

## Propiedades termofísicas en materiales compuestos basados en polímeros y nanopartículas conductoras

### Thermophysical Properties of Polymer-Based Composite Materials Incorporating Conductive Nanoparticles

L. M. Ramírez Franco <sup>a</sup>, L. P. Martínez Castillo <sup>b</sup>, D. A. Cabrera Munguía <sup>b</sup>, L. F. Cano Salazar <sup>b</sup>, J. F. Lara Sánchez <sup>b</sup>, V. J. Cruz Delgado <sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Ing. J. Cárdenas Valdez S/N, República, 25280 Saltillo, Coahuila, México.

<sup>b</sup> Centro de Investigación en Química Aplicada, Blvd. Enrique Reyna Hermosillo 140, San José de los Cerritos, 25294 Saltillo, Coahuila, México.

#### Resumen

Los compuestos poliméricos reforzados con nanopartículas conductoras surgen como una estrategia prometedora para superar la baja conductividad térmica de estos materiales, típicamente en el rango de  $0.1$  a  $0.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . En este contexto, la incorporación de nanopartículas como grafeno, nanoplacas, nanotubos de carbono, partículas metálicas y cerámicas permite mejorar propiedades termofísicas como la conductividad y difusividad térmica, la capacidad calorífica y la estabilidad térmica. Se analizan los mecanismos de transporte de calor, incluyendo la formación de redes conductoras, la resistencia térmica interfacial y el umbral de percolación. Asimismo, se evalúa la influencia de métodos de síntesis como la polimerización in situ, el mezclado en solución y en fundido sobre la dispersión de las nanopartículas y las interacciones interfaciales. Finalmente, se abordan retos como la aglomeración, la escalabilidad y los costos, así como perspectivas futuras orientadas al desarrollo de materiales multifuncionales con aplicaciones en gestión térmica. Este trabajo presenta una revisión actualizada de las innovaciones más recientes en este campo.

**Palabras clave:** Materiales compuestos, nanopartículas conductoras, conductividad térmica, nanocompuestos poliméricos, gestión térmica.

#### Abstract

Polymer composites reinforced with conductive nanoparticles have emerged as a promising strategy to overcome the inherently low thermal conductivity of these materials, which typically ranges from  $0.1$  to  $0.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . In this context, the incorporation of nanofillers such as graphene, nanoplatelets, carbon nanotubes, metallic particles, and ceramic particles has demonstrated significant potential for enhancing thermophysical properties, including thermal conductivity, thermal diffusivity, heat capacity, and thermal stability. Heat transport mechanisms are analyzed, including the formation of conductive networks, interfacial thermal resistance, and percolation threshold phenomena. Furthermore, the influence of synthesis methods, such as in situ polymerization, solution blending, and melt mixing, on nanoparticle dispersion and interfacial interactions is critically evaluated. Finally, current challenges, including nanoparticle agglomeration, scalability, and production costs, are discussed, together with future perspectives focused on the development of multifunctional materials for thermal management applications. This work provides an updated overview of the most recent innovations in this field.

**Keywords:** Composites, conductive nanoparticles, thermal conductivity, polymer nanocomposites, thermal management.

#### 1. Introducción

El desarrollo de materiales compuestos basados en matrices poliméricas ha cobrado un interés creciente en las últimas décadas debido a la necesidad de superar las limitaciones intrínsecas de los polímeros convencionales, particularmente su baja conductividad térmica, limitada estabilidad estructural bajo condiciones exigentes y restringida funcionalidad en aplicaciones avanzadas (Khdary et al., 2023). La incorporación de nanomateriales como aditivos funcionales ha emergido como una estrategia altamente efectiva para diseñar sistemas multifuncionales con propiedades mejoradas, manteniendo ventajas clave como la baja densidad,

facilidad de procesamiento y costos relativamente accesibles (Kausar, 2020).

Entre los distintos tipos de nanomateriales empleados, las nanopartículas basadas en carbono han recibido especial atención debido a sus excepcionales propiedades térmicas, eléctricas y mecánicas. Materiales como el grafeno, las nanoplacas de grafeno y los nanotubos de carbono presentan altas conductividades térmicas intrínsecas y elevadas relaciones área-volumen, lo que favorece la formación de redes conductoras dentro de la matriz polimérica y mejora significativamente la transferencia de calor y carga (Liu et al., 2025). De manera complementaria, las nanopartículas metálicas, incluyendo plata,

\*Autor para la correspondencia: victor.cruz@ciqa.edu.mx

**Correo electrónico:** ramirez-luis@uadec.edu.mx (Luis Manuel Ramírez Franco), luz.castillo@uadec.edu.mx (Luz Paola Martínez Castillo), dcabrera@uadec.edu.mx (Denis Aidee Cabrera Munguía), lucia.cano@uadec.edu.mx (Lucía Fabiola Cano Salazar), jesus.lara@ciqa.edu.mx (Jesús Francisco Lara Sánchez), victor.cruz@ciqa.edu.mx (Victor Javier Cruz Delgado)

cobre y sistemas bimetálicos, aportan propiedades adicionales como conductividad eléctrica, actividad catalítica y comportamiento antimicrobiano, ampliando el espectro de aplicaciones de los nanocompuestos poliméricos (Atik et al., 2025). Por su parte, las nanopartículas cerámicas, como el nitruro de boro o el carburo de silicio, se distinguen por su alta estabilidad térmica, conductividad térmica y carácter dieléctrico, lo que las convierte en candidatos ideales para aplicaciones donde se requiere disipación eficiente de calor sin comprometer el aislamiento eléctrico (Hanif et al., 2024).

La combinación de estos nanomateriales dentro de matrices poliméricas no solo permite mejorar propiedades individuales, sino que también posibilita la generación de efectos sinérgicos en sistemas híbridos, en los que la interacción entre distintas fases conduce a un desempeño superior respecto a los sistemas monocomponente (Mishra et al., 2025). Factores como la dispersión homogénea de las nanopartículas, la interacción interfacial matriz-refuerzo y el control de la microestructura continúan representando desafíos críticos para la optimización de las propiedades finales del material (Wang et al., 2020).

Este trabajo se enfoca en presentar las innovaciones más recientes en el campo de los compuestos poliméricos reforzados con nanopartículas conductoras, abordando tanto los avances en el diseño de materiales como en las estrategias de síntesis, así como su impacto en las propiedades termofísicas y su potencial en aplicaciones tecnológicas avanzadas. Se busca ofrecer una visión actualizada y crítica del estado del arte, identificando tendencias emergentes y oportunidades de desarrollo en este campo de investigación (Musa et al., 2025).

## 2. Materiales compuestos basados en polímeros

Los polímeros son macromoléculas de alto peso molecular formadas por unidades repetitivas denominadas monómeros, ampliamente utilizadas en la industria debido a su versatilidad, bajo costo y facilidad de procesamiento. Dependiendo de su estructura, pueden clasificarse en lineales, ramificados o reticulados, mientras que en función de su comportamiento térmico se dividen en termoplásticos, termoestables y elastómeros. Desde el punto de vista estructural, pueden presentar regiones amorfas o semicristalinas, lo cual influye directamente en sus propiedades mecánicas y térmicas (Antunes & Arencón, 2026).

Los materiales compuestos poliméricos (MCP) surgen como una estrategia para mejorar el desempeño de los polímeros convencionales. Estos materiales están constituidos por la combinación de dos o más fases distintas, donde al menos una corresponde a una matriz polimérica, y las demás actúan como refuerzos o fases dispersas. La interacción entre estas fases permite generar propiedades sinérgicas que superan a las de los componentes individuales, tales como mayor resistencia mecánica, mejor comportamiento térmico, reducción de peso y mayor resistencia a condiciones ambientales adversas (Abad, 2021).

En comparación con otros tipos de compuestos, como los de matriz metálica o cerámica, los MCP destacan por su baja densidad, facilidad de manufactura a temperaturas relativamente bajas y costos de producción reducidos, lo que los convierte en materiales altamente atractivos para aplicaciones industriales a gran escala (Kangishwar et al., 2023). Sin embargo, los polímeros tradicionales presentan limitaciones importantes, como su baja conductividad térmica (generalmente en el rango de 0.1 a 0.5

$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), así como una limitada resistencia térmica y mecánica en condiciones exigentes (Lee et al., 2024). Estas restricciones están asociadas principalmente a su estructura molecular desordenada, las débiles interacciones intermoleculares y los mecanismos de dispersión de fonones que dificultan la transferencia eficiente de calor (Sam et al., 2026).

Debido a estas limitaciones, existe una necesidad creciente de mejorar las propiedades termofísicas de los polímeros, particularmente su capacidad de conducción térmica. En los materiales poliméricos, el transporte de calor ocurre principalmente a través de vibraciones de la red molecular, siendo altamente sensible al grado de orden estructural. En sistemas amorfos, la disposición desordenada de las cadenas genera trayectorias tortuosas para la propagación de energía, lo que reduce significativamente la eficiencia de transferencia térmica (Li et al., 2025). En contraste, estructuras más ordenadas favorecen una mejor conducción, aunque aún inferior a la observada en materiales metálicos, donde los electrones libres contribuyen de manera significativa al transporte de calor (Palenski, 2024).

Para superar estas limitaciones, se han desarrollado diversas estrategias, entre las que sobresale la incorporación de rellenos conductores dentro de la matriz polimérica. Estos rellenos pueden ser de naturaleza cerámica, metálica o carbonosa, y su función principal es formar redes tridimensionales que faciliten la transferencia de energía térmica a través del material. En particular, materiales como el grafeno, los nanotubos de carbono, los óxidos metálicos y los carburos han demostrado ser altamente efectivos para mejorar la conductividad térmica y otras propiedades funcionales de los compuestos (Huang et al., 2020). Además, técnicas como la alineación de cadenas poliméricas y la modificación estructural también han contribuido a optimizar las rutas de conducción térmica dentro del material (Tan & Zhang, 2024).

La relevancia de estos avances radica en la creciente demanda de materiales con alto desempeño térmico en aplicaciones tecnológicas. Sectores como la electrónica, la industria automotriz, aeroespacial, energética y biomédica requieren materiales capaces de disipar calor de manera eficiente para garantizar el correcto funcionamiento y la durabilidad de los dispositivos. En particular, los sistemas electrónicos modernos, caracterizados por una alta densidad de potencia, demandan materiales con excelente gestión térmica para evitar fallas por sobrecalentamiento (Dhumal et al., 2023). De igual manera, en aplicaciones como almacenamiento de energía, encapsulados electrónicos y dispositivos portátiles, los MCP con alta conductividad térmica representan una solución clave para mejorar la eficiencia y confiabilidad de los sistemas (Zhou et al., 2024).

### 2.1. Nanomateriales basados en carbono

Los nanomateriales basados en carbono constituyen una de las clases más relevantes de rellenos conductores debido a sus propiedades intrínsecas excepcionales, derivadas de su estructura atómica y de su dimensionalidad. Estos materiales pueden clasificarse de acuerdo con sus dimensiones estructurales en sistemas de dimensión cero (0D), unidimensionales (1D) y bidimensionales (2D), clasificación que resulta útil para comprender su estructura y su influencia en las propiedades de los compuestos poliméricos.

Los fullerenos corresponden a estructuras de dimensión cero (0D). Descubiertos en 1985 durante experimentos de vaporización de grafito, están compuestos por 60 átomos de carbono organizados en una configuración esférica similar a un balón de fútbol (Kroto et al., 1985; Kono et al., 2024). Aunque su aplicación como refuerzo en matrices poliméricas es limitada, su descubrimiento marcó un hito en el desarrollo de la nanotecnología del carbono.

Los nanotubos de carbono son nanoestructuras unidimensionales (1D) formadas por el enrollamiento de láminas de grafeno en estructuras cilíndricas. Dependiendo del número de capas, se clasifican en nanotubos de pared simple, doble o múltiple (Bilisik & Akter, 2022). Su incorporación en matrices poliméricas permite mejorar significativamente las propiedades mecánicas, así como la estabilidad térmica, eléctrica y química de los compuestos (Díaz Varela et al., 2024). Además, su elevada relación de aspecto favorece la formación de redes conductoras interconectadas que facilitan el transporte de carga y calor dentro del material. La funcionalización superficial de los nanotubos de carbono y el control de su dispersión en la matriz polimérica son factores clave para optimizar su desempeño. Una adecuada distribución de estas nanopartículas permite generar canales conductores eficientes, incrementando significativamente la conductividad eléctrica y la capacidad de absorción de radiación electromagnética (Parveen, 2024; Yilmaz Atay & Bilgiç, 2024).

El grafeno es un alótropo bidimensional (2D) constituido por una sola capa de átomos de carbono dispuestos en una red hexagonal. Desde su aislamiento experimental en 2004 mediante exfoliación mecánica (Syduzzaman et al., 2024), ha despertado un gran interés debido a su elevada conductividad térmica y eléctrica, así como a su alta resistencia mecánica. Además, el grafeno constituye la unidad estructural básica de otros materiales carbonosos, como el grafito, los nanotubos de carbono y los fullerenos.

Las nanoplaquetas de grafeno, derivadas del apilamiento de múltiples capas de grafeno, representan una variante multicapa con mayor viabilidad desde el punto de vista tecnológico e industrial. Estas conservan propiedades como la elevada conductividad térmica y eléctrica, al tiempo que ofrecen un menor costo de producción y una mayor facilidad de procesamiento, lo que las convierte en una alternativa atractiva para el desarrollo de compuestos poliméricos funcionales.

## 2.2. Nanopartículas metálicas

La incorporación de nanopartículas metálicas en matrices poliméricas da lugar a nanocompuestos polímero-metal que han cobrado gran relevancia debido a la combinación de propiedades estructurales y funcionales. Estos materiales integran la ligereza y flexibilidad de los polímeros con propiedades térmicas, eléctricas, magnéticas y catalíticas propias de los metales (Teo et al., 2025). Entre los metales más utilizados se encuentran la plata, el cobre y el aluminio, así como sistemas bimetalicos que presentan efectos sinérgicos. En particular, las nanopartículas metálicas han sido ampliamente empleadas como catalizadores, contribuyendo al desarrollo de procesos más eficientes y sostenibles en el marco de la química verde, al permitir condiciones de reacción más suaves y reducir la generación de subproductos (Larrañaga-Tapia et al., 2024).

La plata destaca como uno de los mejores conductores eléctricos, lo que la convierte en un material clave en aplicaciones electrónicas. Además, presenta propiedades antimicrobianas que han sido aprovechadas en aplicaciones médicas, textiles y

ambientales, incluyendo la purificación de agua y la eliminación de microorganismos como *E. coli* y *S. aureus* (Kobashigawa et al., 2023; Harun-Ur-Rashid et al., 2025; Lu et al., 2025). No obstante, su uso plantea desafíos relacionados con la biocompatibilidad, la citotoxicidad y la estabilidad a largo plazo.

El cobre, por su parte, es un material altamente atractivo debido a su elevada conductividad térmica y eléctrica, así como a su bajo costo. Además, presenta propiedades bactericidas asociadas a la generación de especies reactivas de oxígeno y a la interacción directa con membranas celulares (Schio et al., 2024). En los últimos años, nanopartículas y óxidos de cobre han mostrado un gran potencial en aplicaciones relacionadas con la mejora de propiedades termo físicas en compuestos poliméricos (Acevedo-León et al., 2023; Megahed et al., 2024).

Las nanopartículas bimetalicas representan una estrategia avanzada para optimizar el desempeño de estos materiales, ya que la interacción entre diferentes metales genera modificaciones en la estructura electrónica y en la distribución de carga, lo que se traduce en una mayor actividad catalítica y estabilidad (Lin et al., 2025; Maity et al., 2024). Estos efectos se asocian a fenómenos de transferencia electrónica y formación de aleaciones a nivel nanométrico.

Adicionalmente, algunos sistemas basados en óxidos metálicos, como el óxido de aluminio, han sido efectivos para mejorar la conductividad térmica en matrices poliméricas, especialmente cuando se optimiza la interacción interfacial mediante tratamientos superficiales (Girish et al., 2025). Asimismo, materiales como el hidróxido de aluminio contribuyen a mejorar propiedades mecánicas y retardo a la llama debido a su descomposición endotérmica (Gobena & Woldeyannes, 2024).

## 2.3. Nanopartículas cerámicas y aleaciones

Las nanopartículas cerámicas han sido estudiadas como refuerzos en compuestos poliméricos debido a su elevada resistencia mecánica, estabilidad química, conductividad térmica y capacidad de aislamiento eléctrico. Estas propiedades las hacen atractivas para aplicaciones en electrónica flexible, industria aeroespacial, dispositivos biomédicos y sistemas de gestión térmica.

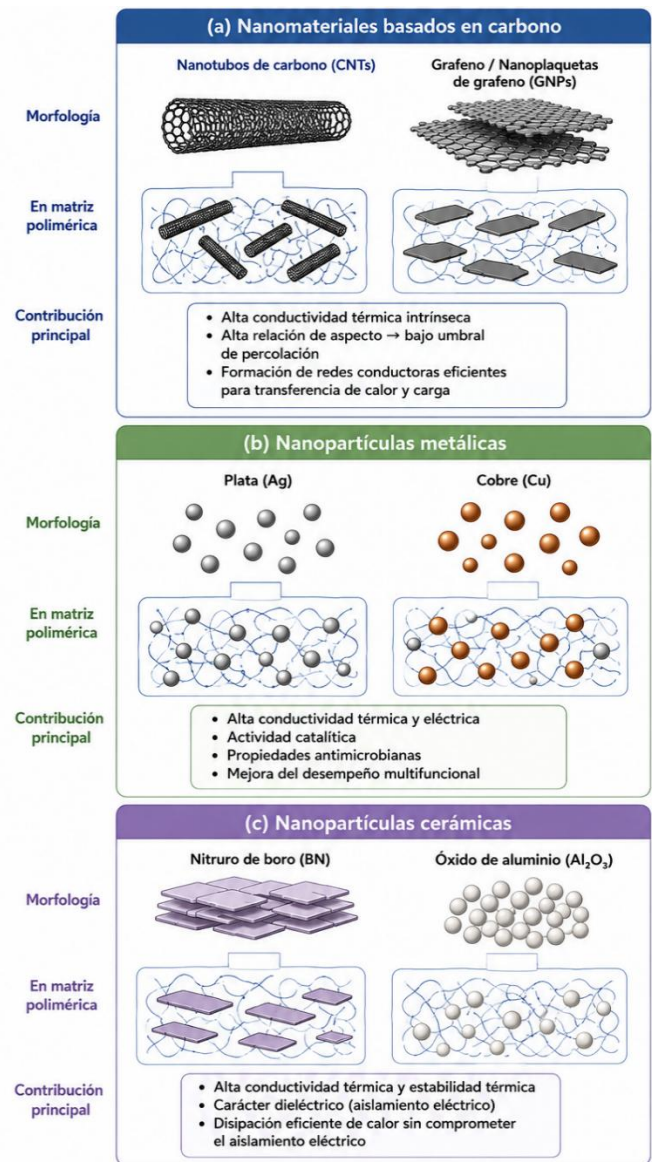
No obstante, la combinación de dureza cerámica y flexibilidad polimérica representa un desafío significativo, ya que la introducción de fases orgánicas puede reducir la resistencia mecánica si no se controla adecuadamente la dispersión y la interacción interfacial. Por ello, es esencial lograr una adecuada fracción volumétrica y una hibridación a escala nanométrica que permita una red estructural homogénea y altamente reticulada (Zhang et al., 2024).

El procesamiento de estos materiales juega un papel crucial en sus propiedades finales. Técnicas como el mezclado en fundido permiten la dispersión de nanopartículas bajo fuerzas de cizallamiento, favoreciendo la formación de rutas de conducción térmica dentro del material. No obstante, la orientación y distribución de las partículas dependen en gran medida de las condiciones de procesamiento (Ahmed Althumairi et al., 2025). Entre los materiales cerámicos que presentan un desempeño sobresaliente se encuentra el nitrato de boro, conocido como "grafeno blanco", el cual presenta una estructura similar al grafeno, pero con enlaces B-N de carácter parcialmente iónico. Esta característica le confiere propiedades dieléctricas y una alta estabilidad térmica, además de un comportamiento particular frente a campos electromagnéticos (Kushwah et al., 2026).

Otros rellenos cerámicos, como el carburo de silicio, el nitrato de aluminio y el óxido de aluminio, han sido utilizados para mejorar la conductividad térmica en compuestos poliméricos. No obstante, alcanzar altas conductividades térmicas requiere generalmente elevadas cargas de relleno, lo que puede incrementar la resistencia térmica interfacial y afectar negativamente la procesabilidad y las propiedades mecánicas del material (Yan et al., 2024).

Finalmente, los sistemas híbridos que combinan diferentes tipos de nanopartículas, incluyendo cerámicas y metálicas (cermets) permiten integrar propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas en un solo sistema, lo que resulta particularmente relevante en sectores avanzados como la electrónica, la industria aeroespacial y los dispositivos biomédicos (Madrid et al., 2024; Peterson et al., 2024). En la Figura 1 se ilustran distintos tipos de nanopartículas utilizadas en matrices poliméricas, representando su morfología, su dispersión dentro de la matriz y su contribución a las propiedades termo físicas.

A pesar de los avances significativos en el desarrollo y caracterización de nanopartículas conductoras, el desempeño final de los compuestos poliméricos no depende únicamente de las propiedades intrínsecas de las nanopartículas, sino también de la forma en que estos son incorporados y distribuidos dentro de la matriz polimérica. Factores como la dispersión, la interacción interfacial, la orientación de las partículas y la formación de redes conductoras juegan un papel determinante en la eficiencia de transferencia de calor y carga en el material. Por ello, los métodos de preparación de los compuestos poliméricos adquieren una relevancia crítica, ya que influyen directamente en la microestructura del sistema y, en consecuencia, en sus propiedades termo físicas y funcionales. En particular, la selección adecuada de la técnica de procesamiento permite optimizar la compatibilidad entre fases, minimizar la aglomeración de nanopartículas y favorecer la formación de rutas continuas de conducción. A continuación, se describen los principales métodos de preparación de compuestos poliméricos reportados en la literatura, incluyendo la polimerización *in situ*, el mezclado en solución, el mezclado en fundido y diversas técnicas emergentes.



**Figura 1.** Nanopartículas conductoras utilizadas en compuestos poliméricos y su contribución a las propiedades termofísicas (elaboración propia).

### 3. Métodos de preparación de compuestos poliméricos

Como se mencionó previamente, los polímeros son macromoléculas formadas por unidades repetitivas denominadas monómeros, los cuales se enlazan mediante reacciones de polimerización. Dependiendo de la naturaleza y número de grupos funcionales presentes, es posible obtener estructuras lineales, ramificadas o entrecruzadas, lo que influye directamente en las propiedades finales del material. Cuando un polímero está constituido por un solo tipo de monómero se denomina homopolímero, mientras que la combinación de dos o más monómeros da lugar a copolímeros.

La conductividad térmica de los compuestos poliméricos depende de factores como la naturaleza del nanorrelleno, su concentración, la dispersión y el método de procesamiento. La Tabla 1 resume algunos de los sistemas más representativos reportados en la literatura reciente.

| Nano-<br>relleno                                                      | Matriz                  | Procesa-<br>miento                           | Conteni-<br>do de<br>relleno | K<br>(W/m·<br>K) | Referencia                |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------|------------------------------|------------------|---------------------------|
| Grafeno /<br>Ti <sub>3</sub> C <sub>2</sub> T <sub>x</sub><br>(MXene) | PE                      | Mezclado en<br>fundido                       | ≈3 wt%                       | <b>9.26</b>      | (Tan et al.,<br>2022)     |
| Grafeno<br>funcionaliz-<br>ado con<br>polidopami-<br>na               | PP                      | Extrusión                                    | —                            | <b>10.93</b>     | (Wang et al.,<br>2020)    |
| Grafito<br>expandido<br>(GE) /<br>grafeno<br>multicapa<br>(GMC)       | TPU                     | Mezclado en<br>fundido                       | 20 wt%<br>GE / 10<br>wt% GMC | <b>8.52</b>      | (C. Liu et<br>al., 2021)  |
| Grafeno                                                               | Epoxi<br>bio-<br>basado | Dispersión<br>mecánica                       | 5 wt%                        | <b>1.18</b>      | (Zhi et al.,<br>2024)     |
| rGO / h-BN                                                            | PP                      | Extrusión                                    | 20 wt%                       | ≈ <b>1.0</b>     | (Muratov et<br>al., 2024) |
| GNP (red<br>segregada)                                                | PP                      | Compresión                                   | 10 wt%                       | ≈ <b>1.5</b>     | (Jang et al.,<br>2024a)   |
| GNP                                                                   | PP                      | Modelo<br>validado<br>experimenta-<br>lmente | 5 wt%                        | ≈ <b>0.75</b>    | (Ahmadi et<br>al., 2021)  |
| Grafeno                                                               | Epoxi                   | Diversos<br>métodos                          | 5–15 wt%                     | <b>2–12</b>      | (Lv et al.,<br>2022)      |

Tabla 1. Conductividad térmica máxima reportada para compuestos poliméricos reforzados con nanorrellenos conductores obtenidos mediante procesos convencionales.

Uno de los principales desafíos radica en lograr una dispersión homogénea de las nanopartículas dentro de la matriz, así como una adecuada interacción interfacial entre ambas fases. Estos factores son determinantes para maximizar las propiedades termofísicas, mecánicas y eléctricas del material. Por ello, se han desarrollado diversas metodologías de procesamiento que permiten controlar la microestructura del sistema y optimizar su desempeño.

3.1. Polimerización in situ

La polimerización *in situ* es una de las estrategias más utilizadas para la obtención de compuestos poliméricos con nanopartículas, ya que permite que las cadenas poliméricas se formen directamente en presencia de las nanopartículas. En este método, los nanomateriales se dispersan en un monómero, pre-polímero o solvente adecuado, seguido de la reacción de polimerización, lo que favorece el crecimiento de las cadenas alrededor de las nanopartículas (Paszkievicz et al., 2024).

En algunos casos, particularmente con nanomateriales funcionalizados como el grafeno, la superficie puede actuar como sitio reactivo, permitiendo la formación de enlaces covalentes mediante mecanismos como la polimerización radicalica (Chen et al., 2020). Esto conduce a una interacción interfacial más fuerte y estable. Una variante relevante de esta técnica es la polimerización activada por radiación UV, la cual presenta ventajas como la reducción de emisiones nocivas, mínima pérdida de masa durante

el curado y la posibilidad de fabricar estructuras complejas con alta precisión. Por ejemplo, la incorporación de 0.125% en peso de grafeno funcionalizado mediante esta técnica ha permitido incrementos de hasta 65% en la tenacidad a la fractura y 115% en la energía de fractura en resinas epoxi (Otobil et al., 2025).

Entre las principales ventajas de la polimerización *in situ* se encuentran la excelente dispersión de las nanopartículas y la fuerte interacción interfacial, lo que se traduce en mejoras significativas en el desempeño del material. Además, esta técnica es versátil y permite el diseño de estructuras complejas y funcionales (Kelarakis, 2024). Ejemplo de ello es el caso de compuestos de poliamida-12 con fullerenos C60, donde se han reportado incrementos del 30% al 40% en el módulo de Young y la resistencia a la tracción (Laad et al., 2025).

3.2. Mezclado en solución

En el mezclado en solución, el polímero se disuelve en un solvente adecuado y la nanopartícula se dispersa medio líquido o co-solvente, lo que facilita la interacción entre ambas soluciones. Posteriormente, ambas soluciones se mezclan y someten a agitación mecánica o ultrasónica para lograr una distribución homogénea (Lazaridou et al., 2025).

Una vez obtenida una mezcla uniforme, ésta se deposita sobre un sustrato y el solvente se evapora, dando lugar a una película sólida con las nanopartículas embebidas en la matriz (Rahman et al., 2025). Debido a las fuertes interacciones intermoleculares presentes en los nanomateriales, es común recurrir a procesos de funcionalización superficial para mejorar su compatibilidad y evitar la aglomeración.

La incorporación de nanovarillas de óxido de zinc en matrices de hidroxipropilmetilcelulosa y polivinilpirrolidona ha permitido mejorar la flexibilidad, resistencia mecánica, estabilidad y conductividad eléctrica de los materiales (Alanazi & AlZaidy, 2024).

3.3. Mezclado en fundido

El mezclado en fundido es una de las técnicas más utilizadas a nivel industrial para la producción de compuestos poliméricos, debido a su escalabilidad y facilidad de implementación. Este método aprovecha el comportamiento termoplástico de los polímeros, los cuales se ablandan al calentarse y se solidifican al enfriarse (Albdiry, 2024).

El proceso consiste en fundir el polímero hasta obtener un estado de líquido viscoso, seguido de la incorporación de las nanopartículas. Mediante la aplicación de fuerzas de cizallamiento intensas, se logra la dispersión y distribución de las nanopartículas, utilizando equipos como extrusores de doble husillo. Una de sus mayores ventajas es la ausencia de solventes, lo que reduce el impacto ambiental y los riesgos asociados a toxicidad, así como su viabilidad para la producción a gran escala.

Se han reportado la dispersión uniforme de nanotubos de carbono de pared múltiple funcionalizados y grafito en matrices de poliamida-6 mediante procesamiento a 250 °C durante 10 minutos. Asimismo, el uso de cizallamiento en estado sólido ha permitido exfoliar partículas de grafito en nanoplaquetas de aproximadamente 10 nm en matrices de polipropileno (Lim et al., 2021).

### 3.4. Técnicas emergentes

Además de los métodos convencionales, en los últimos años han surgido técnicas emergentes con enfoques como la funcionalización avanzada de nanopartículas, el procesamiento asistido por campos externos (eléctricos, magnéticos o térmicos), la impresión 3D y métodos híbridos que combinan diferentes rutas de síntesis.

Estas estrategias buscan superar las limitaciones de los métodos tradicionales, particularmente en términos de control de la microestructura y formación de redes conductoras eficientes. La integración de estas técnicas permite el diseño de materiales multifuncionales con propiedades optimizadas para aplicaciones específicas, especialmente en áreas como la electrónica flexible, la gestión térmica y los dispositivos autónomos.

Si bien los métodos de preparación determinan en gran medida la microestructura, la dispersión y la interacción interfacial en los compuestos poliméricos, el impacto final de estos factores se refleja directamente en sus propiedades termofísicas. En particular, la eficiencia en la transferencia de calor y carga dentro del material depende no solo de la naturaleza de las nanopartículas conductoras, sino también de la formación de redes percolantes, del contacto interfacial y la continuidad de las rutas de transporte generadas durante el procesamiento. La comprensión de las propiedades termofísicas resulta esencial para establecer relaciones claras entre estructura, procesamiento y desempeño funcional.

A continuación, se analizan las principales propiedades termofísicas de los compuestos poliméricos reforzados con nanopartículas conductoras, incluyendo la conductividad térmica, difusividad térmica, capacidad calorífica, coeficiente de expansión térmica, estabilidad térmica y comportamiento eléctrico, enfatizando los factores que controlan su optimización.

### 4. Propiedades termofísicas en compuestos poliméricos con nanopartículas conductoras

El estudio de las propiedades termofísicas en compuestos poliméricos reforzados con nanopartículas conductoras es fundamental para comprender los mecanismos que gobiernan la transferencia de energía en estos sistemas híbridos (Tamjid et al., 2024). A nivel microscópico, la temperatura puede entenderse como una medida del grado de agitación molecular, ya que las cadenas poliméricas se encuentran en constante movimiento vibracional, rotacional y traslacional, incrementándose su energía cinética conforme aumenta la temperatura (Yelishala et al., 2024). La transferencia de calor en polímeros está estrechamente relacionada con la dinámica de estas vibraciones moleculares y su capacidad para propagarse a través del material (Khdier et al., 2024).

#### 4.1. Conductividad Térmica

La transferencia de calor en materiales puede describirse a través de tres mecanismos fundamentales: conducción, convección y radiación. En el caso de los polímeros sólidos, la conducción es el mecanismo predominante y ocurre principalmente mediante vibraciones de la red molecular (fonones), mientras que la contribución de electrones libres es generalmente limitada (Breitkopf, 2024; Simões-Moreira, 2025).

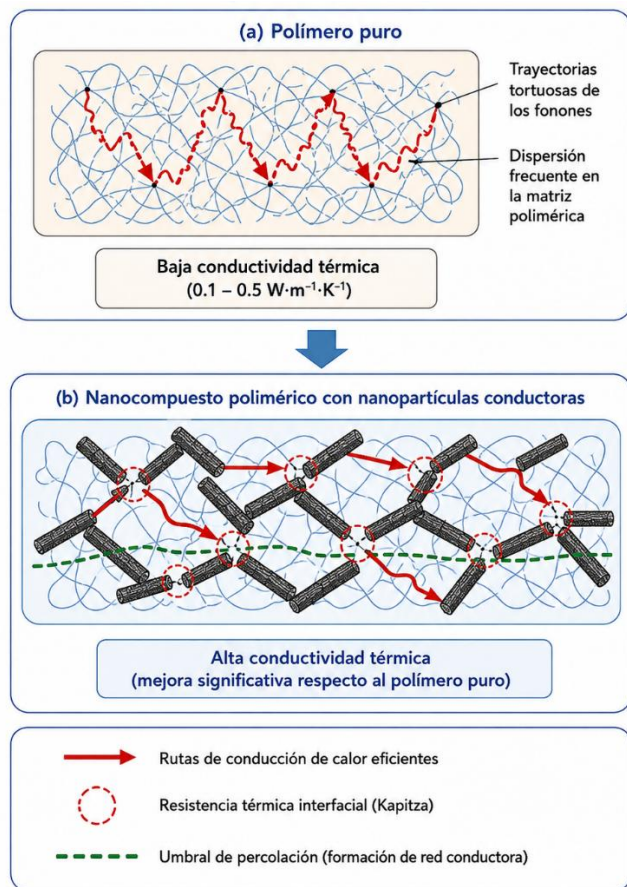
La baja conductividad térmica característica de los polímeros se atribuye a su estructura molecular desordenada, en la cual las cadenas presentan configuraciones amorfas o semicristalinas con defectos, interfaces y límites de fase que dispersan los fonones, reduciendo significativamente la eficiencia del transporte de calor (Meng et al., 2024). En sistemas más ordenados, como polímeros altamente cristalinos, el empaquetamiento de las cadenas puede mejorar la rigidez estructural y ciertas propiedades dieléctricas (Mogbojuri et al., 2025).

Debido a estas limitaciones, la estrategia más efectiva para mejorar la conductividad térmica consiste en la incorporación de nanopartículas conductoras dentro de la matriz polimérica. En estos sistemas, la región interfacial entre el polímero y la nanopartícula juega un papel crucial, ya que en ella se modifican las propiedades locales debido a la interacción entre ambas fases. Dado el tamaño nanométrico de los rellenos, la fracción volumétrica de interfaz es considerable, lo que influye directamente en el desempeño del material (Richter et al., 2024).

A diferencia de las propiedades mecánicas, que pueden mejorar incluso con bajas concentraciones de aditivos, la conductividad térmica depende fuertemente de la formación de redes internas continuas dentro del material. Estas redes permiten el transporte eficiente de fonones y, en algunos casos, de electrones, generando rutas preferenciales de conducción térmica.

Este fenómeno está estrechamente relacionado con el denominado umbral de percolación, el cual corresponde a la concentración crítica de nanopartículas a partir de la cual se establece una red interconectada dentro de la matriz (Xu et al., 2025). En particular, los nanomateriales con geometría tubular o laminar presentan umbrales de percolación más bajos debido a su elevada relación de aspecto, lo que facilita la conectividad entre partículas.

La orientación y distribución de las nanopartículas pueden reducir significativamente este umbral. Por ejemplo, la alineación de nanotubos de carbono en matrices de copolímeros autoensamblables permite concentrarlos en dominios específicos, favoreciendo la formación de redes conductoras eficientes con menores cantidades de material (Topcu et al., 2023). En la Figura 2 se compara el transporte de calor en un polímero puro y en un nanocompuesto polimérico con nanopartículas conductoras, mostrando cómo la incorporación de nanopartículas favorece la formación de redes percolantes y rutas eficientes de conducción térmica, a pesar de la presencia de la resistencia interfacial, lo que resulta en un aumento significativo de la conductividad térmica respecto al material base.



**Figura 2.** Mecanismos de transporte térmico en polímeros y nanocompuestos poliméricos (elaboración propia).

#### 4.2. Difusividad térmica

La difusividad térmica describe la velocidad a la cual el calor se propaga a través de un material y está directamente relacionada con la conductividad térmica, la densidad y la capacidad calorífica. En compuestos poliméricos, esta propiedad se ve limitada por la dispersión de fonones causada por defectos estructurales, interfaces y discontinuidades en la matriz.

La incorporación de nanopartículas puede mejorar la difusividad térmica al facilitar la formación de rutas continuas para la propagación de energía. Pese a ello, la presencia de interfaces mal acopladas puede generar resistencias térmicas interfaciales que limitan este efecto.

#### 4.3. Capacidad calorífica

La capacidad calorífica específica ( $C_p$ ) es una propiedad termofísica que indica la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura de una unidad de masa en un grado Celsius. En sistemas poliméricos, esta propiedad está influenciada por la movilidad de las cadenas y las interacciones intermoleculares.

La incorporación de nanopartículas suele restringir el movimiento de las cadenas poliméricas cercanas a la interfaz, lo que puede provocar una disminución en la capacidad calorífica del sistema. Por ejemplo, se ha observado que la adición de nanoplaquetas de grafeno y nanotubos de carbono reduce ligeramente la capacidad de almacenamiento de calor en materiales de cambio de fase, debido a la alteración del empaquetamiento molecular (Islam et al., 2024).

Estudios mediante calorimetría diferencial han demostrado la formación de capas interfaciales inmóviles en nanocompuestos, lo

que limita la capacidad del material para absorber energía térmica (Sakib et al., 2022).

#### 4.4. Coeficiente de expansión térmica

El coeficiente de expansión térmica describe el cambio dimensional de un material en respuesta a variaciones de temperatura. En polímeros, este fenómeno está asociado al incremento de la distancia interatómica debido a la vibración térmica.

Materiales bidimensionales como el grafeno y los nanotubos de carbono pueden presentar coeficientes de expansión térmica negativos, lo que implica una contracción al aumentar la temperatura. Este comportamiento se atribuye a vibraciones fuera del plano y a la rigidez de sus enlaces covalentes (Zhao et al., 2026).

La incorporación de nanopartículas en matrices poliméricas reduce generalmente el coeficiente de expansión térmica, ya que actúan como una fase rígida que restringe la movilidad térmica de las cadenas poliméricas (Khina et al., 2025).

#### 4.5. Estabilidad térmica

La estabilidad térmica de los compuestos poliméricos puede mejorar significativamente mediante la incorporación de nanopartículas. Uno de los mecanismos más relevantes es el denominado efecto de camino tortuoso, el cual dificulta la difusión de productos de degradación y la entrada de oxígeno, retardando los procesos de descomposición térmica (Bajer, 2024).

Adicionalmente, algunos nanomateriales actúan como agentes nucleantes, promoviendo el ordenamiento estructural del polímero y aumentando su cristalinidad, lo que mejora su resistencia térmica. Por ejemplo, la incorporación de óxido de grafeno en poliuretano ha mostrado incrementos significativos en la estabilidad térmica, mientras que materiales bidimensionales como carburo de titanio han elevado la temperatura de descomposición en más de  $70^\circ\text{C}$  (Latif et al., 2023).

No obstante, ciertas nanopartículas pueden inducir efectos catalíticos que aceleran la degradación térmica del polímero. Tal es el caso de nanopartículas de ferrita de cobalto, las cuales promueven la ruptura de enlaces en matrices poliméricas mediante mecanismos interfaciales (Ommeish et al., 2026).

#### 4.6. Modelos teóricos para la predicción de la conductividad térmica

Aunque las propiedades intrínsecas de los nanorrellenos desempeñan un papel determinante en la conductividad térmica de los compuestos poliméricos, el comportamiento térmico final depende de la interacción simultánea de múltiples variables estructurales y de procesamiento. En consecuencia, diversos modelos teóricos han sido desarrollados para describir la transferencia de calor y predecir la conductividad térmica efectiva de estos materiales. Cada modelo presenta ventajas y limitaciones asociadas con las hipótesis empleadas y el tipo de sistema analizado. La Tabla 2 resume las características de los modelos de predicción más utilizados y sus principales campos de aplicación.

| Modelo         | Variables consideradas                                                          | Aplicación principal                                        | Referencias              |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Maxwell–Eucken | Fracción de relleno y conductividad de la matriz y del relleno.                 | Altas concentraciones de partículas y dispersión homogénea. | (Belhaouzi et al., 2025) |
| Agari          | Formación de redes conductoras.                                                 | Altos contenidos de relleno, especialmente grafeno y CNT.   | (Gu & Ruan, 2021)        |
| Lewis–Nielsen  | Geometría del relleno, relación de aspecto y orientación.                       | Partículas anisotrópicas (grafeno, CNT y h-BN).             | (Mumtaz et al., 2024)    |
| Nan            | Resistencia térmica interfacial (Kapitza), geometría y orientación del relleno. | Rellenos de alta relación de aspecto.                       | (J. Tan & Zhang, 2024)   |

Tabla 2. Principales modelos teóricos utilizados para la predicción de la conductividad térmica en compuestos poliméricos.

5. Conductividad eléctrica

El comportamiento eléctrico de los compuestos poliméricos reforzados con nanopartículas conductoras está fuertemente ligado al umbral de percolación. A bajas concentraciones, las partículas conductoras permanecen aisladas dentro de la matriz; en cambio, al alcanzar una concentración crítica, se forman redes interconectadas que permiten el flujo de electrones.

Este cambio no es lineal, sino abrupto, lo que da lugar a un incremento significativo en la conductividad eléctrica del material. Además, incluso en ausencia de contacto físico directo, la conducción puede ocurrir mediante el efecto túnel cuántico cuando la distancia entre partículas es suficientemente pequeña (Saberí et al., 2024).

En aplicaciones específicas, como la gestión térmica en dispositivos electrónicos, se busca maximizar la conductividad térmica manteniendo el aislamiento eléctrico. Sistemas híbridos como nanocompuestos de nitruro de boro y grafeno son altamente efectivos, logrando conductividades térmicas elevadas sin comprometer las propiedades dieléctricas (Hu et al., 2025).

En estos sistemas, factores como la dispersión de las nanopartículas, la interacción interfacial, la fracción de carga, así como la morfología y el tamaño de las nanopartículas, influyen directamente en la formación de rutas de conducción térmica y eléctrica, y en la eficiencia del transporte de energía. La literatura reporta que variaciones en estos parámetros pueden generar cambios significativos en las propiedades del material, incluso en sistemas con composiciones similares, lo que evidencia la necesidad de un análisis más profundo de los factores que gobiernan su comportamiento.

En este sentido, comprender cómo cada uno de estos elementos contribuye al desempeño final, resulta clave para el diseño

racional de materiales con propiedades termofísicas optimizadas. A continuación, se examinan los principales factores que influyen en el comportamiento térmico de los compuestos poliméricos con nanopartículas conductoras.

6. Factores que influyen en las propiedades termofísicas

El rendimiento termofísico de los materiales compuestos basados en polímeros y nanopartículas no es simplemente una suma aritmética de las propiedades de sus constituyentes, sino que emerge de una compleja arquitectura estructural a escala nanométrica (Li et al., 2024). El transporte térmico en polímeros, dominado principalmente por el flujo de fonones, está regulado por la heterogeneidad de las vías de conducción y la morfología del sistema (Buketov et al., 2024). La eficiencia en la transferencia de energía depende críticamente de cómo la microestructura facilita o impide este movimiento vibracional a través de la matriz y los rellenos.

6.1. Dispersión de las nanopartículas en la matriz polimérica

Una dispersión uniforme es el requisito fundamental para optimizar tanto la conductividad térmica como la estabilidad del material. La literatura científica menciona que las nanopartículas conductoras, especialmente las de base carbonosa, tienden a formar aglomerados debido a las intensas fuerzas atractivas de van der Waals (Sánchez-Cepeda et al., 2024). Estos cúmulos actúan como obstáculos que incrementan la resistencia térmica, provocando un transporte de energía ineficiente y propiedades inconsistentes (Yan et al., 2025).

Para mitigar este fenómeno, se emplean métodos de dispersión mecánica como la extrusión de doble husillo con configuraciones de bajo cizallamiento para evitar la ruptura de las fibras (Shchegolkov et al., 2024). Un procesamiento optimizado permite que fracciones de carga muy bajas mejoren significativamente la resistencia térmica y la conductividad del sistema al evitar cuellos de botella energéticos (Zhang et al., 2024).

6.2. Interacción interfacial matriz–nanopartícula

La interfaz representa la región de mayor influencia en los nanocompuestos debido a la elevada área superficial específica de los rellenos. La transferencia de calor se ve limitada por la denominada resistencia térmica interfacial o resistencia de Kapitza, la cual provoca la dispersión de los fonones en los límites de fase (Wang et al., 2023). Una interacción interfacial fuerte es crucial; por ejemplo, el uso de rellenos con alta constante dieléctrica puede resultar en gradientes térmicos bajos gracias a la formación de capas interfaciales que actúan como puentes de energía (Belhaouzi et al., 2023).

Además, se ha observado que cuando existe una buena compatibilidad, el polímero puede formar un "revestimiento" alrededor de la nanopartícula, lo que reduce la diferencia de energía superficial y facilita el transporte vibracional colectivo (Ferrano et al., 2024).

6.3. Fracción de carga y umbral de percolación

La conductividad térmica efectiva aumenta con la concentración del relleno, aunque este incremento no suele ser lineal (Qiu et al., 2021). El sistema debe alcanzar un umbral de percolación, donde las nanopartículas forman una red tridimensional interconectada

que permite el flujo continuo de energía. Los aditivos con alta relación de aspecto, como los nanotubos de carbono o las nanofibras, son especialmente eficaces para establecer este umbral a concentraciones bajas (Barra et al., 2023).

Sin embargo, cargas excesivas pueden saturar el sistema, dificultando el procesamiento y promoviendo la re-aglomeración. En términos de capacidad calorífica, la introducción de nanomateriales altera la entalpía total del compuesto, dependiendo de la densidad y la capacidad térmica intrínseca del aditivo utilizado (Ryabchikov et al., 2024).

#### 6.4. Morfología y tamaño de las nanopartículas

La geometría de los aditivos define las vías de transporte térmico y se clasifica generalmente en dimensiones 0D (esféricas), 1D (nanotubos/fibras), 2D (grafeno/láminas) y 3D (redes híbridas) (Seon Lee et al., 2024). Los materiales 1D y 2D ofrecen ventajas significativas para crear redes conductoras con menor contenido de carga debido a su mayor camino libre medio para los fonones (Hemath et al., 2020).

A nivel molecular, el tamaño del relleno y la longitud de las cadenas poliméricas influyen en la velocidad de las vibraciones dentro del material. Una mayor masa molecular y el alineamiento de las cadenas (ajustado mediante condiciones de estiramiento uni-axial) pueden elevar la conductividad térmica de polímeros como el polietileno en varios órdenes de magnitud (Yelishala et al., 2024).

#### 6.5. Modificación superficial

Para superar la incompatibilidad química entre polímeros y nanopartículas conductoras, la modificación superficial es una estrategia esencial (Srebrenkoska et al., 2023). Técnicas como el tratamiento con plasma de propileno permiten injertar grupos funcionales de manera covalente en la superficie de las nanopartículas, reduciendo la energía interfacial. Esta funcionalización no solo mejora la dispersión, sino que puede aumentar la conductividad térmica hasta en un 535% en matrices de polipropileno (Covarrubias Gordillo et al., 2025).

Otros métodos comunes incluyen el uso de agentes de acoplamiento con silanos o el tratamiento alcalino, los cuales eliminan impurezas superficiales y aumentan la rugosidad, promoviendo una adhesión superior que minimiza la dispersión de fonones en la interfaz (Patel et al., 2023).

El análisis de los factores que influyen en las propiedades termofísicas pone de manifiesto que el desempeño de los compuestos poliméricos reforzados con nanopartículas conductoras puede ser ajustado de manera precisa mediante el control de su microestructura, interacción interfacial y parámetros de procesamiento. Esta capacidad de diseño permite no solo optimizar la transferencia de calor y carga, sino también adaptar las propiedades del material a requerimientos específicos de operación. Por ello, estos sistemas han trascendido el ámbito académico para posicionarse como soluciones clave en diversas aplicaciones tecnológicas donde la gestión térmica eficiente es crítica. En particular, la combinación de alta conductividad térmica, bajo peso y versatilidad estructural ha impulsado su implementación en sectores como la electrónica, el almacenamiento de energía y la industria aeroespacial. A continuación, se presentan las principales aplicaciones de los compuestos poliméricos con alta conductividad térmica,

señalando su relevancia en el desarrollo de dispositivos y sistemas avanzados.

### 7. Aplicaciones de compuestos poliméricos con alta conductividad térmica

La rápida evolución de la electrónica moderna hacia la miniaturización, la alta integración y la multifuncionalidad ha generado una necesidad crítica de sistemas de gestión térmica eficientes. La baja conductividad térmica intrínseca de los polímeros convencionales, que suele oscilar entre  $0.1$  y  $0.5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , requiere la incorporación de rellenos conductores para facilitar la disipación del calor acumulado durante el funcionamiento de los dispositivos (Meng et al., 2024).

En el ámbito de la gestión térmica en dispositivos electrónicos, la proliferación de la tecnología 5G y los circuitos integrados de alta potencia ha exacerbado el problema del sobrecalentamiento local, lo que puede reducir el rendimiento en un 10% por cada incremento de solo  $2^\circ\text{C}$  (Jebelli et al., 2024). Los compuestos poliméricos se utilizan fundamentalmente como materiales de interfaz térmica y difusores de calor, los cuales se colocan entre fuentes de calor, como CPUs o MOSFETs, y disipadores de calor para eliminar las capas de aire atrapadas, cuya baja conductividad térmica ( $0.02 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) actúa como un aislante indeseado (Gong et al., 2025). Por otro lado, los difusores de calor requieren una alta conductividad térmica en el plano para distribuir el calor de puntos calientes a áreas de superficie más grandes, utilizando a menudo rellenos de carbono como grafeno o nanotubos de carbono debido a su alta conductividad térmica.

Los sistemas de almacenamiento de energía representan otra aplicación vital, especialmente mediante el uso de materiales de cambio de fase integrados en matrices poliméricas. Estas tecnologías permiten almacenar y liberar grandes cantidades de energía térmica mediante calor latente durante los procesos de fusión y solidificación, lo cual es esencial para estabilizar la temperatura de baterías de iones de litio en vehículos eléctricos y sistemas de conversión de energía solar (Calborean et al., 2025). Para mejorar la eficiencia de estos sistemas, se diseñan redes tridimensionales de rellenos conductores dentro de la matriz polimérica, lo que acelera la respuesta térmica y previene fugas de material cuando está en fase líquida (Li et al., 2024).

En cuanto a los materiales para aplicaciones aeroespaciales, la industria demanda componentes que ofrezcan ligereza, alta durabilidad y resistencia a la interferencia electromagnética y a la corrosión. Los compuestos poliméricos reforzados con fibras de carbono, boro o aramida se utilizan en estructuras de fuselaje, paneles interiores de cabina y sistemas de protección térmica para vehículos de reentrada espacial y toberas de cohetes (Khan et al., 2026). Además, la adición de nanopartículas metálicas o magnéticas proporciona funciones de blindaje a interferencias electromagnéticas y protección contra impactos de rayos en componentes críticos como radomos y carcasas de electrónica de bus (Xu et al., 2025). Estos materiales avanzados también se aplican en vehículos aéreos no tripulados para maximizar el tiempo de vuelo mediante la reducción del peso estructural (Gebrehiwet et al., 2023).

Finalmente, los disipadores de calor y encapsulados electrónicos se benefician de compuestos que combinan una alta conductividad térmica con excelentes propiedades de aislamiento eléctrico, como los basados en nitruro de boro, alúmina o nitruro de aluminio (Zhang et al., 2020). Estos materiales son esenciales para proteger componentes sensibles y asegurar una transferencia de

calor eficiente hacia el ambiente o sistemas de enfriamiento activos. La fabricación aditiva o impresión 3D ha permitido el desarrollo de geometrías optimizadas y la orientación controlada de los rellenos para maximizar el flujo térmico en direcciones preferenciales, abriendo nuevas posibilidades en el diseño de disipadores complejos y carcasas para dispositivos de comunicación satelital y estaciones base de 5G (Moser et al., 2024). El futuro de estos materiales reside en el diseño racional de la interfaz polímero-relleno y la preconstrucción de microestructuras sofisticadas para minimizar la resistencia térmica de contacto y maximizar el rendimiento global del sistema (Ligati Schleifer & Regev, 2023). En la Figura 3 se presenta un esquema general del desarrollo de nanocompuestos poliméricos, desde los métodos de procesamiento, pasando por la estructura y microestructura resultante, hasta las propiedades termo físicas obtenidas, destacando su impacto en aplicaciones de gestión térmica.



**Figura 3.** Relación entre métodos de procesamiento, estructura, propiedades termo físicas y aplicaciones de los nanocompuestos poliméricos (elaboración propia).

## 8. Retos actuales y perspectivas futuras

La evolución de los nanocompuestos poliméricos enfrenta desafíos críticos que deben resolverse para alcanzar su máximo potencial industrial. Uno de los mayores obstáculos es lograr una dispersión homogénea de nanopartículas, ya que las fuerzas de van der Waals tienden a generar aglomerados que reducen drásticamente las propiedades térmicas y eléctricas del material. Aunque la funcionalización química mejora la compatibilidad interfacial, esta puede sacrificar las propiedades intrínsecas del relleno o complicar los esquemas sintéticos (Mitra et al., 2021).

En cuanto al escalamiento industrial, la transición de técnicas de laboratorio a la producción masiva es sumamente compleja,

dificultando obtener propiedades uniformes en lotes de gran volumen. Para superar esto, se investigan métodos de fabricación avanzados, como la impresión 3D, el moldeo por inyección y procesos de dispersión en línea que permitan una producción rentable y reproducible (Vijaybabu et al., 2023).

El elevado costo de nanomateriales y de los tratamientos superficiales necesarios representa una barrera económica significativa, limitando su aplicación actual a sectores de alto valor como el aeroespacial y la microelectrónica. Por ello, las perspectivas futuras se orientan hacia el desarrollo de procesos de fabricación "verdes" y más simples que reduzcan los gastos operativos y el impacto ambiental (Singh et al., 2026).

Por último, el desarrollo de compuestos multifuncionales es imperativo para superar los límites de los materiales tradicionales, buscando integrar resistencia mecánica, gestión térmica y blindaje electromagnético en un solo sistema. La integración de herramientas de aprendizaje automático para predecir propiedades y el diseño de híbridos sinérgicos guiarán el descubrimiento de materiales de próxima generación para energías renovables y dispositivos inteligentes (Xuan et al., 2026).

## 9. Conclusiones

Se evidencia que los compuestos poliméricos reforzados con nanopartículas conductoras constituyen una alternativa eficaz para superar las limitaciones térmicas de los polímeros convencionales. La incorporación de nanopartículas de naturaleza carbonosa, metálica y cerámica permite mejorar significativamente propiedades como la conductividad y difusividad térmica, así como la estabilidad térmica, principalmente mediante la formación de redes conductoras y la optimización de las interacciones interfaciales.

El desempeño de estos materiales está fuertemente influenciado por factores estructurales y de procesamiento, entre los que destacan la dispersión de las nanopartículas, la compatibilidad interfacial, la fracción de carga y la organización microestructural. En particular, el control del umbral de percolación y la reducción de la resistencia térmica interfacial son determinantes para maximizar la eficiencia en la transferencia de calor.

A pesar de los avances alcanzados, persisten retos importantes asociados a la aglomeración de nanopartículas, la escalabilidad de los métodos de síntesis y los costos de producción. En este contexto, resulta necesario orientar futuras investigaciones hacia el diseño racional de materiales multifuncionales, el desarrollo de procesos más eficientes y sostenibles, así como la implementación de herramientas avanzadas para la predicción de propiedades, con el fin de ampliar su aplicación en sectores tecnológicos de alta demanda.

Finalmente, las perspectivas futuras apuntan hacia el desarrollo de compuestos multifuncionales capaces de integrar elevada conductividad térmica, estabilidad térmica, resistencia mecánica, conductividad eléctrica controlada y blindaje electromagnético en un mismo sistema. El diseño racional de arquitecturas híbridas, la ingeniería de interfaces, la funcionalización selectiva de los nanorrellenos y el empleo de herramientas de modelado computacional, inteligencia artificial y aprendizaje automático para optimizar la composición y el procesamiento representan estrategias con un alto potencial para acelerar el desarrollo de compuestos poliméricos avanzados destinados a la próxima generación de tecnologías de gestión térmica.

## Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por la SECIHTI mediante los proyectos CBF-2025-I-4203 y MADTEC-2025-M-499, así como por la Universidad Autónoma de Coahuila a través del proyecto interno de investigación DIP-UADEC-C01-2025-40.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

## Referencias

- Abad F. P. (2021). *Desarrollo de Materiales Compuestos Mediante la Modificación de Matrices de Polipropileno por Adición de Nanofibras de Carbono y Nanotubos de Carbono para su Utilización en el Sector Textil*. (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- Acevedo-León, D., Ossa-Orozco, C. P., & Torres-López, A. M. (2023). Evaluación de protocolos de síntesis de nanopartículas de cobre u óxidos de cobre. *Ingeniería*, 28(2), e19067. <https://doi.org/10.14483/23448393.19067>
- Ahmed Althumairi, N., Hjiri, M., Aldukhayel, A. M., Jebli, A., & Nassar, K. I. (2025). Recent Advances in Dielectric and Ferroelectric Behavior of Ceramic Nanocomposites: Structure Property Relationships and Processing Strategies. *Nanomaterials*, 15(17), 1329. <https://doi.org/10.3390/nano15171329>
- Alanazi, H. T., & AlZaidy, G. A. (2024). Innovative enhancements in polymer nanocomposites: Integrating ZnO nanorods into Hydroxypropyl methylcellulose/Polyvinyl pyrrolidone blend for advanced energy storage devices. *Ceramics International*, 50(20), 39448–39457. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.07.320>
- Albdiry, M. (2024). Effect of melt blending processing on mechanical properties of polymer nanocomposites: a review. *Polymer Bulletin*, 81(7), 5793–5821. <https://doi.org/10.1007/s00289-023-05012-z>
- Ali, Z., Yaqoob, S., Yu, J., & D'Amore, A. (2024). Critical review on the characterization, preparation, and enhanced mechanical, thermal, and electrical properties of carbon nanotubes and their hybrid filler polymer composites for various applications. *Composites Part C: Open Access* (Vol. 13). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100434>
- Antunes, M., & Arencón, D. (2026). Recent Developments in the Mechanical Behavior of Polymer-Based Composites. *Polymers*, 18(5), 598. <https://doi.org/10.3390/polym18050598>
- Atik, R., Islam, R., Ariza Gonzalez, M., Chinwangso, P., & Lee, T. R. (2025). Recent Advances in Polymer-Coated Metal and Metal Oxide Nanoparticles: From Design to Promising Applications. *Nanomaterials*, 15(22), 1744. <https://doi.org/10.3390/nano15221744>
- Bajer, D. (2024). Eco-Friendly, Biodegradable Starch-Based Packaging Materials with Antioxidant Features. *Polymers*, 16(7), 958. <https://doi.org/10.3390/polym16070958>
- Barra, G., Guadagno, L., Raimondo, M., Santonicola, M. G., Toto, E., & Vecchio Cipriotti, S. (2023). A Comprehensive Review on the Thermal Stability Assessment of Polymers and Composites for Aeronautics and Space Applications. *Polymers*, 15(18). <https://doi.org/10.3390/polym15183786>
- Belhaoui, A., Laaouidi, H., Zyade, S., Raji, Y., Halimi, Y., & Tahiri, M. (2023). Exploring the Thermophysical Properties of the Thermal Conductivity of Pigmented Polymer Matrix Composites with Barium Titanate: A Comparative Numerical and Experimental Study. *Journal of Composites Science*, 7(6). <https://doi.org/10.3390/jcs7060220>
- Bilisik, K., & Akter, M. (2022). Polymer nanocomposites based on graphite nanoplatelets (GNPs): a review on thermal-electrical conductivity, mechanical and barrier properties. *Journal of Materials Science* (57, 15, 7425–7480) <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07092-0>
- Breitkopf, C. (2024). Theoretical Characterization of Thermal Conductivities for Polymers—A Review. *Thermo*, 4(1), 31–47. <https://doi.org/10.3390/thermo4010004>
- Buketov, A. V., Shulga, Y. M., Strelchenko, V. Y., & Sotsenko, V. V. (2024). Improving the thermophysical properties of polymer composites. *Functional Materials*, 31(4), 546–556. <https://doi.org/10.15407/fm31.04.546>
- Calborean, A., Máthé, L., & Bruj, O. (2025). Phase Change Materials for Thermal Management in Lithium-Ion Battery Packs: A Review. *Batteries*, 11(12), 432. <https://doi.org/10.3390/batteries11120432>
- Chen, W., Lv, G., Shen, J., Li, D., Liu, X., & Dai, Z. (2020). The preparation and application of polymer/graphene nanocomposites. *Emerging Materials Research*, 9(3), 943–959. <https://doi.org/10.1680/jemmr.17.00031>
- Covarrubias Gordillo, C. A., Soria Argüello, G., Rivera Salinas, J. E., Fonseca Florido, H. A., Cano Salazar, L. F., González, F. J., Flores Guia, T., & Ávila Orta, C. A. (2025). Design and Performance of a Solar Water Heater Based on Nanocomposites of Polypropylene and Plasma-Modified Carbon Nanofibers. *ACS Omega*, 10(36), 41467–41478. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c04819>
- Dhumal, A. R., Kulkarni, A. P., & Ambhore, N. H. (2023). A comprehensive review on thermal management of electronic devices. *Journal of Engineering and Applied Science*, 70(1), 140. <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00309-2>
- Díaz Varela, J. Y., Burciaga Jurado, L. G., Olivas Armendáriz, I., Martínez Pérez, C. A., & Chapa González, C. (2024). The role of multi-walled carbon nanotubes in enhancing the hydrolysis and thermal stability of PLA. *Scientific Reports*, 14(1), 8405. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58755-8>
- Ferrano, F., Fateri, M., Merkel, M., & Hertel, J. (2024). Simulating Elastoplastic and Anisotropic Behavior in Thermoplastic Additively Manufactured Components: An Application-Oriented Modeling Approach. *Polymers*, 16(9), 1234. <https://doi.org/10.3390/polym16091234>
- Gebrehiwet, L., Abate, E., Negussie, Y., Teklehaymanot, T., & Abeselom, E. (2023). Application Of Composite Materials In Aerospace & Automotive Industry:Review. *International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM)*, 5, 697. <https://doi.org/10.35629/5252-0503697723>
- Girish, S., Vinay, M. S., Bavan, D. S., Ahmed, R., Asdaque, P. M. G. B., Revanasiddappa, M., Dandapani, P., & Ravitej, Y. P. (2025). Evaluation of thermal properties of epoxy composites filled by nanofiller materials. *Discover Applied Sciences* 7, (11). <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07550-9>
- Gobena, S. T., & Woldeyannes, A. D. (2024). A review of synthesis methods, and characterization techniques of polymer nanocomposites for diverse applications. *Discover Materials* 4, (1). <https://doi.org/10.1007/s43939-024-00119-0>
- Gong, T., Ma, C., Cao, L., & Su, W. (2025). On-chip hotspot thermal delay and peak clipping using a heterogeneously integrated micro-thermoelectric cooler. *Applied Thermal Engineering*, 278, 127258. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.127258>
- Hanif, Z., Dinh, D. K., Pornea, A. G. M., Yanar, N., Kwak, M. S., & Kim, J. (2024). Protruding Boron Nitride Nanotubes on the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Surface Enabled by Tannic Acid-Assisted Modification to Fabricate a Thermal Conductive Epoxy/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite. *ACS Omega*, 9(37), 38946–38956. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c05323>
- Harun-Ur-Rashid, M., Foyez, T., Krishna, S. B. N., Poda, S., & Imran, A. Bin. (2025). Recent advances of silver nanoparticle-based polymer nanocomposites for biomedical applications. *RSC Advances* 15, (11), 8480–8505. <https://doi.org/10.1039/d4ra08220f>
- Hemath, M., Mavinkere Rangappa, S., Kushvaha, V., Dhakal, H. N., & Siengchin, S. (2020). A comprehensive review on mechanical, electromagnetic radiation shielding, and thermal conductivity of

- fibers/inorganic fillers reinforced hybrid polymer composites. *Polymer Composites* 41 (10), 3940–3965. <https://doi.org/10.1002/pc.25703>
- Hu, R., Wen, S., Chen, Q., Sun, X., Liu, H., Gao, W., & Bai, Y. (2025). Universal Construction of Electrical Insulation and High-Thermal-Conductivity Composites Based on the In Situ Exfoliation of Boron Nitride-Graphene Hybrid Filler. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 17(4), 6783–6792. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c18250>
- Huang, C., Qian, X., & Yang, R. (2018). Thermal conductivity of polymers and polymer nanocomposites. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 132, 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2018.06.002>
- Islam, A., Pandey, A. K., Sharma, K., Bhutto, Y. A., Saidur, R., & Buddhi, D. (2024). Enhancing thermo-physical properties of hybrid nanoparticle-infused medium temperature organic phase change materials using graphene nanoplatelets and multiwall carbon nanotubes. *Discover Materials*, 4(1), 59. <https://doi.org/10.1007/s43939-024-00130-5>
- Jebelli, A., Lotfi, N., Zare, M. S., & Yagoub, M. C. E. (2024). Advanced Thermal Management for High-Power ICs: Optimizing Heatsink and Airflow Design. *Applied Sciences*, 14(20), 9406. <https://doi.org/10.3390/app14209406>
- Kangishwar, S., Radhika, N., Sheik, A. A., Chavali, A., & Hariharan, S. (2023). A comprehensive review on polymer matrix composites: material selection, fabrication, and application. *Polymer Bulletin* 80, (1), 47–87. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04087-4>
- Kausar, A. (2020). Thermally conducting polymer/nanocarbon and polymer/inorganic nanoparticle nanocomposite: a review. *Polymer-Plastics Technology and Materials* 59, (8), 895–909. <https://doi.org/10.1080/25740881.2019.1708103>
- Kelarakis, A. (2024). In Situ Generation of Nanoparticles on and within Polymeric Materials. *Polymers* 16, (11). <https://doi.org/10.3390/polym16111611>
- Khan, M. K. A., Mujahid, Y., Alahmed, N., & Khan, K. A. (2026). A review of multifunctional hybrid fiber-reinforced polymer (HFRP) composites for aerospace applications. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 9(2), 118. <https://doi.org/10.1007/s42114-026-01626-9>
- Khdary, N. H., Almuqrab, B. T., & El Enany, G. (2023). Nanoparticle-Embedded Polymers and Their Applications: A Review. *Membranes*, 13(5), 537. <https://doi.org/10.3390/membranes13050537>
- Khdier, H. M., Husham, K. A. F., Shali, W. M., & Al-Atabi, H. A. (2024). Interfacial Effects on Mechanical, Thermal and Electrical Properties of Polymer-Based Nanocomposites: A Review. *Annales de Chimie - Science Des Matériaux*, 48(6), 857–869. <https://doi.org/10.18280/acsm.480611>
- Khina, A. G., Bulkatov, D. P., Storozhuk, I. P., & Sokolov, A. P. (2025). Coefficient of Linear Thermal Expansion of Polymers and Polymer Composites: A Comprehensive Review. *Polymers*, 17(23), 3097. <https://doi.org/10.3390/polym17233097>
- Kobashigawa, J. M., Robles, C. A., Gaiser, R. F., Schinca, D. C., Scaffardi, L. B., & Carmarán, C. C. (2023). Mucosynthesis of silver nanoparticles using psychrotrophic strains of *Thlasnella albida* Bourdot & Galzin from the South Orkney Islands (Antarctica). *Revista Argentina de Microbiología*, 55(4), 307–316. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2023.04.004>
- Kono, N., Kawasaki, R., Oshige, A., Nishimura, K., Yamana, K., Yimitei, D., Miyaki, S., Adachi, N., Takabayashi, N., Nagasaki, T., & Ikeda, A. (2024). Extracellular vesicles containing fullerene derivatives prepared by an exchange reaction for photodynamic therapy. *Journal of Materials Chemistry B*, 12(38), 9760–9766. <https://doi.org/10.1039/D4TB00416G>
- Kroto, H. W., Heath, J. R., O'Brien, S. C., Curl, R. F., & Smalley, R. E. (1985). C60: Buckminsterfullerene. *Nature*, 318(6042), 162–163. <https://doi.org/10.1038/318162a0>
- Kushwah, R., Alamir, S. G., Al-Sulaimi, S., Al-Harrasi, A., & Ibrahim, A. E. (2026). Multifaceted boron nitride nanomaterials: a comprehensive review of synthesis, property engineering and multidisciplinary applications. *RSC Advances*, 16(9), 7777–7802. <https://doi.org/10.1039/D5RA09482H>
- Laad, M., Sur, A., Kale, G., Razoumny, Y., & Shalu, A. (2025). Synthesis and characterization of carbon based polymer composites reinforced with MWCNTs and graphite in PVDF matrix. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13421-5>
- Larrañaga-Tapia, M., Betancourt-Tovar, B., Videa, M., Antunes-Ricardo, M., & Cholula-Díaz, J. L. (2024). Green synthesis trends and potential applications of bimetallic nanoparticles towards the sustainable development goals 2030. *Nanoscale Advances*, 6(1), 51–71. <https://doi.org/10.1039/D3NA00761H>
- Latif, Z., Ali, M., Lee, E.-J., Zubair, Z., & Lee, K. H. (2023). Thermal and Mechanical Properties of Nano-Carbon-Reinforced Polymeric Nanocomposites: A Review. *Journal of Composites Science*, 7(10), 441. <https://doi.org/10.3390/jcs7100441>
- Lazaridou, K., Ioannidis, R. O., & Bikiaris, D. N. (2025). In Situ Polymerization as an Effective Method, Compared to Melt Mixing, for Synthesis of Flexible Poly(lactic acid) Nanocomposites Based on Metal Nanoparticles. *Journal of Composites Science*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/jcs9110610>
- Lee, S. H., Luvnish, A., Su, X., Meng, Q., Liu, M., Kuan, H. C., Saman, W., Bostrom, M., & Ma, J. (2024). Advancements in polymer (Nano)composites for phase change material-based thermal storage: A focus on thermoplastic matrices and ceramic/carbon fillers. *Smart Materials in Manufacturing* (Vol. 2). <https://doi.org/10.1016/j.smmf.2024.100044>
- Li, J.-W., Cheng, C.-C., & Chiu, C.-W. (2024). Advances in Multifunctional Polymer-Based Nanocomposites. *Polymers*, 16(23), 3440. <https://doi.org/10.3390/polym16233440>
- Li, Z., Sun, Y., Hu, F., Liu, D., Zhang, X., Ren, J., Guo, H., Shalash, M., He, M., Hou, H., El-Bahy, S. M., Pan, D., El-Bahy, Z. M., & Guo, Z. (2025). An overview of polymer-based thermally conductive functional materials. *Journal of Materials Science and Technology* (Vol. 218, pp. 191–210). <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2024.07.053>
- Li, Z., Zhang, Y., Zhang, S., & Tang, B. (2024). Phase change materials for lithium-ion battery thermal management systems: A review. *Journal of Energy Storage*, 80, 110259. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.110259>
- Ligati Schleifer, S., & Regev, O. (2023). Additive manufacturing of anisotropic graphene-based composites for thermal management applications. *Additive Manufacturing*, 70, 103567. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103567>
- Lim, J. V., Bee, S. T., Sin, L. T., Ratnam, C. T., & Hamid, Z. A. A. (2021). A review on the synthesis, properties, and utilities of functionalized carbon nanoparticles for polymer nanocomposites. *Polymers* 13, (20). <https://doi.org/10.3390/polym13203547>
- Lin, H., Liu, Y., Deng, J., Jing, L., Wang, Z., Wei, L., Wei, Z., Hou, Z., Tao, J., & Dai, H. (2025). Bimetallic nanoparticles: advances in fundamental investigations and catalytic applications. *Environmental Science: Advances*, 4(1), 33–56. <https://doi.org/10.1039/D4VA00241E>
- Liu, L., Xu, C., Yang, Y., Fu, C., Ma, F., Zeng, Z., & Wang, G. (2025). Graphene-based polymer composites in thermal management: materials, structures and applications. *Materials Horizons*, 12(1), 64–91. <https://doi.org/10.1039/D4MH00846D>
- Lu, F., Liu, Y., Dai, Y., Zhang, G., & Tong, Y. (2025). Preparation of nanosilver/polymer composites and evaluation of their antimicrobial and antitumor effect. *RSC Advances*, 15(8), 6357–6369. <https://doi.org/10.1039/D4RA08108K>
- Madrid, C., Cáceres, C., Jiménez-Arévalo, V. M., Martín, P., Araya, N., & Aguilar, C. (2024). High-entropy alloys as an alternative binder to improve mechanical, tribological, and oxidation properties of cermets. *Materials & Design*, 247, 113431. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113431>
- Maity, N., Mishra, A., Barman, S., Padhi, S. K., Panda, B. B., Jaseer, E. A., & Javid, M. (2024). Tuning Pd-to-Ag Ratio to Enhance the Synergistic Activity of Fly Ash-Supported PdAg Bimetallic Nanoparticles. *ACS Omega*, 9(1), 1020–1028. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c07246>

- Megahed, M., Sakr, A. S., Badawy, A. A. M., & Seleem, M. H. (2024). Assessment of the performance of aluminum, copper, and graphene nanometer fillers filled woven glass fiber/epoxy composites. *Journal of Polymer Research*, 31(2), 29. <https://doi.org/10.1007/s10965-024-03870-3>
- Meng, H., Song, J., & Zhang, Y. (2024). ZIF67-ZIF8@MFC-Derived Co-Zn/NC Interconnected Frameworks Combined with Perfluorosulfonic Acid Polymer as a Highly Efficient and Stable Composite Electrocatalyst for Oxygen Reduction Reactions. *Polymers*, 16(4), 505. <https://doi.org/10.3390/polym16040505>
- Meng, Y., Yang, D., Jiang, X., Bando, Y., & Wang, X. (2024). Thermal Conductivity Enhancement of Polymeric Composites Using Hexagonal Boron Nitride: Design Strategies and Challenges. *Nanomaterials*, 14(4), 331. <https://doi.org/10.3390/nano14040331>
- Mishra, B., Varshney, S., & Gupta, M. K. (2025). Effect of Fillers on the Performance of Fibre Reinforced Polymer Hybrid Composites: A Comprehensive Review. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 64(14), 2179–2213. <https://doi.org/10.1080/25740881.2025.2519024>
- Mitra, A., Trifkovic, M., & Ponnuram, S. (2021). Surface Functionalization-Induced Effects on Nanoparticle Dispersion and Associated Changes in the Thermophysical Properties of Polymer Nanocomposites. *Macromolecules*, 54(9), 3962–3971. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.1c00184>
- Mogbojuri, G., Abtahi, S., Hendeniya, N., & Chang, B. (2025). The Effects of Chain Conformation and Nanostructure on the Dielectric Properties of Polymers. *Materials* 18, (1). <https://doi.org/10.3390/ma18010198>
- Moser, N., Strasser, C., Tanda, A., Archodoulaki, V., & Burgstaller, C. (2024). Influence of printing direction and filler orientation on the thermal conductivity of <sc>3D</sc> printed heat sinks. *SPE Polymers*, 5(1), 83–94. <https://doi.org/10.1002/pls2.10112>
- Musa, A. A., Bello, A., Adams, S. M., Onwualu, A. P., Anye, V. C., Bello, K. A., & Obianyo, I. I. (2025). Nano-Enhanced Polymer Composite Materials: A Review of Current Advancements and Challenges. *Polymers* 17, (7). <https://doi.org/10.3390/polym17070893>
- Ommeish, Q., Khairy, S. A., Ibrahim, S. S., & Abd-Elwahab, S. M. (2026). Thermal stability and degradation kinetics of PVC/PEO nanocomposites incorporating CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles. *Journal of Materials Science*, 61(6), 3767–3792. <https://doi.org/10.1007/s10853-025-12033-8>
- Otabil, A., Kharbatli, A. R., Siddique, S. K., Liao, K., & Schiffer, A. (2025). Recent developments in the incorporation of 1D/2D nanofillers in polymer derived ceramics—a review. In *Advanced Composites and Hybrid Materials* (Vol. 8, Number 3). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s42114-025-01346-6>
- Palenskis, V. (2024). New Insight into Electric Force in Metal and the Quadratic Electrical Resistivity Law of Metals at Low Temperatures. *Metals*, 14(5), 526. <https://doi.org/10.3390/met14050526>
- Parveen, S. (2024). Synthesis of carbon nanotubes on nickel catalyst by low pressure chemical vapour deposition. *International Journal of Advanced Academic Studies*, 6(6S), 44–45. <https://doi.org/10.33545/27068919.2024.v6.i6a.1210>
- Paszkiewicz, S., Walkowiak, K., & Barczewski, M. (2024). Biobased polymer nanocomposites prepared by in situ polymerization: comparison between carbon and mineral nanofillers. *Journal of Materials Science*, 59(30), 13805–13823. <https://doi.org/10.1007/s10853-024-10025-8>
- Patel, R. V., Yadav, A., & Winczek, J. (2023). Physical, Mechanical, and Thermal Properties of Natural Fiber-Reinforced Epoxy Composites for Construction and Automotive Applications. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/app13085126>
- Peterson, G. R., Jeong, Y., Tomé, C. N., & Sangid, M. D. (2024). A comprehensive analysis of cermet design and thermal cyclic stability via elasto-viscoplastic crystal plasticity modeling. *International Journal of Plasticity*, 179, 104032. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2024.104032>
- Simões-Moreira, José R. (2025). *Heat Transfer: An Engineering Course*.
- Qiu, L., Zhang, X., Guo, Z., & Li, Q. (2021). Interfacial heat transport in nano-carbon assemblies. *Carbon*, 178, 391–412. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.02.105>
- Rahman, M. M., Khan, K. H., Parvez, M. M. H., Irizarry, N., & Uddin, M. N. (2025). Polymer Nanocomposites with Optimized Nanoparticle Dispersion and Enhanced Functionalities for Industrial Applications. *Processes*, 13(4), 994. <https://doi.org/10.3390/pr13040994>
- Richter, E. M., Possart, G., Steinmann, P., Pfaller, S., & Ries, M. (2024). Revealing the percolation–agglomeration transition in polymer nanocomposites via MD-informed continuum RVEs with elastoplastic interphases. *Composites Part B: Engineering*, 281, 111477. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111477>
- Ryabchikov, Y. V., Mirza, I., Flimelová, M., Kana, A., & Romanyuk, O. (2024). Merging of Bi-Modality of Ultrafast Laser Processing: Heating of Si/Au Nanocomposite Solutions with Controlled Chemical Content. *Nanomaterials*, 14(4), 321. <https://doi.org/10.3390/nano14040321>
- Saberi, M., Moradi, A., Ansari, R., Hassanzadeh-Aghdam, M. K., & Jamali, J. (2024). Analyzing the electrical conductivity of hybrid carbon nanotube/graphene nanoplatelet polymer-matrix nanocomposites: An extended physics-based modeling approach. *Alexandria Engineering Journal*, 108, 344–353. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.07.112>
- Sakib, N., Koh, Y. P., & Simon, S. L. (2022). The absolute heat capacity of polymer grafted nanoparticles using fast scanning calorimetry\*. *Polymer Engineering & Science*, 62(9), 2977–2985. <https://doi.org/10.1002/pen.26078>
- Sam, S., Say, S., Sang, L., & Nakatsugawa, H. (2026). Nanostructuring thermoelectric materials using phononic crystals and reduction in lattice thermal conductivity. *Next Energy* (11). <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2026.100550>
- Sánchez-Cepeda, A., Cedeño, E., Marín, E., Pazos, M. C., Ingrid, S.-C., Muñoz, E. de J., & Vera-Graziano, R. (2024). Evaluation of the dispersion properties of graphene oxide/cetyltrimethylammonium bromide for application in nanocomposite materials. *RSC Advances*, 14(5), 3267–3279. <https://doi.org/10.1039/D3RA04689C>
- Schio, A. L., de Lima, M. S., Perotti, B. L., Michels, A. F., Fongaro, G., Roesch-Ely, M., & Figueroa, C. A. (2024). Polymer matrix films containing copper particles with bactericidal activity under different illumination condition. *Materials Today Communications*, 41, 111031. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.111031>
- Seon Lee, Y., Ryeol Kim, N., Ki Park, S., Ko, Y. il, Shin, Y., Yang, B., & Yang, C. M. (2024). Effects of high-temperature thermal reduction on thermal conductivity of reduced graphene oxide polymer composites. *Applied Surface Science*, 650. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.159140>
- Shchegolkov, A. V., Shchegolkov, A. V., Kaminskii, V. V., & Chumak, M. A. (2024). Smart Polymer Composites for Electrical Heating: A Review. *Journal of Composites Science*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/jcs8120522>
- Singh, M. K., Palaniappan, S. K., Arora, G., Rangappa, S. M., & Siengchin, S. (2026). Recent advances in applications of nanocomposites: A brief overview. *Discover Materials*, 6(1), 58. <https://doi.org/10.1007/s43939-025-00524-z>
- Srebrenkoska, S., Kochoski, F., Srebrenkoska, V., Risteska, S., & Kotynia, R. (2023). Effect of Process Parameters on Thermal and Mechanical Properties of Filament Wound Polymer-Based Composite Pipes. *Polymers*, 15(13). <https://doi.org/10.3390/polym15132829>
- Syduzzaman, M., Chowdhury, K. P., Fahmi, F. F., Rumi, S. S., & Hassan, A. (2024). Effects of carbon-based nanofillers on mechanical, electrical, and thermal properties of bast fiber reinforced polymer composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 37, (8), 2723–2774. <https://doi.org/10.1177/08927057231216740>
- Tamjid, E., Najafi, P., Khalili, M. A., Shokouhnejad, N., Karimi, M., & Sepahdoost, N. (2024). Review of sustainable, eco-friendly, and conductive polymer nanocomposites for electronic and thermal applications: current status and future prospects. *Discover Nano* 19, (1). <https://doi.org/10.1186/s11671-024-03965-2>

- Tan, J., & Zhang, Y. (2024). Thermal Conductive Polymer Composites: Recent Progress and Applications. *Molecules*, 29, (15). <https://doi.org/10.3390/molecules29153572>
- Teo, N. K. S., Huang, Y., & Thang, S. H. (2025). Polymer-metal nanocomposites with bi- or tri-metallic compositions exhibiting catalytic properties. *Polymer Chemistry*, 16(17), 1969–1980. <https://doi.org/10.1039/D5PY00113G>
- Topcu, G., Reinoso Arenas, D., McNally, T., & Becer, C. R. (2023). Microphase separation assisted reduction in the percolation threshold of MWCNT/block polymer composites. *Soft Matter*, 19(6), 1109–1114. <https://doi.org/10.1039/D2SM01277D>
- Vijayababu, T. R., Ramesh, T., Pandipati, S., Mishra, S., Sridevi, G., Raja, C. P., Mensah, R. A., Das, O., Misra, M., Mohanty, A., & Karthik Babu, N. B. (2023). High Thermal Conductivity Polymer Composites Fabrication through Conventional and 3D Printing Processes: State-of-the-Art and Future Trends. *Macromolecular Materials and Engineering*, 308(7). <https://doi.org/10.1002/mame.202300001>
- Vivek, R., Joseph, K., Simon, G. P., & Bhattacharyya, A. R. (2017). Melt-mixed composites of multi-walled carbon nanotubes and thermotropic liquid crystalline polymer: Morphology, rheology and mechanical properties. *Composites Science and Technology*, 151, 184–192. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.07.024>
- Wang, J., Song, F., Ding, Y., & Shao, M. (2020). The incorporation of graphene to enhance mechanical properties of polypropylene self-reinforced polymer composites. *Materials & Design*, 195, 109073. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109073>
- Wang, S., Ren, L., Han, M., Zhou, W., Wong, C., Bai, X., Sun, R., & Zeng, X. (2023). Molecular design of a highly matched and bonded interface achieves enhanced thermal boundary conductance. *Nanoscale*, 15(19), 8706–8715. <https://doi.org/10.1039/D3NR00627A>
- Xu, C., Zhao, Y., & Zhang, H. (2025). Morphology-Dependent Percolation and Conductive Network Formation in Polymer Nanocomposites with Multi-Shaped Nanofillers. *Nanomaterials*, 16(1), 52. <https://doi.org/10.3390/nano16010052>
- Xu, X., Guo, Y., Shen, Z., Liu, B., Yan, F., & Zhong, N. (2025). Aramid Fiber-Reinforced Plastics (AFRPs) in Aerospace: A Review of Recent Advancements and Future Perspectives. *Polymers*, 17(16), 2254. <https://doi.org/10.3390/polym17162254>
- Xuan, Q.-F., Zhao, P.-Y., Peng, H., Zhang, S., Cai, B., Niu, F.-Y., Koo, M. C., Sun, X.-B., Jiang, X., & Wang, G.-S. (2026). Hierarchical Modular Architecture Enabling Intelligent Dynamic Thermal Management and Superior Electromagnetic Interference Shielding. *Nano-Micro Letters*, 18(1), 290. <https://doi.org/10.1007/s40820-026-02140-9>
- Yan, C., Qin, M., Guo, T., Zhang, L., Yang, J., & Pan, Y. (2024). Synthesis and Application of Polymer SXFA in the Detection of Organophosphine Agents with a SAW Sensor. *Polymers*, 16(6), 784. <https://doi.org/10.3390/polym16060784>
- Yan, Y., Chen, Y., Mao, Z., Bai, Y., Zhao, M., Wang, D., Chen, J., & Shi, X. (2025). Bridging the Thermal Divide: Nano-Architectonics and Interface Engineering Strategies for High-Performance 2D Material-Based Polymer Composites. *ACS Nano*, 19(22), 20357–20402. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5c02539>
- Yelishala, S. C., Murphy, C., & Cui, L. (2024a). Molecular perspective and engineering of thermal transport and thermoelectricity in polymers. *Journal of Materials Chemistry A*, 12(18), 10614–10658. <https://doi.org/10.1039/D3TA08071D>
- Yelishala, S. C., Murphy, C., & Cui, L. (2024b). Molecular perspective and engineering of thermal transport and thermoelectricity in polymers. *Journal of Materials Chemistry A*, 12(18), 10614–10658. <https://doi.org/10.1039/d3ta08071d>
- Yilmaz Atay, G., & Bilgiç, N. (2024). Radar absorbing properties of different size carbon nanotube reinforced polymer composites. *Frontiers in Materials*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1380472>
- Zhang, H., Zhang, X., Fang, Z., Huang, Y., Xu, H., Liu, Y., Wu, D., Zhuang, J., & Sun, J. (2020). Recent advances in preparation, mechanisms, and applications of thermally conductive polymer composites: A review. *Journal of Composites Science*, 4(4). <https://doi.org/10.3390/jcs4040180>
- Zhang, Q., Le, T. C., Zhao, S., Shang, C., Hu, M., Zhang, S., Liu, Y., & Pan, S. (2024). Advancements in Nanomaterial Dispersion and Stability and Thermophysical Properties of Nano-Enhanced Phase Change Materials for Biomedical Applications. *Nanomaterials* 14, (13). <https://doi.org/10.3390/nano14131126>
- Zhang, Z., Huang, Y., Xie, Q., Liu, G., Ma, C., & Zhang, G. (2024). Functional polymer-ceramic hybrid coatings: Status, progress, and trend. *Progress in Polymer Science*, 154, 101840. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2024.101840>
- Zhao, C., Wang, J., Sun, Q., & Gao, Q. (2026). Negative thermal expansion of two-dimensional materials: A review. *Nano Research*, 19(3), 94908155. <https://doi.org/10.26599/NR.2025.94908155>
- Zhou, T., Yuan, Y., Xiao, L., Ding, W., Wang, Y., & Lv, L.-P. (2024). Boosting of Redox-Active Polyimide Porous Organic Polymers with Multi-Walled Carbon Nanotubes towards Pseudocapacitive Energy Storage. *Nanomaterials*, 14(17), 1388. <https://doi.org/10.3390/nano14171388>