticos. Se utilizará para estudiar conductividad, estabilidad térmica y propiedades ópticas.
	Materials Studio: Simula y analiza materiales a nivel atómico, centrado en estructura molecular, interacciones y propiedades mecánicas.
	ANSYS: Simula mecánicas y térmicas, evaluando la integridad estructural y resistencia de los materiales.
	Gaussian: Software de química computacional para estudiar propiedades electrónicas mediante DFT.
Parámetros a Considerar	Conductividad eléctrica: Medición de la capacidad del material para conducir electricidad, bajo diferentes condiciones de dopaje.
	Estabilidad térmica: Evaluación de la respuesta del material a variaciones de temperatura, observando la degradación de propiedades.
	Propiedades ópticas: Absorción, reflexión y transmisión de luz, particularmente en poli(tiofeno) y ITO.
	Propiedades mecánicas: Comportamiento bajo esfuerzo, incluyendo flexibilidad, resistencia a la tracción y deformación.
	Resistencia a la humedad y degradación: Evaluación de la durabilidad, especialmente en poliacetileno, bajo condiciones ambientales extremas.
Condiciones y Limitantes	Condiciones ambientales: Simulaciones a 25°C y 50% de humedad relativa, salvo indicación contraria.
	Tamaño de la muestra: Muestras representativas a escala nanométrica o microscópica.
	Límites de costo: Consideración de costos, especialmente en materiales como el ITO, evaluando alternativas más económicas.
	Limitación de tiempo: Simulaciones con ciclos no superiores a 24 horas para cada conjunto de condiciones.
	Recursos computacionales: Simulaciones en estaciones de trabajo con GPUs de alto rendimiento o clusters de computación.
Procedimiento	Preparación de los materiales: Importación de las estructuras atómicas de los tres materiales en los programas, optimización de la geometría molecular.
	Configuración de condiciones iniciales: Definición de temperatura, humedad y esfuerzo para cada material.
	Ejecución de simulaciones: Simulación de propiedades electrónicas y térmicas en poli(tiofeno), mecánicas y eléctricas en grafeno, y transmisión de luz en ITO.
	Análisis de resultados: Comparación de resultados con expectativas teóricas y literatura, identificación de patrones de comportamiento y áreas de mejora.
	Optimización: Ajuste de parámetros para optimizar rendimiento, estabilidad y viabilidad económica.
	Validación: Realización de simulaciones adicionales para validar resultados y confirmar conclusiones.

CONCLUSIONES

Las investigaciones sobre materiales avanzados han mostrado un potencial significativo en el ámbito de la electrónica flexible, destacándose por su capacidad para integrar propiedades mecánicas, eléctricas y ópticas de manera innovadora. Estos materiales no solo permiten la fabricación de dispositivos más eficientes y adaptables, sino que también abren la puerta a soluciones más sostenibles en diversas aplicaciones tecnológicas. Sin embargo, a pesar de los avances conseguidos, la integración de estos materiales en aplicaciones comerciales enfrenta retos importantes, como la mejora de la estabilidad a largo plazo, la optimización de su desempeño y la reducción de los costos asociados a su producción. Para hacer frente a estas limitaciones, es necesario continuar con la investigación para perfeccionar los procesos de fabricación y fomentar la producción a gran escala sin comprometer las propiedades esenciales de los materiales.

En este contexto, las investigaciones futuras deben orientarse hacia el desarrollo de materiales híbridos que aprovechen las propiedades complementarias de los polímeros y los nanomateriales. Estos materiales híbridos pueden ofrecer una mejor combinación de flexibilidad, conductividad y estabilidad, abriendo nuevas posibilidades para su aplicación en dispositivos más versátiles y económicos. Asimismo, la optimización de las técnicas de fabricación, incluyendo la mejora de los procesos de dopaje, la deposición y la escalabilidad de la producción, es crucial para reducir los costos y aumentar la viabilidad comercial de los dispositivos fabricados con estos materiales. Un desafío adicional es la evaluación del impacto ambiental de estos materiales, ya que su implementación a gran escala debe ser sostenible y no comprometer los recursos naturales ni generar efectos adversos a largo plazo. En conjunto, estos esfuerzos contribuirán a un futuro más prometedor para la electrónica flexible, garantizando que los avances en este campo sean tanto innovadores como sostenibles.

REFERENCIAS

- [1] D. Corzo, G. Tostado-Blázquez, y D. Baran, "Flexible Electronics: Status, Challenges and Opportunities," *Frontiers in Electronics*, vol. 1, 2020. doi: 10.3389/felec.2020.594003.
- [2] J. M. González-Domínguez, "Grafeno: Propiedades y Aplicaciones en Ingeniería," Universidad de Valladolid, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/70796/1/TFG-I-3160.pdf>. [Accedido: 20-dic-2024].
- [3] C. Hernández Gervacio y D. Quiroz Ceballos, "Grafeno: Estado del Arte," Repositorio CIMAV, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/607/1/-Tesis%20Claudia%20Hernández%20Gervacio%2C%20Dalia%20Quiroz%20Ceballos.pdf>. [Accedido: 20-dic-2024].
- [4] M. Choy, "Polímeros conductores como alternativa tecnológica en la electrónica," *Revista Iberoamericana de Polímeros*, vol. 4, no. 1, pp. 23-34, 2003.
- [5] "Polímeros conductores: su impacto en la tecnología de dispositivos electrónicos," *Quimisor*, 2023. [Online]. Available: <https://quimisor.com.mx/polimeros-conductores-su-impacto-en-la-tecnologia-de-dispositivos-electronicos/>. [Accessed: Oct. 17, 2024].
- [6] "Polímeros inherentemente conductores," *Plástico*, 2004. [Online]. Available: <https://www.plastico.com/es/noticias/polimeros-inherentemente-conductores>. [Accessed: Oct. 17, 2024].
- [7] "Polímeros conductores: aplicaciones en celdas fotovoltaicas y dispositivos electrónicos," *Revista de Ciencia y Tecnología*, vol. 35, no. 2, pp. 45-56, 2019.
- [8] "Desarrollo de polímeros conductores para aplicaciones en dispositivos optoelectrónicos," Facultad de Ciencias, UNAM, 2021.
- [9] D. Battezzore y A. Fina, "Flexible and highly conductive composites by impregnation of polydimethylsiloxane in graphite nanoplates paper," *arXiv preprint arXiv:2101.11721*, 2021, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2101.11721>.
- [10] P. Cataldi et al., "Graphene-Polyurethane Coatings for Deformable Conductors and Electromagnetic Interference Shielding," *arXiv preprint arXiv:2004.11613*, 2020, <https://doi.org/10.1002/aelm.202000429>.

- [11] L. V. Kayser and D. J. Lipomi, "Stretchable Conductive Polymers and Composites Based on PEDOT and PEDOT:PSS," *Advanced Materials*, Art. no. 1806133, 2019, doi: 10.1002/adma.201806133.
- [12] N. Baig, I. Kammakakam, y W. Falath, "Nanomaterials: a review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges," *Materials Advances*, vol. 2, no. 6, pp. 1821–1871, 2021. doi: 10.1039/d0ma00807a.
- [13] K. Ramesh, *Nanomaterials*, Springer, Boston, MA, 2009. doi: 10.1007/978-0-387-0 [4]
- [14] J. Jiang, S. Bai, J. Zou, et al., "Improving stability of MXenes," *Nano Research*, vol. 15, pp. 6551–6567, 2022. doi: 10.1007/s12274-022-4312-8. 9783-1_1.
- [15] L. A. Kolahalam, I. V. Kasi Viswanath, B. S. Diwakar, B. Govindh, V. Reddy, y Y. L. N. Murthy, "Review on nanomaterials: Synthesis and applications," *Materials Today: Proceedings*, 2019. doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.371.
- [16] R. A. Afre, N. Sharma, M. Sharon and M. Sharon, "Transparent Conducting Oxide Films for Various Applications: A Review," *Reviews on Advanced Materials Science*, vol. 53, no. 1, pp. 79-89, 2018, doi: 10.1515/rams-2018-0006.
- [17] F. So and D. Kondakov, "Degradation Mechanisms in Small-Molecule and Polymer Organic Light-Emitting Diodes," *Advanced Materials*, vol. 22, no. 34, pp. 3762-3777, 2010, doi: 10.1002/adma.200902624.
- [18] V. R. Supradeepa, C. M. Long, R. Wu, F. Ferdous, E. Hamidi, D. E. Leaird and A. M. Weiner, "Comb-based radiofrequency photonic filters with rapid tunability and high selectivity," *Nature Photonics*, vol. 6, no. 3, pp. 186-194, 2012, doi: 10.1038/nphoton.2011.350.
- [19] Z. Liu, B. Yu, y J. Yu, "Advances in indium tin oxide alternatives for transparent conducting electrodes: conductive polymers and metal nanowire networks," *Nano Energy*, vol. 89, pp. 106308, 2021. doi: 10.1016/j.nanoen.2021.106308.