

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

Revisión sistemática del estado del arte de los nanocompuestos poliméricos, su síntesis y aplicaciones como mejoradores de conductividad térmica

Rosa María Monterrosa Fernández

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Química

Director

Gustavo Emilio Ramírez Caballero

Ciencias de los materiales e ingeniería Ph.D.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Ingeniería Química

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A todas las personas que estuvieron para mí aun cuando quería rendirme, a las que siempre tuvieron una voz de aliento y no me dejaron sola, a los que siempre han creído en mí, mi familia y amigos, los amo, una dedicatoria especial a mi abuelo Migue, que hasta en su último día creyó en la loca de la familia.

Rosa Monterrosa

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento primeramente a mi madre quien escuchó muchas veces la retahíla del fracaso y siempre me alentó a seguir, a mi hermana que es mi confidente y con quien pude desahogar las penas de mi corazón, a mis abuelos que siempre creyeron y estuvieron para mí. Agradezco infinitamente al universo por ponerme personas tan maravillosas en el camino para que resulte mucho más fácil andarlo, a la señora Diana que me alimentó más de una vez, a mi amiga Vivi, que me abrió las puertas de su casa cuando no tuve a donde ir y a todos los que de alguna u otra manera hicieron parte de este proceso. Agradezco a mi director de tesis por confiar en mí y dejar que esta tesis se llevara a cabo cuando no sabía que hacer, por escuchar mis dudas y a veces actuar de psicólogo. Un último agradecimiento a mí por no abandonar aun cuando quería, porque, aunque lento llegué a la meta, lo logramos.

Tabla de Contenido

Introducción	10
1. Objetivos	13
1.1 Objetivo general	13
1.2 Objetivos específicos	13
2. Estado del arte	14
3. Descripción metodológica.....	16
2.1 Consulta de la información	16
2.2 Selección de información.....	17
2.3 Análisis de la información	18
3. Análisis de resultados.....	18
3.1 Resultados de la consulta y selección de artículos.....	18
3.2 Estudio bibliométrico	20
3.3 Análisis de los resultados	23
3.3.1 Tipos de nanorrefuerzos y matrices poliméricas.....	23
3.3.2 Modificación superficies.....	29
3.3.3 Métodos de síntesis de nanocompuestos poliméricos.....	34
3.4 Análisis TRL	44
4. Nanocompuestos poliméricos como mejoradores de conductividad térmica	45
5. Propuesta de síntesis de un nanocompuesto polimérico a base de glicerol	47
5.1 Cálculo parámetros de solubilidad de Hansen para el poliglicerol y distintos rellenos	49

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS	
5.1.1 Cálculo parámetros para el poliglicerol	50
5.2. Elección del relleno.....	52
6. Conclusiones	55
Referencias Bibliográficas	56

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Número de resultados arrojados por ecuación de búsqueda</i>	18
Tabla 2. <i>Métodos de modificación y agentes empleados</i>	29
Tabla 3. <i>Resumen estudios con intercalación de soluciones como método de síntesis</i> ...	36
Tabla 4. <i>Resumen de estudios con procesamiento por fusión como método de síntesis</i> ..	39
Tabla 5. <i>Niveles TRL de diferentes métodos de síntesis</i>	44
Tabla 6. <i>Aplicaciones de los nanocompuestos poliméricos como mejoradores de conductividad térmica</i>	45
Tabla 7. <i>Parámetros de solubilidad de Hansen para cada uno de los rellenos</i>	51
Tabla 8. <i>Criterios de selección de relleno</i>	52

Lista de figuras

Figura 1. <i>Proceso de selección seguido según criterios de elegibilidad</i>	20
Figura 2. <i>Cantidad de artículos publicados por año</i>	21
Figura 3. <i>Número de artículos publicados por país</i>	22
Figura 4. <i>Tipos de materiales utilizados como nanorrefuerzos</i>	23
Figura 5. <i>Cantidad de artículos por nanorrellenos utilizado</i>	25
Figura 6. <i>Matrices poliméricas estudiadas en las investigaciones</i>	33
Figura 7. <i>Métodos de síntesis empleados en las publicaciones</i>	35
Figura 8. <i>Esquema proceso de polimerización oxidativa</i>	40
Figura 9. <i>Imagen representativa del diglicerol</i>	48

Resumen

Título: Revisión sistemática del estado del arte de los nanocompuestos poliméricos, su síntesis y aplicaciones como mejoradores de conductividad térmica*

Autor: Rosa María Monterrosa Fernández**

Palabras Clave: nanocompuestos, polímero, conductividad térmica, síntesis.

Descripción: Los nanocompuestos poliméricos son un tipo de material cuyo estudio ha aumentado considerablemente en los últimos años, ya que presentan mejoras prometedoras en las propiedades de los polímeros, entre ellas, la conductividad térmica. Esto los convierte en materiales atractivos para aplicaciones electrónicas, especialmente ante la demanda creciente de dispositivos cada vez más pequeños. Los procesos de síntesis de estos materiales abarcan diversos métodos, que incluyen la polimerización in situ, la intercalación en soluciones, la mezcla en estado fundido y otros. Estos procesos requieren una buena compatibilidad entre el relleno y el polímero, lo que a menudo implica la modificación de la superficie de los materiales de refuerzo. Adicionalmente, el estilo de vida actual hace necesario la búsqueda de nuevas formas de aprovechamientos de residuos o subproductos de poco valor, tal es el caso del glicerol, en este proyecto se propuso un método de síntesis a partir de este último que permita obtener un nanocompuesto polimérico conductor térmico de mayor valor que a su vez pueda mejorar un fenómeno como lo son las islas de calor en las ciudades. En esta revisión sistemática de los nanocompuestos poliméricos, su síntesis y aplicaciones como mejoradores de conductividad térmica se abarcan las tendencias en los estudios publicados hasta la fecha, los pretratamientos de los rellenos, procesos de síntesis y aplicaciones en el área de conductividad térmica.

*Trabajo de grado

**Facultad de Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Ingeniería Química
Director: Gustavo Emilio Ramírez Caballero. Ingeniero Químico, Ph.D.

Abstract

Title: Systematic review of the state of the art on polymer nanocomposites, their synthesis and applications as thermal conductivity enhancers *

Author(s): Rosa María Monterrosa Fernández **

Key Words: Nanocomposites, polymer, Thermal conductivity, synthesis.

Description: Polymeric nanocomposites are a type of material whose study has significantly increased in recent years, as they offer promising improvements in polymer properties, including thermal conductivity. This makes them attractive materials for electronic applications, especially given the growing demand for increasingly smaller devices. The synthesis processes of these materials encompass various methods, including in situ polymerization, solution intercalation, melt blending, among others. These processes require good compatibility between the filler and the polymer, which often involves surface modification of the reinforcing materials. Additionally, today's lifestyle necessitates the search for new ways to utilize low-value waste or by-products such as glycerol. In this project, a synthesis method was proposed using glycerol to obtain a thermally conductive polymeric nanocomposite of higher value, which could in turn help mitigate phenomena such as urban heat islands. This systematic review of polymeric nanocomposites, their synthesis, and applications as thermal conductivity enhancers covers the trends in published studies to date, filler pretreatments, synthesis processes, and applications in the field of thermal conductivity.

* Degree Work

** Faculty of physical chemistry. School of Chemical Engineering. Chemical Engineering. Director: Gustavo Emilio Ramirez Caballero. Chemical Engineering, Ph.D.

Introducción

La continua urbanización, impulsada por el crecimiento demográfico y el desarrollo socioeconómico a nivel global, representa un cambio profundo y complejo en el entorno natural (Phelan et al., 2015). Según el informe de las Naciones Unidas de 2022, aproximadamente el 56% de la población mundial reside en áreas urbanas, y se proyecta que para el año 2050 este porcentaje aumente al 68%(United Nations Human Settlements Programme, 2022). A pesar de las numerosas ventajas que este proceso ha traído consigo, como el aumento del nivel de vida de las comunidades y el estímulo al crecimiento económico, también conlleva importantes consecuencias a nivel ambiental. Uno de estos efectos son las conocidas islas de calor urbanas (UHI, por sus siglas en inglés), un fenómeno que genera zonas más cálidas dentro de las urbanizaciones humanas en comparación con el entorno natural circundante(Nwakaire et al., 2020)

Se ha demostrado, que, en general, los pavimentos basados en el asfalto absorben una gran cantidad de radiación solar incidente, generando emisiones de calor que hacen que su temperatura sea mayor al entorno natural (Mohajerani et al., 2017; C. Wang et al., 2021). Se estima que alrededor del 29% al 45% de las superficies urbanas están cubiertas por estos pavimentos y estudios han encontrado que las temperaturas de estas superficies suelen ser hasta 20°C mayor que el entorno en verano, contribuyendo significativamente al aumento de las UHI en las ciudades (Jiang et al., 2018). Es en este contexto donde se hace necesaria la búsqueda de alternativas que generen una disminución en la emisión de calor por parte de los pavimentos asfálticos y desde el grupo de investigación en polímeros (GIP) se plantea la creación de un material innovador que contribuya en este esfuerzo.

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

Los nanocompuestos poliméricos son materiales que se caracterizan por la dispersión homogénea de partículas con dimensiones nanométricas dentro de una matriz polimérica (Puca Pacheco et al., 2017). En los últimos años, han atraído a muchos investigadores dado que exhiben mejoras en las propiedades de los polímeros como resistencia al impacto, resistencia a la tracción, conductividad térmica, retardo de llama, barrera de gases, entre otros (Shaikh & Kubade, 2023).

En una búsqueda por encontrar un material que logre mejorar la conductividad de las capas subyacentes de los pavimentos para generar una disminución en las emisiones de calor producidas por estos últimos, y que además, integre un polímero sintetizado a partir del glicerol, de tal manera que se pueda aprovechar este compuesto obtenido del proceso de producción de biodiesel y cuyo mercado se encuentra saturado actualmente, surge la idea de un material basado en nanocompuestos poliméricos como una posible solución. Para llevar a cabo la síntesis de este tipo de materiales, primero es necesario conocer las investigaciones que han sido realizadas en torno a los diferentes métodos de obtención de estos compuestos, y sus aplicaciones como mejoradores de conductividad térmica. Para ello, en esta investigación se elaboró una revisión sistemática del estado del arte existente en los últimos 10 años, aplicando ecuaciones de búsqueda en bases de datos y estableciendo criterios de elegibilidad para clasificar los archivos encontrados. Lo anterior, con la finalidad de encontrar la información referente a los nanocompuestos poliméricos. Posteriormente, se elaboró un análisis de los datos obtenidos encontrando las características generales de las publicaciones, se determinaron los diferentes tratamientos a los rellenos nanométricos, los polímeros más usados actualmente y las diferentes rutas de síntesis de estos últimos; se elaboró una síntesis de las aplicaciones en conductividad térmica, incluyendo su uso

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

como materiales de interfaz térmica, materiales para blindajes contra interferencias electromagnéticas y transductores optoacústicos , adicionalmente se propuso una ruta teórica para la obtención de un nanocompuesto polimérico a base de glicerol y un nanorrelleno de nanohojas de boro.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Revisar sistemáticamente el estado del arte de los nanocompuestos poliméricos, su síntesis y aplicaciones como mejoradores de conductividad térmica con el propósito de proponer un método de síntesis de un nanocompuesto polimérico a base de glicerol.

1.2 Objetivos específicos

Analizar las publicaciones científicas relacionadas con la síntesis de nanocompuestos poliméricos.

Identificar las innovaciones científicas asociadas a las aplicaciones como mejoradores de conductividad térmica de los nanocompuestos poliméricos.

Proponer un método de síntesis que pueda ayudar a la formulación de un nanocompuesto polimérico a base de glicerol.

2. Estado del arte

En la década de los noventa los laboratorios de investigación y desarrollo de Toyota (Toyota Central R & D Labs., Inc.) fueron los pioneros en sintetizar compuestos poliméricos con arcillas, específicamente utilizando montmorillonita (MMT). Este estudio demostró que el compuesto híbrido poseía mejoras significativas en sus propiedades mecánicas y de barrera de gases, si se le comparaba con el polímero solo (Okada & Usuki, 2007). De hecho, es en 1990 cuando la palabra nanocompuesto es usada por primera vez para referirse a este tipo de materiales polímero-relleno que se denominaban con anterioridad “materiales híbridos” (Okada & Usuki, 2007). Este descubrimiento, produjo un aumento significativo en los estudios relacionados con estos nanocompuestos en amplios sectores científicos (Bhattacharya & Tummala, 2001; Gómez-Romero et al., 2003; H. Li et al., 2003).

Diversas publicaciones han informado una mejora en la conductividad de estos materiales al agregar cargas o materiales de relleno, si se compara con la matriz polimérica pura. Kochetov et al. (2009) encontraron un aumento de hasta el 18% de la conductividad térmica de una resina epoxi cargada con nitruro de aluminio (AlN) al 10% p/p. Mientras que D. L. Zhang et al. (2017) estudiaron las propiedades eléctricas y térmicas de nanocompuestos poliméricos a base de nano hojas de nitruro de boro (BNNS), Polipropileno (PP) y una mezcla de copolímero tribloque (SEBS) encontrando que la conductividad térmica de los nanocompuestos aumentó significativamente con el aumento de BNNS pasando de $0.42 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, a $1.38 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, demostrando cambios significativos al agregar rellenos a la matriz polimérica. Por su parte, Huang et al. (2018) llevaron a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva de los mecanismos de transporte térmico en polímeros puros y en nanocompuestos poliméricos, encontrando que la conductividad

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

térmica no está determinada únicamente por la matriz polimérica y los materiales de relleno, sino también por la interacción entre ambos. En particular, dicha interacción da lugar a una resistencia térmica interfacial, la cual constituye un factor limitante para alcanzar una mayor conductividad térmica efectiva.

A partir de la década de 2000, las revisiones comienzan a destacar el uso de nanotubos de carbono, grafeno y nano plaquetas de grafito como alternativas altamente eficientes para mejorar la conductividad térmica en matrices poliméricas (Al Sheheri et al., 2019; Houshi et al., 2024; Mittal et al., 2015). En la revisión titulada “revisión crítica: métodos de producción de grafeno y sus nanocompuestos poliméricos” Houshi et al. (2024) realizaron una exhaustiva investigación de los diferentes métodos de síntesis empleados para la obtención de estos nanocompuestos, destacando principalmente tres enfoques: la polimerización in situ, la mezcla en solución y la fundición en soluciones. En su estudio, los autores analizan comparativamente las ventajas y limitaciones de cada método, considerando aspectos como costes de fabricación, dispersión del relleno, toxicidad de compuestos utilizados y facilidad de fabricación. Por su lado, Al Sheheri et al. (2019) en su estudio titulado “La preparación de nanorellenos de carbón y su rol en el desempeño como variable de los nanocompuestos poliméricos” presentan una revisión detallada de la influencia de la preparación de materiales basados en carbono tales como nanotubos de carbono (CNT), grafeno y grafito en las propiedades del nanocompuesto polimérico resultante. Este artículo detalla las técnicas de síntesis de los CNT y de los nanocompuestos poliméricos y señala que la mejora efectiva de la conductividad térmica no depende únicamente del tipo del nanorelleno, sino de factores críticos como la dispersión homogénea, la orientación de los rellenos y la calidad interfaz-nanorelleno, adicionalmente se discuten estrategias como la funcionalización

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

superficial de los nano rellenos para favorecer la compatibilidad relleno-matriz polimérica y reducir la aglomeración que continua siendo un gran desafío en el diseño de estos materiales.

Finalmente Mittal et al. (2015) en su estudio titulado “una revisión de nanotubos de carbono y grafeno como rellenos en nanocompuestos poliméricos reforzados” discuten diferentes métodos de funcionalización de las superficies de CNT como el uso de ácidos y otros agentes oxidantes de tal forma que se generen grupos funcionales reactivos que interactúen con la matriz polimérica de tal forma que se produzcan enlaces covalentes fuertes que prevengan la aglomeración dentro de la matriz polimérica (Mittal et al., 2015). Este breve estado del arte permite generar un panorama sobre esta nueva generación de materiales híbridos que están abriendo muchas aplicaciones prometedoras en diversas áreas, específicamente en el área de conducción térmica.

3. Descripción metodológica

2.1 Consulta de la información

Las fuentes de información utilizadas en esta investigación fueron la base de datos Web of Science (WOS) y Scopus en la ventana de tiempo comprendida entre los años 2015 y 2025.

Las ecuaciones de búsqueda se elaboraron con las palabras clave “synthesis”, “preparation”, “fabrication”, “preparation” “polymer nanocomposite”, “polymer nanocomposites”, “polymer-based nanocomposites”, “thermal conductivity”, “thermal transport”, “heat transport”, “thermal conductivity enhancement” y “thermal conductivity improvement” con la finalidad de identificar las investigaciones que estudiaran los procesos de preparación de los

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

nanocompuestos poliméricos y sus usos en aplicaciones relacionadas al mejoramiento de la conductividad térmica. El idioma escogido para la búsqueda de información fue el inglés.

2.2 Selección de información

La selección de artículos se realizó con los siguientes criterios de elegibilidad, basados en la metodología PRISMA (Page et al., 2021), los pasos tomados en cuenta se presentan a continuación:

Identificación de duplicados. Se eliminaron las referencias duplicadas al usar las dos ecuaciones de búsqueda por medio del gestor bibliográfico Mendeley.

Tipo de documento. Se descartaron documentos correspondientes a publicaciones de conferencias, capítulos de libros y críticas, para obtener sólo artículos de revistas especializadas cuya veracidad ha sido respaldada científicamente.

Título. Se descartaron los títulos que a pesar de contener las palabras claves su enfoque no resultaba en estudios sobre métodos de síntesis o aplicaciones en gestión térmica, adicionalmente se descartaron los títulos que estuvieran enfocados en simulaciones o modelaciones, ya que se buscaba un enfoque puramente experimental.

Resumen. Se realizó la lectura del resumen de cada artículo para seleccionar a aquellos que incluyeran información y detalles sobre la ruta de síntesis seguida para la preparación de nanocompuestos poliméricos, o que mencionaran sus aplicaciones como mejoradores de conductividad.

Contenido. Se analizó el contenido de los artículos seleccionados en la etapa anterior, considerando aspectos como la metodología de fabricación, la especificación del método de síntesis y los parámetros empleados, así como la mención de posibles aplicaciones de los nanocompuestos

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

La información fue organizada y clasificada siguiendo los criterios establecidos, utilizando como apoyo la herramienta Mendeley y Rayaan.

2.3 Análisis de la información

Con base a los artículos seleccionados, se identificaron diferentes métodos de síntesis de los nanocompuestos poliméricos, las matrices poliméricas y rellenos empleados y se identificaron las aplicaciones térmicas en los que estos han sido utilizados, se elaboró una base de datos en Excel con el fin de sintetizar y analizar la información obtenida.

3. Análisis de resultados

3.1 Resultados de la consulta y selección de artículos

Para abarcar los artículos de forma integral fueron incluidos operadores booleanos como OR y AND en las ecuaciones de búsqueda. El operador OR permitió tener en cuenta los términos tanto en plural como en singular y la búsqueda de sinónimos de la palabra “synthesis”, mientras que AND restringió la búsqueda a las palabras “synthesis”, “polymer nanocomposite” y “thermal conductivity”, y sus correspondientes sinónimos, obteniendo 607 artículos en total. La tabla 1 resume los resultados encontrados.

Tabla 1

Número de resultados arrojados por ecuación de búsqueda

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

Base de datos	Ecuación de búsqueda	Resultados
<i>Web of Science</i>	("polymer nanocomposites" OR "polymeric nanocomposites" OR "polymer-based nanocomposites") AND ("thermal conductivity" OR "thermal transport" OR "heat transfer") AND ("synthesis" OR "processing" OR "fabrication" OR "preparation")	354
	("polymer nanocomposites") AND ("thermal conductivity enhancement" OR "thermal conductivity improvement")	214
<i>Scopus</i>	("polymer nanocomposites" OR "polymeric nanocomposites" OR "polymer-based nanocomposites") AND ("thermal conductivity" OR "thermal transport" OR "heat transfer") AND ("synthesis" OR "processing" OR "fabrication" OR "preparation")	25
	("polymer nanocomposites") AND ("thermal conductivity enhancement" OR "thermal conductivity improvement")	14
Total		607

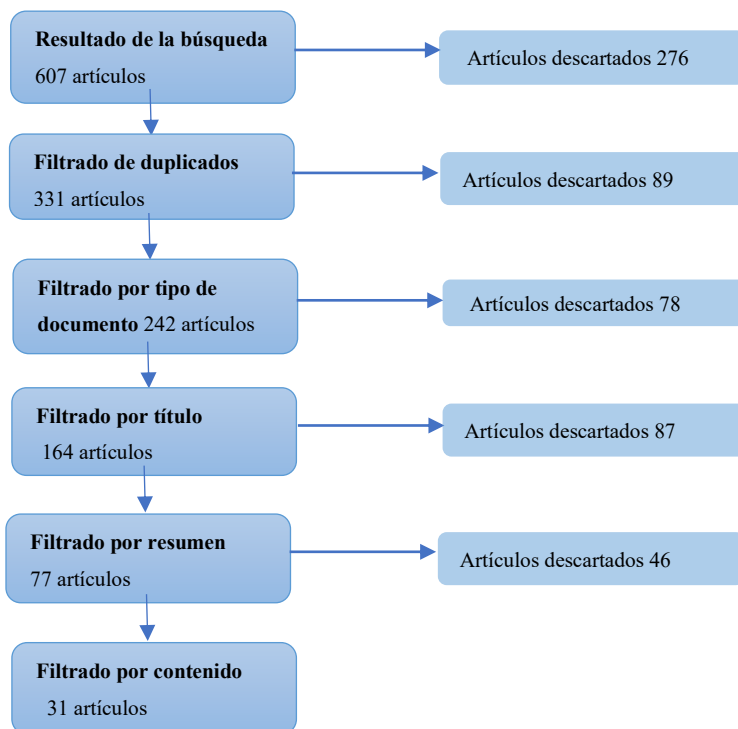
De la cantidad inicial de artículos seleccionados, se identificaron las referencias duplicadas con la herramienta Rayyan y se obtuvo un total de 331 documentos, de los cuales fueron excluidos 89 por no corresponder al tipo de documento necesitado. Después de realizar la lectura por título y resumen, se descartaron y filtraron 164 documentos teniendo en cuenta los criterios de selección, incluyendo 21 documentos sin acceso. Finalmente, solo 31 documentos cumplieron con los criterios de la presente revisión y fueron tenidos en cuenta para su posterior análisis.

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

En la figura 1 se describe a detalle el proceso de selección de información que se realizó después de obtener los artículos de la base de datos WOS.

Figura 1

Proceso de selección seguido según criterios de elegibilidad



3.2 Estudio bibliométrico

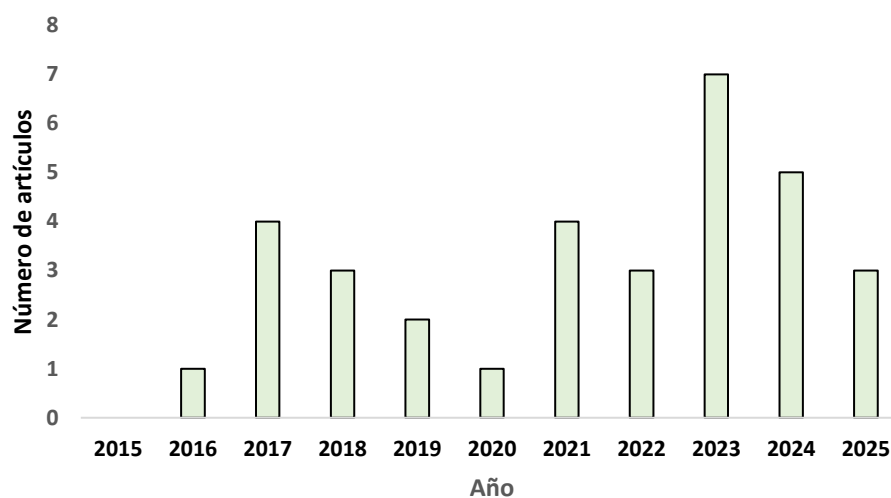
En la figura 2, se presentan los resultados obtenidos que evidencian la evolución de las investigaciones sobre nanocompuestos poliméricos, enfocadas en su síntesis y su uso como mejoradores de la conductividad térmica en los últimos años. En el período comprendido entre 2015 y 2025, se observa un aumento significativo en el volumen de publicaciones a partir del año 2021, lo cual está relacionado con el creciente interés por materiales que permitan mejoras en las

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

propiedades mecánica, eléctricas, ópticas y químicas de los polímeros. Específicamente, en lo referente a investigaciones que exploran o proponen aplicaciones en la mejora de conductividad térmica, se evidencia un incremento en el interés durante los últimos cinco años, crecimiento que va a la par a la tendencia reciente a la miniaturización de circuitos en la que son usados estos polímeros. Para el año 2015 ninguna de las publicaciones cumplió con los criterios de elegibilidad.

Figura 2

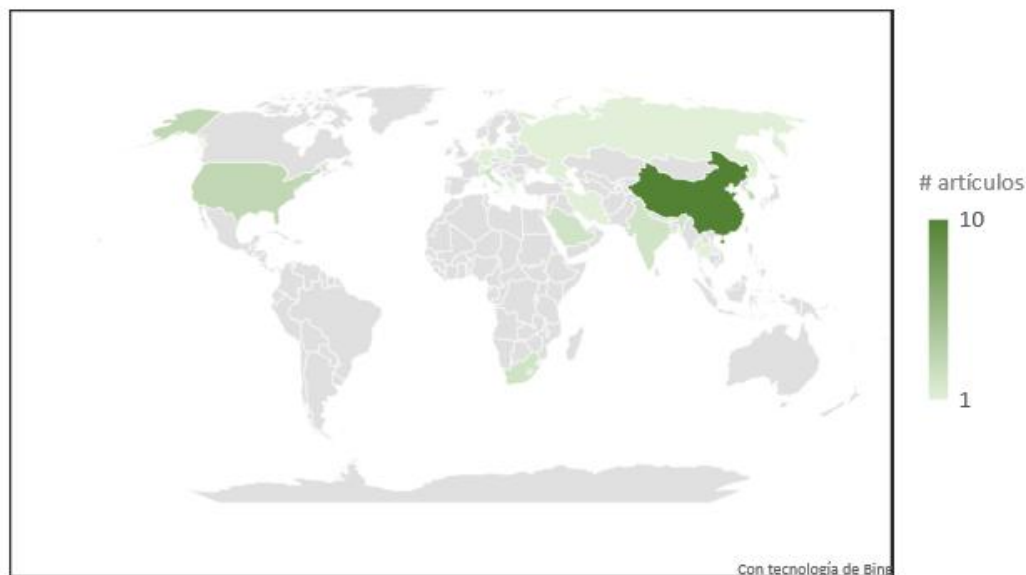
Cantidad de artículos publicados por año.



Como se observa en la figura 3, se observa un mayor interés de investigación en los continentes de Asia, America del norte y Europa.

Figura 3

Número de artículos publicados por país.



Esta situación puede tener relación con la localización de la industria de los semiconductores, donde la mayor parte de la producción, el ensamblaje y prueba de productos se lleva a cabo en Asia (Grimes & Du, 2022). Específicamente, China presenta el mayor mercado de semiconductores a nivel global (Grimes & Du, 2022), lo que impulsa la demanda de nuevos materiales que faciliten la miniaturización de dispositivos electrónicos como lo son los nanocompuestos poliméricos, esto explica porque China es el país que cuenta con la mayor cantidad de artículos publicados con un total de 10, seguido de Corea del Sur con 3 y Estados Unidos con 3. No obstante, se tuvieron en cuenta publicaciones de otros 11 países dentro de la investigación.

3.3 Análisis de los resultados

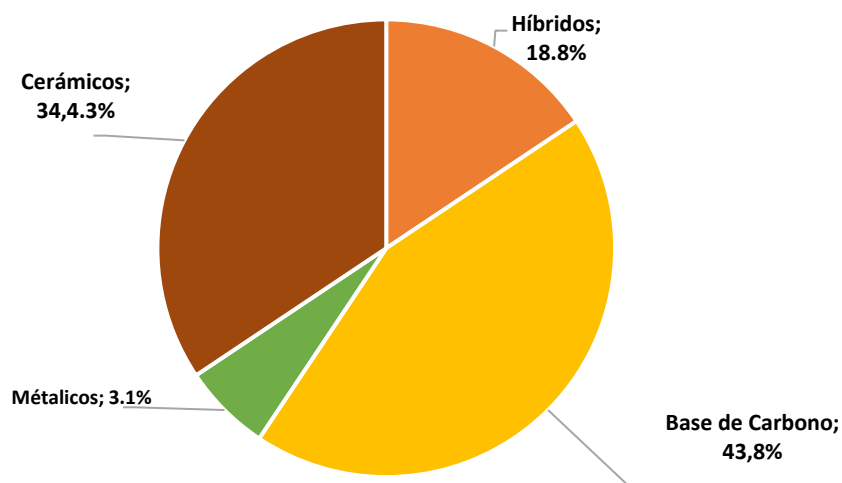
3.3.1 Tipos de nanorrefuerzos y matrices poliméricas

Agregar nanorrellenos térmicamente conductores a las matrices poliméricas es el enfoque más práctico y escalable que permite la obtención de polímeros con alta conductividad térmica (Duan et al., 2023). Esta mejora en la conductividad térmica es explicada por la teoría de la trayectoria de la conducción térmica, según la cual a medida que se incorporan los rellenos en las matrices, estos se conectan y forman redes termoconductoras que proporcionan vías más eficientes para el flujo de calor (Moradi & Stachewicz, 2025). En los estudios analizados se pueden distinguir cuatro tipos de rellenos comúnmente utilizados; metálicos, cerámicos, rellenos a base de carbono e híbridos. En la figura 4 se detallan los porcentajes correspondientes a cada tipo de materiales de relleno utilizado en las publicaciones consultadas.

Figura 4

Tipos de materiales utilizados como nanorefuerzos

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS



Solo el 3,1% de las publicaciones reportan el uso de materiales metálicos como nanopartículas de plata y oro (Al-Ojeery & Farea, 2023) para aumentar la conductividad térmica de las matrices poliméricas. Estos materiales son los menos utilizados ya que su uso presenta ciertos desafíos debido a su tendencia a la oxidación que puede originar resistencia térmica en la interfaz polímero-relleno (Huang et al., 2018b). Adicionalmente, estos materiales aumentan la conductividad eléctrica de los compuestos poliméricos lo que puede llegar a ser un impedimento para su uso en aplicaciones electrónicas (Eom et al., 2023a). A pesar de que el aumento de la conductividad eléctrica se puede prevenir modificando las superficies de los nanorellenos, los refuerzos cerámicos con alta conductividad térmica son más utilizados debido a su baja permitividad dieléctrica, alta resistividad eléctrica, inercia química y baja expansión térmica (Hong et al., 2017), su uso en el 34.4% de las publicaciones demuestra su popularidad entre los investigadores.

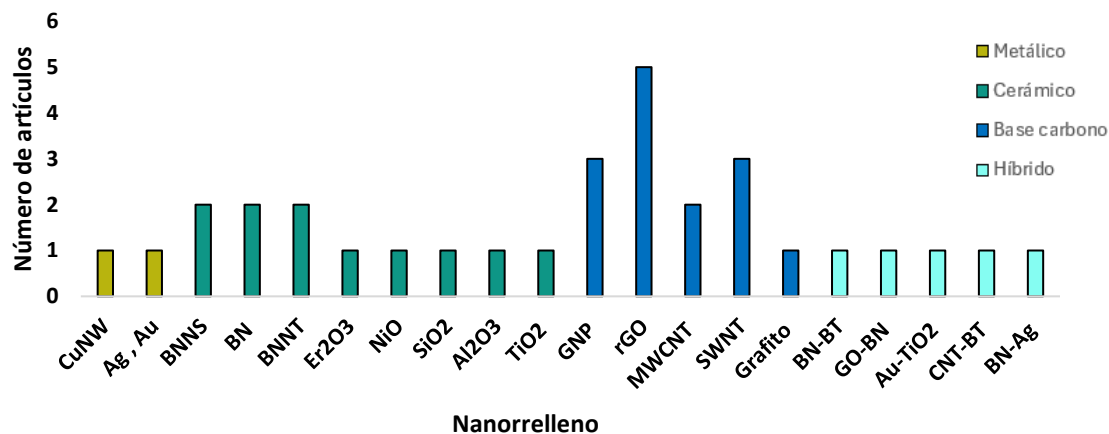
REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

Dentro de la familia de los cerámicos como se muestra en la figura 5, el nitruro de boro (BN) es el nanorefuerzo más estudiado (Pezzana et al., 2021; Rehman et al., 2023) destacando sus variantes de alta relación de aspecto como las nano plaquetas (BNNS)(Lee et al., 2017) y los nanotubos (BNNT) (Akintola et al., 2021). Otros óxidos metálicos como Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 , Er_2O_3 también han sido estudiados, principalmente por su capacidad de mejorar la gestión térmica sin comprometer el aislamiento eléctrico del sistema (Blattmann & Pratsinis, 2018; Hu et al., 2016; Schechtel et al., 2017; Taha & Mahmoud, 2021). No obstante, una limitación recurrente que presentan estos materiales, específicamente los de baja relación de aspecto, es la elevada carga de relleno necesaria para lograr aumentos de conductividad considerables. Esto queda evidenciado en los hallazgos de Schechtel et al, (2017) quienes lograron incrementar la conductividad de una matriz de tioleno de $0.04 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a $0.76 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ tras la incorporación de un 90%p/p de dióxido de titanio (TiO_2), demostrando que, con fracciones altas de nanopartículas se forman canales conductores que permiten el transporte térmico efectivo (Schechtel et al., 2017). Por su parte, Hu et al. (2016) lograron aumentar la conductividad térmica de un nanocompuesto $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{epoxy}$ de $3.60 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a $13.46 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ al aumentar el contenido de alúmina del 55% al 70% en peso. En ambos casos estas altas concentraciones de nanorrellenos no solo incrementan la densidad del material, sino que suelen comprometer la procesabilidad y ligereza del nanocompuesto.

Figura 5

Cantidad de artículos por nanorrelleno utilizado

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS



Como se observa en la figura 5 los materiales a base de carbono son los más reportados por las investigaciones destacando al óxido de grafeno, los nanotubos de carbono y las nanoplaquetas de grafeno. A diferencia de los rellenos cerámicos los nanomateriales a base de carbono permiten alcanzar un umbral de percolación térmica con concentraciones mucho menores debido a su alta relación de aspecto que facilita la creación de vías continuas de conductividad térmica a través de la matriz polimérica (Musto et al., 2015). Chen et al. (2019) lograron un aumento de siete veces la conductividad térmica incorporando solo 6% en peso de óxido de grafeno en una matriz epoxi, además estudiaron la influencia de la relación de aspecto de diferentes nanorellenos en la conductividad térmica de los compuestos, descubriendo que estructuras con mayor relación de aspecto como los nanotubos de carbono y nanoplaquetas de grafeno producen una mejora del rendimiento térmico más pronunciada si se le compara con otros materiales de carbono como el negro de humo o grafito que poseen una menor relación de aspecto. Actualmente, los materiales a base de carbono son los más utilizados en la literatura científica, un 43.8% de las publicaciones reportan su uso como se observó en la figura 4. Esta preferencia es respaldada por sus excepcionales conductividades térmicas intrínsecas, por ejemplo, las nanoplaquetas de grafeno pueden presentar una conductividad térmica tan alta como $1000-3000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ mientras que los

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

nanotubos de carbono se encuentran en el rango de $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (Huang et al., 2018). A pesar de sus altas conductividades, estos materiales enfrentan un desafío importante: tanto los rellenos metálicos como los de carbono incrementan drásticamente la conductividad eléctrica de los compuestos (Colonna et al., 2017a). En la búsqueda por resolver esta limitación, ha surgido un interés creciente por el estudio de nanorrellenos híbridos. Esta estrategia combina materiales eléctricamente aislantes (cerámicos) con conductores (metálicos y a base de carbono), de tal forma que se logre una sinergia que permita optimizar la gestión térmica sin comprometer las propiedades dieléctricas del sistema, propiedades muy valoradas en aplicaciones electrónicas.

Recientemente, Sreejivungsa et al. (2023) han descrito el uso de titanato de bario (BaTiO_3) decorado con nanopartículas de oro (Au) como relleno híbrido para mejorar la conductividad térmica en matrices de fluoruro de polivinilideno (PVDF). El método de síntesis emplea citrato de sodio en agua desionizada para reducir los iones precursores de Au. Primeramente, las partículas de BaTiO_3 son suspendidas en agua desionizada mediante agitación constante durante 30 minutos a 25°C , garantizando así una dispersión homogénea del material cerámico. Posteriormente el $\text{HauCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (precursor metálico) se introduce en la solución, que luego se lleva a ebullición bajo agitación constante, tras la adición de citrato de sodio se deja reaccionar hasta que la mezcla se torna roja. Finalmente, la solución es enfriada a temperatura ambiente y la suspensión formada es repetidamente lavada con agua desionizada. Las partículas híbridas de AuBT resultantes se sometieron a la técnica de liofilización, para su posterior caracterización e integración en la matriz polimérica. En este estudio los autores destacan una mejora significativa en la constante dieléctrica de los compuestos híbridos en compararlos con el sistema bifásico BT-PVDF. Por ejemplo, para una fracción de carga del 30%p/p la constante dieléctrica aumentó de 50.4 a 90.1, mientras que al 50% p/p el valor pasó de 90.8 a 160.2. Esta mejora significativa se atribuye a las partículas de Au,

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

ya que esta deposición amplifica la polarización interfacial entre la fase conductora Au y las fases aislantes (BT y PVDF) es decir que se aumenta la acumulación de cargas eléctricas en las fronteras entre materiales lo que mejora las propiedades dieléctricas del compuesto (Sreejivungsa et al., 2023a).

En un enfoque similar, Pullanchiyodan et al. (2017) desarrollaron un nanocompuesto basado en una matriz de polimetilmetacrilato (PMMA) reforzada con nanoláminas de nitruro de boro (BNNS) decoradas con nanopartículas de plata (Ag). La síntesis del híbrido BNNS-Ag se produjo mediante una técnica de reducción química, en el que se empleó dimetilformamida (DMF) que funcionó al mismo tiempo como agente reductor para transformar el nitrato de plata (AgNO_3) en plata metálica sobre la superficie de las nanoláminas y como disolvente y exfoliante de las BNNS. Con el objetivo de evaluar la eficiencia del refuerzo, los autores compararon la conductividad térmica de la matriz de PMMA pura frente a dos sistemas: el compuesto binario PMMA-BNNS y el sistema híbrido PMMA-BNNS-Ag. Los autores encontraron que el sistema híbrido producía un incremento más significativo, alcanzado una conductividad del $1.48 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ en comparación con los $1.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ obtenidos por el compuesto binario (ambos con una carga del 35% de relleno) y los $0.32 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ de la matriz de PMMA pura. Esta mejora se atribuye a que las nanopartículas de plata tienen la capacidad de formar puentes térmicos entre los BNNS exfoliados proporcionando mayores redes de conducción térmica (Pullanchiyodan et al., 2017). Estos estudios demuestran que el enfoque de compuestos híbridos ofrece grandes rendimientos si se buscan compuestos altamente aislantes pero conductores térmicos.

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

3.3.2 Modificación superficies

El 48.4% de las publicaciones consultadas reportan un tratamiento previo del material de relleno. Este proceso se realiza con el fin de mejorar la compatibilidad interfacial entre el componente inorgánico y el polímero. Tal como se reciben estos rellenos, pueden presentar problemas como: superficies con alta actividad química y bajas relaciones de aspecto, por lo tanto, poseen altas energías de superficie que ocasionan aglomeraciones dentro de la matriz polimérica que degradan las propiedades de los nanocompuestos (Mallakpour & Khadem, 2014), para abordar estos problemas en las publicaciones se reportan diversas estrategias como la adición de modificadores de superficie, exfoliación química, exfoliación por ultrasonido y exfoliación mecánica, todos ellos buscan que las nanopartículas se mantengan bien dispersas dentro del polímero independientemente de la concentración del relleno. En la tabla 2 se presenta un resumen de los métodos utilizados en las publicaciones y los agentes empleados en cada una de ellas.

Tabla 2

Métodos de modificación y agentes empleados en las investigaciones

Nanorrelleno	Método de modificación	Agente usado	Referencia
Nanoláminas de nitruro de boro BNNS	Modificador de superficie	3-aminopropiltriethoxisilano (APTES) y H ₂ O ₂	(Liu et al., 2025b)
Titanato de bario BTNC	Modificador de superficie	Polidopamina (PDA)	
Nanotubo de carbono	Exfoliación por ultrasonido	Dimetilformamida (DMF)	(Zaporotskova et al., 2024)
Nanoplaquetas de grafeno GNP	Exfoliación mecánica	Molino de bolas	(Su et al., 2025a)
Nanoplaquetas de grafeno GNP	Modificador de superficie	M2070 Jaffamine	

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

Nanoláminas de nitruro de boro BNNS	Modificador de superficie y exfoliación	H ₂ O ₂	(Yuan et al., 2024b)
Nanoláminas de grafeno GN	Modificador de superficie	Polidopamina PDA	(Uyor et al., 2024)
Nitruro de boro BN	Modificador de superficie	3-glicidoxipropiltrimetoxisilano GPTMS	
Nanocables de cobre CuNW	Modificador de superficie	Polidopamina PDA	(Eom et al., 2023b)
AuBT	Exfoliación por ultrasonido	Sulfóxido de dimetilo (DMSO)	(Sreejivungsa et al., 2023b)
Nitruro de boro BN	Modificador de superficie y exfoliación	NH ₃	(Rehman et al., 2023)
Óxido de grafeno GO	Modificación de superficie	Diaminas	(Khan et al., 2022)
Nanotubos de carbono CNT	Modificación de superficie	Polidopamina PDA	(Uyor et al., 2022a)
Nanotubos de nitruros de boro BNNT	Modificación de superficie y exfoliación	3-glicidoxipropiltrimetoxisilano (GPTMS)	
Nanotubos de nitruros de boro	Exfoliación por ultrasonido	dimetilformamida (DMF)	(Akintola et al., 2021a)
Óxido de grafeno GO	Exfoliación química	H ₂ SO ₄	(Colonna et al., 2017c; Ningaraju et al., 2019)
NiO	Modificación de superficie	Ácido oleico	(Soleimani & Niavarzi, 2018)
Nanoláminas de nitruro de boro BNNS	Exfoliación por ultrasonido	Dimetilformamida (DMF)	(Pullanchiyodan et al., 2017)
TiO ₂	Modificación de superficie	Alilcatecol	(Schechtel et al., 2017)

El agente de modificación superficial más empleado es la polidopamina mencionada en el 12,9% de los artículos revisados. La polidopamina permite la modificación de superficies de materiales inorgánicos, como metales preciosos, óxidos, cerámicas y materiales a base de carbono

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

para mejorar su adhesión y compatibilidad con matrices poliméricas por medio de la autopolimerización de la dopamina (DA) en la superficie del material y la reacción de adición de Michael (Heng et al., 2015). La dopamina (DA) es una pequeña molécula orgánica que contiene simultáneamente grupos catecol y aminorio que se puede autopolimerizar bajo una solución alcalina para formar películas de polidopamina (PDA), que pueden adherirse a casi cualquier superficie sólida (Tian et al., 2015). Los recubrimientos de PDA proporcionan sitios activos para la iniciación de polimerización en la superficie del relleno (G. Zeng et al., 2016).

Además de la polidopamina, el uso de agentes de acoplamiento tipo silano, como el 3-aminopropiltrietoxilano (APTES) y el 3-glicidoxipropiltrimetoxisilano (GPTMS), también es reportado en el 9.6% de la literatura consultada. Estos compuestos actúan como puentes moleculares donde los grupos hidrolizables del silano reaccionan con los hidroxilos de la superficie inorgánica, mientras la cadena orgánica reacciona con la matriz polimérica (Liu et al., 2025a; Uyor et al., 2022a). Este mecanismo ayuda a reducir la energía superficial del nanorelleno, mitigando la formación de aglomerados que a su vez mejora la transferencia térmica a través de la interfaz (Liu et al., 2025). En la misma línea se ha empleado el uso de diaminas, ácido oleico, así como tratamientos con NH_3 y H_2O_2 para la inserción de grupos funcionales específicos que incrementen la afinidad con el polímero con el que se trabaja, reduciendo la resistencia interfacial de la interfase.

Por otro lado, los métodos de exfoliación (química, mecánica y por ultrasonido) reportados en las publicaciones buscan la reducción del tamaño de partícula y la obtención de estructuras de baja dimensionalidad (como nanoláminas de BN o grafeno) con una mayor área superficial, por ejemplo Su et al. (2025) lograron disminuir el espesor de los GNP por medio de la exfoliación mecánica que consistían originalmente de 3-5 capas con un espesor de $3,55 \pm 0,32$ nm pasando a $1,85 \pm 0,23$ nm, reduciendo la presencia a 2-3 capas de grafeno. Lo que confirma que la molienda

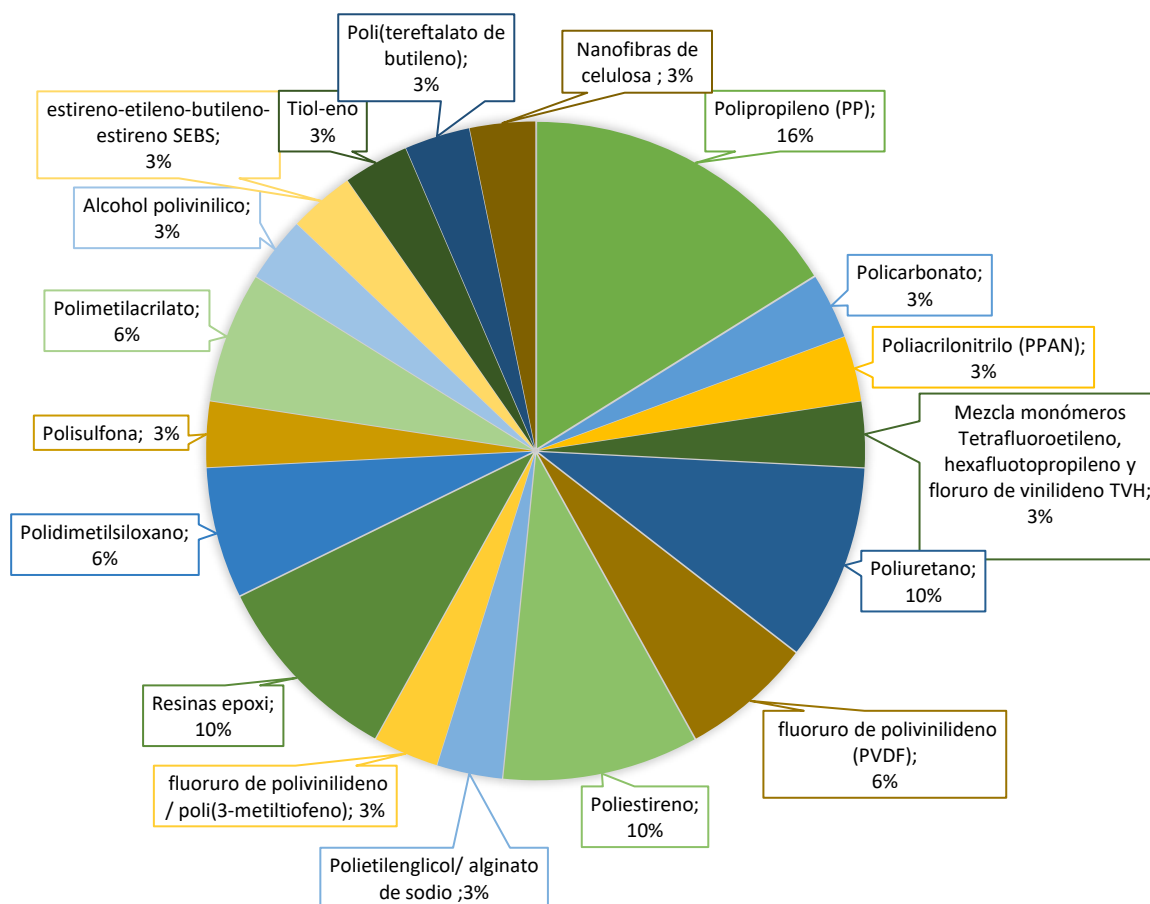
REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

de bolas tiene un efecto en la exfoliación de los GNP ya que la fuerza de corte y de impacto que se puede generar durante el proceso puede ayudar a exfoliar GNP y facilitar la formación de grupos funcionales como grupos epóxido e hidróxido al crear defectos en las superficies de GNP. Estos grupos funcionales pueden mejorar la compatibilidad entre los GNP y la matriz polimérica (Su et al., 2025b). En particular, la utilización de disolventes como la dimetilformamida (DMF) y Sulfóxido de dimetilo (DMSO) en procesos de ultrasonido permite vencer las fuerzas de van der Waals entre las capas del relleno lo que facilita la dispersión de este último en la matriz polimérica que de otra manera sería imposible de alcanzar utilizando mezclado convencional (Akintola et al., 2021b; Sreejivungsa et al., 2023b). Los tiempos de sonificación reportados por las publicaciones van desde los 30 minutos hasta las 48 horas.

La selección del método de modificación ya sea el recubrimiento con agentes acopladores o la separación estructural por medio de la exfoliación depende directamente de la naturaleza química del nanorrelleno y la matriz escogida. Utilizar estos métodos evita defectos estructurales que degradarían las propiedades finales del nanocompuesto polimérico (Khan et al., 2022).

3.3.3 Matrices poliméricas

En la figura 6 se muestran las diferentes matrices poliméricas estudiadas en las publicaciones, siendo el polipropileno, poliuretano y el poliestireno las más reportadas, representando un 36% de los estudios. Todas estas matrices son termoplásticas las cuales se caracterizan por su capacidad de volverse deformables o líquidos al alcanzar temperaturas elevadas y solidificarse al enfriarse de forma reversible, lo que permite su reciclaje (Bin Bakri et al., 2022).

Figura 6*Matrices poliméricas estudiadas en las investigaciones.*

Los termoplásticos son ampliamente preferidos en el desarrollo de nanocompuestos por su versatilidad de procesamiento siendo mayoritariamente utilizados en procesos de síntesis como la extrusión y moldeo por inyección (Liu et al., 2025a; Uyor et al., 2022a, 2024). Estos métodos se realizan a altas temperaturas y aprovechan la capacidad de este tipo de polímeros para facilitar la dispersión de nano cargas mediante el mezclado en estado fundido, sin embargo, también se reporta su uso con otros métodos de síntesis como la intercalación de soluciones como se explicará más adelante. Por otro lado, el empleo de polímeros termoestables, como las resinas epoxi (10%)

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

y sistemas tiol-eno (3%) permiten la obtención de matrices rígidas, reticuladas, capaces de formar redes tridimensionales altamente estables y con alta resistividad química (Khan et al., 2022; Schechtel et al., 2017). A diferencia de las matrices rígidas, el uso de elastómeros como el Polidimetilsiloxano (6%), el SEBS (3%) y el poliuretano (10%) se prefiere en aplicaciones donde se requieran materiales con alta flexibilidad ya que permiten reducir la resistencia térmica de contacto al permitir que el nanocompuesto se adapte a las rugosidades de las superficies que deben unir (J. Li et al., 2020; Quiles, 2019).

El uso de matrices altamente hidrófilas como el alcohol polivinílico (3%), nano fibras de celulosa (3%) y sistemas polietilenglicol/alginato de sodio (3%) también fueron reportadas. Estas matrices presentan una alta densidad de grupos hidroxilo (-OH) en sus cadenas poliméricas (Mukherjee et al., 2019) por lo que su uso es bastante preferido en procesos de síntesis que requieran medios acuosos debido a su alta solubilidad en agua. La presencia de esos grupos funcionales polares permite interacciones tipo puente de hidrogeno con nanocargas que poseen superficies funcionalizadas u oxidadas (X. Zeng et al., 2017). Adicionalmente, la afinidad química permite una dispersión homogénea del relleno dentro de la matriz sin la necesidad de surfactantes o modificadores superficiales agresivos.

3.3.4 Métodos de síntesis de nanocompuestos poliméricos

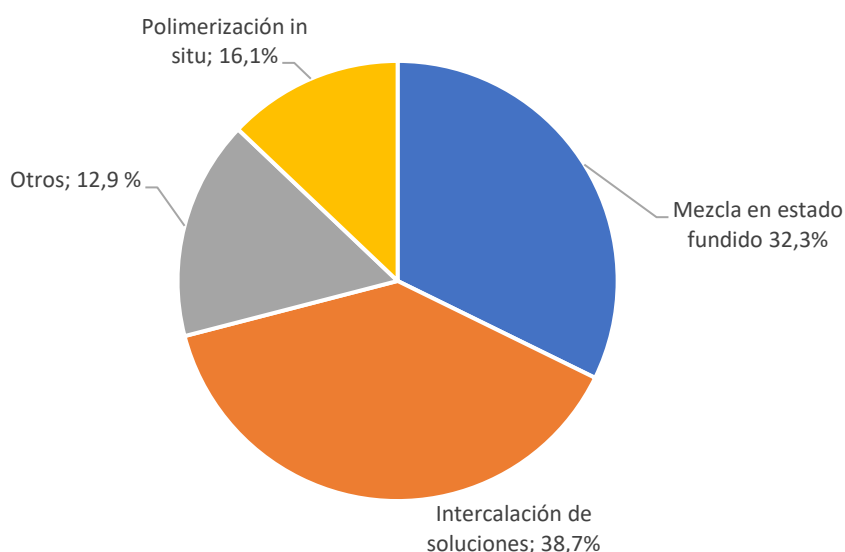
El análisis de la literatura estudiada permitió identificar la preferencia por métodos de síntesis que garantizan una dispersión nanométrica eficaz del relleno en la matriz polimérica. De las publicaciones tenidas en cuenta en el presente estudio, se identificó que la intercalación de soluciones es la técnica más utilizada, representando el 38.7% (Figura 7) de los casos debido a su facilidad de procesamiento. A esta le siguen la mezcla en estado fundido “casting” (32.3%) y la

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

polimerización in situ (16.1%), métodos que presentan una mayor escalabilidad y mayor grado de interacción química entre sus componentes, respectivamente. Finalmente, un 12,9% de las publicaciones reportan técnicas alternativas más especializadas o que son una combinación de los métodos antes mencionados.

Figura 7

Métodos de síntesis empleados en las publicaciones



3.3.3.1 Intercalación de soluciones

Es un método de síntesis que consiste en la preparación de soluciones con disolvente en el cual la matriz polimérica o el pre-polímero sea soluble, y donde, generalmente el material de relleno, es decir, las nanopartículas, son dispersadas antes de mezclarse con la solución polímero-solvente para posteriormente remover el solvente. En las investigaciones que reportan este método se pueden distinguir generalmente los siguientes pasos para la preparación de nanocompuestos: (i) dispersión del relleno en el solvente, (ii) dispersión del polímero en el solvente (iii) mezcla de la

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

solución relleno-solvente con la solución polímero-solvente y (iv) evaporación controlada del solvente o precipitación del nanocompuesto. En algunos casos se presenta un proceso posterior de curado si se trabaja con matrices epóxicas que requieren de altas temperaturas de curación. A continuación, se muestra una tabla donde se resumen los estudios donde se utilizó esta metodología, la clase de nanocompuesto polimérico sintetizado, el disolvente utilizado y la temperatura a la cual se llevaron a cabo las soluciones y el proceso de secado.

Tabla 3

Resumen de estudios con intercalación de soluciones como método de síntesis

Polímero	Relleno	Disolvente	T proceso [°C]	T secado [°C]	Referencia
Poliacrilonitrilo pirolizado (PPAN)	SWCNT	Dimetilformamida (DFM)	50-60	60	(Zaporotskova et al., 2024)
El fluoruro de polivinilideno (PVDF)	Au-BaTiO ₃	Dimetilformamida (DFM)	RT	70	(Sreejivungsa et al., 2023b)
Poliuretano	MWCNT-GNP	Dimetilformamida (DFM)	RT	-	(Duan et al., 2023)
Polietilenglicol/ alginato de sodio	Ag y Au	Agua desionizada	RT	50° C	(Al-Ojeery & Farea, 2023)
Poliestireno PS	BNNT	Dimetilformamida	120	80°	(Akintola et al., 2021a)
Resina Epoxi	Óxido de grafeno (GO)	Acetona	RT	-	(Khan et al., 2022)
El fluoruro de polivinilideno (PVDF)	Óxido de Erblio (Er ₂ O ₃)	Dimetilformamida	85	85	(Taha & Mahmoud, 2021)
polidimetilsiloxano (PDMS)	Nanotubos de	Tolueno	RT	RT	(J. Li et al., 2020)

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

	carbono CNT				
Polisulfona	Óxido de Grafito (GO)	N-metil-2-pirrolidona 2 butanona	85	80	(Ningaraju et al., 2019)
Rexina epoxi (agente de curado)	Nanorrell enos carbonoso s	Acetona	RT	60	(Chen et al., 2019)
Poli metilmetacrilato	BNNS- Ag	Dimetilformamida	RT	-	(Pullanchiyoda n et al., 2017)
Celulosa	Nanotubo s de nitrato de boro	Agua desionizada	RT	80	(X. Zeng et al., 2017)

La mayoría de estos procesos se llevan a cabo a temperatura ambiente, sin embargo, diversos autores reportaron una elevación de la temperatura del sistema para optimizar la dispersión de los nanorrellenos en la matriz polimérica como se muestra en la **tabla 3**, esto con el fin de reducir la viscosidad de la mezcla. Asimismo, la selección del solvente es crítica, estos deben garantizar buena afinidad química entre los componentes y adicionalmente poseer puntos de ebullición moderados para garantizar una evaporación eficiente durante el secado que puede ser al vacío, con campana extractores o en hornos. De esta forma, se evitan tratamientos térmicos elevados o prolongados que podrían inducir la degradación térmica o de propiedades físicas de la matriz polimérica. La dimetilformamida destaca como uno de los solventes más reportados en la literatura debido a su polaridad y su capacidad para solvatar una amplia gama de polímeros, estructuras cerámicas y carbonosas (Hansen, 2007).

A pesar de ser un proceso en el que se obtienen nanocompuestos lo suficientemente exfoliados, este proceso requiere de volúmenes altos de solventes orgánicos (como tolueno, o dimetilformamida) que incrementan exponencialmente los costos de operación y requiere de

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

sistemas complejos de recuperación de vapores por la toxicidad de estos solventes si se desea llevar a escala industrial. Por ello, la investigación actual está orientada en la búsqueda de solventes más amigables que permitan obtener nanocompuestos con buenas conductividades térmicas sin comprometer la sostenibilidad económica y ecológica del proceso de fabricación procesos como de síntesis verde utilizando agua como solvente (Al-Ojeery & Farea, 2023; X. Zeng et al., 2017).

3.3.3.2 Método de procesamiento en estado fundido

El procesamiento por fusión es el método preferido para el procesamiento de compuestos basados en termoplásticos y es muy relevante para aplicaciones industriales, tiene la ventaja de ser amigable con el medio ambiente ya que no requiere el uso de disolventes.

En primera instancia, el proceso involucra la fusión de la matriz polimérica a altas temperaturas para permitir la incorporación del relleno. Según la cantidad de material y requisitos de mezcla, se pueden emplear agitadores magnéticos, extrusoras mono husillo o de doble husillo. Durante el proceso se eligen las variables diferenciales de temperatura, velocidad de agitación y tiempo de residencia. Las temperaturas reportadas en las publicaciones suelen ajustarse por encima del punto de fusión de la matriz polimérica para asegurar una viscosidad suficientemente baja que permita la intercalación del relleno en ella. Otros parámetros son el tiempo de residencia y la velocidad de agitación; un tiempo muy corto resulta en una dispersión pobre, mientras que un tiempo excesivo puede causar la degradación térmica del polímero. Los estudios reportan rangos de 10 a 20 minutos dentro de los agitadores. Mientras que las velocidades de agitación van de los 40rpm a 100 rpm. Posteriormente se pasa a una etapa de moldeo en el que se le da la forma requerida al material.

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

En la tabla 4 se muestra un resumen de las publicaciones que reportan este método, las condiciones de operación como temperatura de mezclado, velocidad de rotación y tiempo de residencia, y las diferentes matrices y nanorrellenos utilizados.

Tabla 4

Resumen de estudios con procesamiento por fusión como método de síntesis.

Matriz	Nanorrelleno	Temperatura de mezclado [°C]	Velocidad de rotación [rpm]	Tiempo residencia proceso	Referencia
Polipropileno (PP)	Nanolaminas de nitruro de boro y titanato de bario BNNS@BTNC	180	80	20 min	(Liu et al., 2025a)
Polycarbonato (PC)	Nanoplaquetas de grafeno GNP	260	40	-	(Su et al., 2025b)
Polipropileno (PP)	Nanoplaquetas de grafeno	200	30	-	(Z. Z. Wang et al., 2024)
Polipropileno (PP)	Grafeno y Nitruro de Boro (BN@GNs)	190	100	10 min	(Uyor et al., 2024)
Tetrafluoroetileno, hexafluoropropileno y fluoruro de vinilideno (TVH)	Grafeno y Nanotubos de carbono	190	100	15 min	(Lapinska et al., 2024)
Poliuretano	Nanotubos de carbono MWCNT	205	30	-	(Loura et al., 2023)
Poliestireno (PS)	Nitruro de boro	200	100	-	(Rehman et al., 2022)
Polipropileno (PP)	CNTs decorados con Titanato de Bario	190	100	10 min	(Uyor et al., 2022b)
Polipropileno (PP)	Nanotubos de carbono de pared simple (SWNT)	200	-	4 min	(Kang et al., 2021)
Poliestireno (PS)	Nanocables de cobre (CuNW)	210	-	10 min	(Eom et al., 2023a)

Adicionalmente, algunos estudios para mejorar la dispersión del relleno reportan la utilización de mezclas concentradas de aditivos (masterbatches) como paso preparatorio al

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

procesamiento en estado fundido con el objetivo de lograr un mayor grado de control sobre la cantidad y el tipo de aditivos en la matriz polimérica y una calidad general consistente (Eom et al., 2023a; Uyor et al., 2024). Finalmente, el éxito del procesamiento por fusión se evalúa mediante la morfología alcanzada en el nanocompuesto. Un control óptimo de las variables mencionadas (temperatura, velocidad de mezclado y tiempo) podría ayudar a vencer las fuerzas de van der Waals que mantienen unidos a los nano rellenos permitiendo buenos grados de exfoliación.

3.3.3.3 Polimerización *in situ*

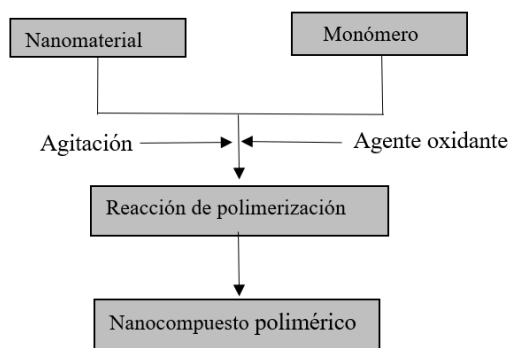
A diferencia de los métodos de mezclado físicos convencionales, la síntesis de nanocompuestos mediante polimerización *in situ* permite una impregnación más profunda del polímero en la estructura del relleno. Esta ventaja se debe al aprovechamiento de la baja viscosidad de los monómeros en el proceso de polimerización, los cuales logran filtrarse entre las capas o estructura del refuerzo para ser polimerizados directamente en su interior, permitiendo obtener estructuras altamente exfoliadas con una dispersión superior (Fawaz & Mittal, 2015).

Dentro de las publicaciones analizadas destacan dos variantes de la polimerización *in situ*: la oxidativa y en emulsión. Con el método oxidativo el nanorrelleno es agregado a una solución de monómero bajo agitación constante para posteriormente iniciar la polimerización por medio de la adicción de un agente oxidante. En contraste, el método por emulsión consiste en formar una emulsión con la ayuda de surfactantes en el que el monómero constituye la fase dispersa y el agua la fase continua. Posteriormente se introduce un iniciador de la polimerización a la fase continua que produce radicales libre que ayudan a iniciar la reacción.

Figura 8

Esquema proceso de polimerización química oxidativa

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS



Diversos estudios validan la eficacia de estas rutas de síntesis. Por ejemplo Petrychuk et al. (2023) desarrollaron compuestos nanopoliméricos a partir de poli (3-metiltiofeno) (P3MT) y nanotubos de paredes múltiples (MWCNT) mediante polimerización química oxidativa. En esta investigación se añadieron cantidades de MWCNT sin tratar en proporciones no mayores al 10% a una solución de P3MT y acetonitrilo bajo agitación continua durante 20 horas para evitar la aglomeración de nanopartículas. La reacción de polimerización se inició tras la adición de cloruro férrico (FeCl_3) y se llevó a cabo durante 20 h con agitación continua. Los investigadores estudiaron la morfología de los compuestos encontrando un alto grado de exfoliación de los nanotubos en la matriz polimérica. Además del FeCl_3 , el persulfato de amonio (APS) es también reportado como agente oxidante.

Por otro lado, Soleimani & Niavarzi. (2018) emplearon la polimerización en emulsión para sintetizar nanocompuestos de poli(metacrilato de metilo) (PMMA) y óxido de níquel (NiO). En este proceso usaron dodecil sulfato de sodio (SDS) y APS como iniciador, la reacción se llevó a cabo a 75°C durante 5 horas. Los precipitados se filtraron, se lavaron con agua y se secaron en un horno a 65°C durante 24. Tras el filtrado, lavado y secado, el estudio concluyó que la estabilidad

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

térmica del polímero se incrementó aproximadamente 30° C gracias a la incorporación de las nanopartículas de NiO.

Las investigaciones reportan también el uso de agentes dispersantes que ayudan a evitar la aglomeración de los rellenos durante el proceso de polimerización y adicionalmente aumentar la solubilidad de algunos componentes como los iniciadores de reacción dentro de la mezcla. Entre las sustancias empleadas destacan la dimetilformamida (DMF), el acetonitrilo, el poliacrilato de amonio y la acetona (Hu et al., 2016; Petrychuk et al., 2023; Pezzana et al., 2021; Yuan et al., 2024c). En última instancia, la selección del método de síntesis está condicionada por la naturaleza de la matriz polimérica, sus condiciones estándar de polimerización y la compatibilidad química con el nanorrelleno.

3.3.3.4 Otros métodos de síntesis

Aunque la intercalación en solución, el procesamiento en estado fundido y la polimerización *in situ* son los métodos mayormente utilizados en la literatura, aproximadamente un 13% de las investigaciones reportan el uso de metodologías alternativas o híbridas diseñadas para aplicaciones específicas.

Los investigadores reportan técnicas de síntesis de alta precisión como el recubrimiento por centrifugación o “*spin coating*” ideales para la obtención de películas con espesores nanométricos controlados en la que la solución de monómero y de nanopartículas son sometidos a centrifugación. Chechtel et al. (2017) informan el uso de un dispensado dinámico donde la solución con nanopartículas se vierte mientras el sustrato con el monómero ya está en movimiento, lo que favorece una distribución más homogénea al evitar aglomeraciones iniciales. En su estudio emplean una velocidad de rotación de 5000 rpm que permite alcanzar nanopelículas con un espesor

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

uniforme aproximado de 100 nm, este es un método poco recomendado para soluciones viscosas porque la viscosidad dificulta la extensión uniforme del material sobre el sustrato.

Asimismo, se han desarrollado técnicas de un solo paso que integran la pirólisis por pulverización de llama (FSP) de nanopartículas con la atomización simultánea de soluciones poliméricas, durante este proceso las nanopartículas recién sintetizadas por pirólisis se mezclan en vuelo por una corriente ascendente a través de tubos que inyectan un alto caudal de gas. Aguas abajo, una solución polimérica diluida se rocía a través boquillas de dispersión alineadas simétricamente y se mezcla con las nanopartículas. Verticalmente, sobre la salida del tubo, esta mezcla incide sobre un sustrato con temperatura controlada. Allí, la solución portadora del polímero se evapora. Como resultado, se forma gradualmente una película de nanocompuesto polimérico sobre el sustrato (Blattmann & Pratsinis, 2018). Esta es una técnica rápida que permite seleccionar libremente el tamaño, la morfología y la composición de las nanopartículas, su velocidad de generación, así como la matriz polimérica y el contenido final de relleno, además reduce las pérdidas de material y el tiempo de procesamiento lo que podría tener gran potencial para la fabricación de nanocompuestos a gran escala.

Por otro lado, la búsqueda de eficiencia en la producción de nanocompuestos poliméricos ha dado como resultado el uso de métodos combinados como la polimerización in situ integrada durante el procesamiento por fusión, o el uso de molienda de bolas asistida por prensado caliente, técnica que emplea la energía mecánica para forzar la exfoliación e integración de las nanocargas dentro de la matriz para posterior obtención de películas a partir del prensado en caliente (Colonna et al., 2017b; Yu et al., 2018).

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

3.4 Análisis TRL

Para el análisis de niveles de madurez tecnológica Technology Readiness Levels (TRL), se seleccionaron las tres tecnologías mayormente reportadas en las publicaciones. A partir de esta selección, se procedió a realizar una evaluación del estado de desarrollo de cada técnica mediante los criterios expuestos por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación en Colombia con el fin de determinar su viabilidad en condiciones reales de aplicación como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5

Niveles TRL de diferentes métodos de síntesis.

Método de síntesis	Nivel TRL
Intercalación de soluciones	4
Polimerización in situ	4
Mezcla en estado fundido	5

Tanto la intercalación de soluciones como la polimerización in situ están catalogados como un TRL 4 (validación de componentes/subsistemas en laboratorio). En esta fase, la investigación deja de ser teórica para ser reproducible experimentalmente en el laboratorio (Minciencias). Sin embargo, la intercalación de soluciones presenta ciertas dificultades para alcanzar TRL mayores debido al manejo de grandes solventes comúnmente costosos y difíciles de eliminar por completo del producto final. Por su parte la polimerización in situ presenta desafíos en el control de las cinéticas de reacción y control de viscosidad. En cuanto la mezcla en estado fundido esta es catalogada en una TR 5 (Validación de sistema/subsistema/o componente en un ambiente relevante), ya que durante el proceso de síntesis se ha utilizado maquinaria para el procesamiento de polímeros a escala piloto lo que demuestra su viabilidad técnica en condiciones reales.

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

4. Nanocompuestos poliméricos como mejoradores de conductividad térmica

Los nanocompuestos poliméricos presentan diversas aplicaciones como mejoradores de conductividad térmica. Es importante destacar que solo el 39 % de los artículos describieron la aplicación específica en la cual las muestras obtenidas pueden ser usadas, es decir, que más de la mitad de las publicaciones a pesar de reportar mejoras en las conductividades térmicas de los nanocompuestos sintetizados, no detallan posibles usos. La mayoría de las publicaciones (32 %) reportan aplicaciones en gestión térmica y disipación de calor para ayudar a mantener los dispositivos electrónicos o de almacenamiento de energía en su rango de temperatura de funcionamiento al facilitar la disipación adecuada de calor excesivo. La tabla 6 detalla las aplicaciones, el tipo de relleno y la matriz polimérica utilizada en cada una de las publicaciones.

Tabla 6
Aplicaciones de los nanocompuestos poliméricos como mejoradores de conductividad térmica.

Matriz Polimérica	Relleno	Aplicación	Referencia
Polipropileno	Nanoláminas de nitruro de boro y nanocristal de titanato de bario	Película de almacenamiento de energía capacitiva a alta temperatura.	(Liu et al., 2025a)
THV	Nanoplaquetas de grafeno y nanotubos de carbono	Materiales de blindaje EMI y disipadores de calor.	(Lapinska et al., 2024)
Poliuretano	Nanotubos de Carbono (CNT)	Filamentos conductores autorreparables para impresión 3D.	(Loura et al., 2023)
Poliestireno	Nanocables de Cobre	Materiales de interfaz térmica TIM (disipación de calor en dispositivos electrónicos).	(Eom et al., 2023b)

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

Poliuretano	Nanotubos de carbono y nanoplaquetas de grafeno	Materiales de blindaje EMI y disipadores de calor. (Duan et al., 2023)
Poli(fluoruro de vinilideno)/metiltiofeno)	de poli(3- Nanotubos de carbono de pared múltiple	Materiales de blindaje EMI y disipadores de calor. (Petrychuk et al., 2023)
Poliestireno	Nitruro de boro	Materiales de interfaz térmica TIM (disipación de calor en dispositivos electrónicos). (Akintola et al., 2021a)
Polidimetilsiloxano	Nitruro de boro	Almohadillas termoconductoras (Pezzana et al., 2021)
poli(fluoruro de vinilideno) (PVDF)	Er ₂ O ₃	Materiales de blindaje EMI. (Taha & Mahmoud, 2021)
Polidimetilsiloxano	Nanotubos de carbono de pared simple (CNT)	Uso como transductor optoacústico (J. Li et al., 2020)
Estireno-etileno-butileno-estireno SEB	Nitruro de boro	Disipador de calor (Yu et al., 2018)
Nanofibras de celulosa	Nanotubos de nitruro de boro/óxido de grafeno	Placas de circuitos impresos (X. Zeng et al., 2017)

Las aplicaciones puntuales abarcan sus usos como materiales de interfaz térmica (TIM); que se utilizan ampliamente como material conductor térmico para eliminar el exceso de calor generado por los procesadores de dispositivos electrónicos mediante la disipación de calor. Otra de sus aplicaciones es como materiales de blindaje contra ondas electromagnéticas (EMI), se busca que estos materiales tengan una alta efectividad de blindaje y de manera sincronizada puedan consumir el calor generado por las ondas electromagnéticas (Mazumder et al., 2022). Con un mayor número de estudios se encuentran las matrices a base de poliuretano, polidimetilsiloxano y poliestireno debido a sus propiedades favorables como estabilidad, flexibilidad, buena resistencia a la abrasión, resistencia química y fácil procesamiento (Eom et al., 2023a; Loura et al., 2023).

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

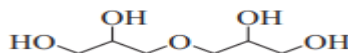
Dentro de los rellenos destacan los nanotubos de carbono, el grafeno y el nitruro de boro por sus altas conductividades térmicas.

Aplicaciones novedosas como transductores ópticos y filamentos conductores autoreparables para impresión 3D han sido reportadas, en la primera se aprovecha la expansión térmica de la matriz ante un estímulo de laser para generar ondas de ultrasonido mediante el efecto fotoacústico (J. Li et al., 2020), mientras que en la segunda la formación de vías interconectadas de material de relleno disperso aleatoriamente introduce una red de percolación que proporciona generación de calor resistiva al paso de una corriente eléctrica que activa la capacidad intrínseca de autorreparación de la matriz termoplástica, al proporcionar la energía de activación necesaria para lograr la difusión de la cadena polimérica en la zona dañada (Loura et al., 2023). En conjunto, estas aplicaciones demuestran que la integración de nanorellenos transforma a las matrices poliméricas de simples soportes estructurales en sistemas dinámicos y funcionales.

5. Propuesta de síntesis de un nanocompuesto polimérico a base de glicerol

El glicerol es un líquido viscoso, hidrofílico, incoloro, inodoro y de sabor dulce, que se obtiene de materias primas naturales o petroquímicas (Benjumea et al., 2009). El glicerol es una molécula capaz de reaccionar consigo misma para generar polímeros, conocidos comúnmente como poligliceroles (Martínez, 2010). Estos compuestos contienen grupos hidroxilo enlazados mediante enlaces éter, siendo el diglicerol el más sencillo, ver figura 9. Si los grupos hidroxilo primarios son los que reaccionan, se obtiene un producto lineal, mientras que la reacción de los grupos hidroxilo secundarios da lugar a moléculas con estructuras ramificadas (Martínez, 2010).

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

Figura 9*Imagen representativa del diglicerol*

Tomado de (Salehpour & Dubé, 2011)

Los poligliceroles (PG) que también son altamente hidrófilos por la gran densidad de grupos hidróxilos en ellos, pueden ser obtenidos utilizando diversas materias primas y rutas de polimerización, por ejemplo, la polimerización aniónica de apertura de anillo del glicidol o carbonato de glicerol utilizando catalizadores alcalinos (Sunder et al., 1999), también se ha estudiado la obtención de poligliceroles a partir de glicerol por medio de la polimerización de un solo paso utilizando catalizadores ácidos y básicos (Ardila-Suárez et al., 2015; Salehpour et al., 2012; Salehpour & Dubé, 2011). Para este trabajo en particular se tomará como referencia la ruta de síntesis seguida por (Salehpour et al., 2012) para la obtención de PG en la que se realiza un proceso de eterificación catalítica de glicerol usando una reacción de polimerización de crecimiento de una etapa utilizando ácido sulfúrico como catalizador. El método seleccionado para la obtención del nanocompuesto es la polimerización *in situ*. Esta técnica permite la síntesis simultánea de la matriz de poliglicerol y la incorporación de los nanorefuerzos en una sola etapa.

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

5.1 Cálculo parámetros de solubilidad de Hansen para el poliglicerol y distintos rellenos

Para la selección del relleno se realizó un estudio teórico de la afinidad entre los solutos y la matriz polimérica mediante los parámetros de afinidad de Hansen (HSP). Aunque el modelo fue desarrollado originalmente para evaluar la solubilidad de los polímeros, recientemente se ha extendido su aplicación para caracterizar las dispersiones de partículas en ellos (Chalmpes et al., 2024). Según este modelo la solubilidad o afinidad de cualquier sustancia puede ser descrita en términos de 3 parámetros claves que surgen de 3 interacciones diferentes, las interacciones de dispersión (δ_d), polar (interacciones dipolo-dipolo) (δ_p) y de puentes de hidrogeno (δ_h) (Bapat et al., 2021).

El parámetro de solubilidad es definido como la suma de esas tres interacciones como se muestra en la ecuación 1

$$\delta_t^2 = \delta_d^2 + \delta_p^2 + \delta_h^2 \quad \text{Ecuación 1}$$

Cualquier sustancia puede representarse como un punto en un gráfico tridimensional (3D) utilizando los tres parámetros como coordenadas. La solubilidad de un soluto evaluada frente a una serie de solventes se representa mediante la esfera más pequeña con un radio R_a , donde los buenos solventes se encuentran dentro de la esfera, mientras los poco compatibles se encuentran fuera. Es posible conocer el valor de R_a con la ecuación 2:

$$R_a^2 = 4(\delta_{d2} - \delta_{d1})^2 + (\delta_{p2} - \delta_{p1})^2 + (\delta_{h2} - \delta_{h1})^2 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde los subíndices 1 y 2 corresponden al soluto y al solvente respectivamente, según este método entre menor sea la distancia entre ambos en el espacio tridimensional de Hansen, mayor será su afinidad termodinámica (Bapat et al., 2021; Chalmpes et al., 2024). Para determinar si dicha distancia representa una compatibilidad efectiva, se calcula el Diferencial de Energía Relativa (RED), comparando el valor de R_a con el radio de interacción (R_0) del polímero, el cual es calculado de forma experimental o mediante software especializado como HSPiP (*Hansen Solubility Parameters in Practice*). El R_0 define una esfera de solubilidad en donde cualquier

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

material que se encuentre dentro de esa esfera se considera compatible, el RED se calcula utilizando la ecuación 3, como se muestra a continuación:

$$RED = \frac{R_a}{R_0} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde,

1. $RED < 1$: Alta afinidad. El nanorrelleno se dispersará espontáneamente o con muy poca energía.
2. $RED = 1$: El sistema está en el límite. La compatibilidad es parcial.
3. $RED > 1$: Baja afinidad. El nanorrelleno tenderá a aglomerarse

5.1.1 Cálculo parámetros para el poliglicerol

Para obtener los parámetros de solubilidad del poliglicerol se utilizó el método de Hoftyzer-Van Krevelen, que se basa en la contribución de grupos, el cual establece que las propiedades termodinámicas de un polímero pueden estimarse mediante la sumatoria de las contribuciones energéticas de los grupos funcionales que conforman su unidad repetitiva (Barton, 1991). El método descompone la energía de cohesión total en tres interacciones específicas, con componentes de dispersión F_{di} , componente polar F_{pi} y componente de puente de hidrogeno E_{hi} , normalizadas por el volumen molar de la unidad estructural, las ecuaciones 4,5,6 representan el cálculo de cada uno de los parámetros.

$$\delta_d = \frac{\sum F_{di}}{V} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\delta_p = \frac{\sqrt{\sum F_{pi}^2}}{V} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\delta_h = \sqrt{\sum E_{hi} / V} \quad \text{Ecuación 6}$$

El volumen molar (V) se obtuvo mediante la sumatoria de los volúmenes incrementales de los grupos metileno ($-CH_2-$), metino ($>CH-$), hidroxilo ($-OH$), y éter ($-O-$) obtenidos de las tablas en el anexo 1. Posteriormente, se aplicaron las constantes de Hoftyzer-Van Krevelen (Anexo 1) correspondientes a cada fragmento molecular y se realizó su sumatoria para obtener las

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

coordenadas en el espacio tridimensional de Hansen. Obteniendo así los valores: $\delta_d = 16.15 \text{ MPa}^{1/2}$, $\delta_p = 11.12 \text{ MPa}^{1/2}$, $\delta_h = 19.99 \text{ MPa}^{1/2}$

Para los fines de este proyecto, los parámetros de solubilidad de los nanorrellenos se tomaron de literatura científica donde fueron determinados experimentalmente, en algunos casos se utilizó el promedio de los diferentes datos obtenidos. Es importante señalar que la variabilidad de estos datos según la fuente introduce un margen de incertidumbre en los cálculos. Por ello, este análisis busca ser una aproximación teórica para identificar tendencias de afinidad relleno-matriz. Los resultados obtenidos sirven como base para proponer hipótesis de compatibilidad que deberán ser contrastadas mediante ensayos experimentales específicos en etapas futuras de la investigación. Adicionalmente los rellenos escogidos fueron aquellos usados en alguna aplicación como mejoradores de conductividad térmica, en la tabla 7 se presentan los rellenos con sus parámetros correspondientes

Tabla 7

Parámetros de solubilidad de Hansen para cada uno de los rellenos

Rellenos	δ_d [$\text{MPa}^{1/2}$]	δ_p [$\text{MPa}^{1/2}$]	δ_h [$\text{MPa}^{1/2}$]	Referencia
Óxido de grafeno	18.5	10,9	17.7	(Konios et al., 2014; Pereira et al., 2024)
Nanotubos de carbono de pared simple	17.8	7.5	7.6	(Luo et al., 2020; Pereira et al., 2024)
Nanoplacas de grafeno	18	9.3	7.7	(Chalmpes et al., 2024; Slobodian et al., 2024; Zuaznabar-Gardona & Fragoso, 2019)
Nanotubos de nitruro de boro	16.8	10.7	14.7	(Torres Castillo et al., 2020)
Nitruro de boro	16.6	8.2	21.3	(Chalmpes et al., 2024)

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

Luego de obtener los parámetros de solubilidad, se determinaron las distancias en el espacio de Hansen que servirán de base para la elección del nanorrelleno. Tanto para los nanohilos de cobre como para el óxido de erbio, no fue posible hallar publicaciones con valores exactos de estos parámetros. En el caso de los nanohilos de cobre su síntesis se da habitualmente por vía Húmeda “Bottom-up” lo que resulta en recubrimientos de diferente naturaleza que alteran sus propiedades (Ye et al., 2016), por lo que no se encontraron valores estandarizados para ellos. En la tabla 6 se presentan los resultados de R_a para cada uno de los rellenos junto con otros criterios de selección. La teoría propone que se debe establecer la relación entre el radio de interacción R_o del poliglicerol y el R_a de cada uno de los rellenos, sin embargo, el R_o del polímero es un dato que se obtiene de forma experimental o software especializado por lo que se tendrá como criterio de decisión los R_a más pequeños.

5.2. Elección del relleno

Para la elección del relleno se tuvieron en cuenta los compuestos utilizados en alguna aplicación de conductividad térmica, su conductividad térmica, el tipo de tratamiento del relleno, los costos y R_a . En la tabla 8 se resumen estos datos

Tabla 8
Criterios de selección del relleno

Material de relleno	Conductividad térmica W/m*K	R_a [$MPa^{1/2}$]	Costos
Nanotubos de carbono (CNT)	2000-6000 (Pezzana et al., 2021)	13.32	\$1,506.66 USD/g Sigma-Aldrich, 2025
Óxido de Grafeno	10 – 200, ~3000 (Pezzana et al., 2021)	5.25,	\$195.96 USD/g (Sigma-Aldrich, 2025)
Nanoplaquetas de grafeno	~3000 (Pezzana et al., 2021)	12.95	\$0.55USD/g (Sigma-Aldrich, 2025)

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

Nanohilos de cobre	390 (Tsai et al., 2021)	-	\$44.8 USD/ ml (se vende diluido en etanol) (Sigma-Aldrich, 2025)
Nitruro de boro (h-BN)	250-390 (Pezzana et al., 2021; Wong et al., 2023)	3.32	\$3.4 USD/g(Sigma-Aldrich, 2025)
Nanotubos de nitruro de boro	~200 (Wong et al., 2023)	5,46	\$1,191.31 USD/g (Sigma-Aldrich, 2025)
Er ₂ O ₃	14.3 (Mamani et al., 2021)	-	8,23 USD/g (Sigma-Aldrich, 2025)

Los primeros materiales descartados fueron aquellos que presentaron distancias de Hansen R_a significativamente elevadas, como los nanotubos de carbono y las nanoplaquetas de grafeno, lo que sugiere una baja afinidad termodinámica con la matriz. Luego, se excluyó el óxido de erbio debido a su limitada conductividad térmica y falta de datos sobre sus parámetros de solubilidad. De la misma forma los nanohilos de cobre, fueron descartados debido a la incertidumbre respecto a sus parámetros. Finalmente, de entre los candidatos con menores valores de R_a , se seleccionó el nitruro de boro (BN), dado que ofrece una conductividad térmica superior y una mejor viabilidad económica frente al óxido de grafeno y los nanotubos de nitruro de boro, respectivamente. A nuestro conocimiento, no existe publicaciones en las que se estudien la síntesis de polímeros nanocompuestos de poliglicerol y nanohojas de nitruro de boro, por consiguiente, se propondrá un método teórico que pueda ayudar a la síntesis de este último.

Tradicionalmente se considera el nitruro de boro hexagonal es hidrófobo, sin embargo Lin et al. (2011) demostraron que el agua es eficaz para exfoliar las estructuras de h-BN con la ayuda de la sonicación, sin el uso de surfactantes o funcionalización orgánica. El método descrito en este trabajo consistió en un procedimiento donde el polvo de h-BN prístino (20 mg) se sonificó en agua desionizada (10 ml) utilizando un sonificador de baño (40 kHz) durante 8 horas. La suspensión resultante se centrifugó a 3000 RPM. El sobrenadante se pasó a través de un papel de filtro grueso (Whatman de celulosa) y el filtrado se recolectó como la dispersión acuosa limpia de nanohojas de h-BN. El método anteriormente descrito será el mismo que se utilizará para la

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

funcionalización de las nanohojas de nitruro de bromo en la síntesis del nanocompuesto a base de glicerol, siguiendo las proporciones 2mg de BN-h/ml de agua.

Luego de obtener la dispersión acuosa con las nanohojas, esta se mezclará con el monómero glicerol y se someterá a polimerización por eterificación. Teniendo en cuenta las publicaciones de (Ardila-Suárez et al., 2015; Salehpour & Dubé, 2011) donde exponen los parámetros y equipos necesarios para llevar a cabo la polimerización del glicerol, el procedimiento y condiciones que se llevarán a cabo son los siguientes:

La mezcla BN-h/ monómero se llevará a un reactor de vidrio en ambiente inerte (atmósfera de nitrógeno) con un agitador mecánico que impida la aglomeración de las nanohojas entre 200-250 rpm (valor utilizado para otros rellenos utilizados en polimerización in situ (Gerasin et al., 2022)). El agua será continuamente removida de la mezcla de reacción por una bomba de vacío, ya que el agua limita el crecimiento de cadena. Salehpour & Dubé, (2011) utilizaron una temperatura de reacción de 140° C, controlada con un baño de calentamiento y una presión por debajo de 26kPa, la concentración de catalizador utilizada será de 4.8 wt% (Salehpour et al., 2012). Los productos de la polimerización se neutralizan con NaOH al 0.1N y se secarán a 80°C por 24h. Salehpour et al., (2012) proponen detener la reacción al 72 mol% de conversión de grupos hidroxilos con el fin de evitar la gelación. De esta forma se esperan obtener un nanocompuesto polimérico a base de glicerol y nanohojas de nitruro de boro hexagonal.

6. Conclusiones

A partir de las investigaciones estudiadas se evidencia que, en los últimos años aumentó progresivamente el interés por la investigación en los nanocompuestos poliméricos, específicamente en lo correspondiente a aplicaciones como mejoradores de conductividad debido al aumento en la tendencia de la miniaturización de circuitos utilizados en dispositivos electrónicos en la que son usados estos polímeros. Asimismo, se evidencia que el tratamiento superficial de los rellenos es un aspecto que tiene mucha relevancia al momento de sintetizar los nanocompuestos poliméricos, ya que cerca del 48.4% de las publicaciones reportaron dicho tratamiento.

Se identificaron diferentes métodos de síntesis siendo la intercalación de soluciones y la polimerización in situ y el procesamiento por fusión los que contaron con mayor cantidad de publicaciones, y en cuanto a la aplicación como conductores térmicos las aplicaciones como TIM y EMI son las más utilizadas, requiriendo que los nanocompuestos posean tanto propiedades conductoras como de aislamiento eléctrico.

Se propuso un método de síntesis por medio de polimerización in situ de un nanocompuesto polimérico a base de poliglicerol y nitruro de boro hexagonal, se escogió este relleno debido a su alta conductividad térmica, facilidad para lograr compatibilidad con el monómero glicerol y su bajo precio. Se espera que este método ayude a futuras investigaciones del grupo GIP que buscan contribuir a la disminución de las islas de calor en las ciudades.

Referencias Bibliográficas

- Akintola, T. M., Tran, P., Sweat, R. D., & Dickens, T. (2021a). Thermomechanical Multifunctionality in 3D-Printed Polystyrene-Boron Nitride Nanotubes (BNNT) Composites. *Journal of composites science*, 5(2). <https://doi.org/10.3390/jcs5020061>
- Akintola, T. M., Tran, P., Sweat, R. D., & Dickens, T. (2021b). Thermomechanical Multifunctionality in 3D-Printed Polystyrene-Boron Nitride Nanotubes (BNNT) Composites. *JOURNAL OF COMPOSITES SCIENCE*, 5(2). <https://doi.org/10.3390/jcs5020061>
- Al Sheheri, S. Z., Al-Amshany, Z. M., Al Sulami, Q. A., Tashkandi, N. Y., Hussein, M. A., & El-Shishtawy, R. M. (2019). The preparation of carbon nanofillers and their role on the performance of variable polymer nanocomposites. *Designed Monomers and Polymers*, 22(1), 8–53. <https://doi.org/10.1080/15685551.2019.1565664>
- Al-Ojeery, A., & Farea, M. O. (2023). Optical and dielectric properties of polymer nanocomposite based on PEG/NaAlg blend and Ag/Au nanoparticles prepared by green synthesis method for energy storage applications. *Optical and quantum electronics*, 55(11). <https://doi.org/10.1007/s11082-023-05243-4>
- Ardila-Suárez, C., Rojas-Avellaneda, D., & Ramirez-Caballero, G. E. (2015). Effect of Temperature and Catalyst Concentration on Polyglycerol during Synthesis. *International Journal of Polymer Science*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/910249>
- Bapat, S., Kilian, S. O., Wiggers, H., & Segets, D. (2021). Towards a framework for evaluating and reporting Hansen solubility parameters: applications to particle dispersions. *Nanoscale Advances*, 3(15), 4400–4410. <https://doi.org/10.1039/D1NA00405K>
- Barton, A. F. M. . (1991). *CRC handbook of solubility parameters and other cohesion parameters* (2a ed.). CRC Press.
- Benjumea Pedro Nel, Agudelo John, & Rios Luis. (2009). *Biodiésel: Producción, calidad y caracterización* . Universidad de Antioquia.
- Bhattacharya, S. K., & Tummala, R. R. (2001). Integral passives for next generation of electronic packaging: application of epoxy/ceramic nanocomposites as integral capacitors. *Microelectronics Journal*, 32(1), 11–19. [https://doi.org/10.1016/S0026-2692\(00\)00104-X](https://doi.org/10.1016/S0026-2692(00)00104-X)

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

- Bin Bakri, M. K., Rahman, M. R., Yurkin, Y., Burkov, A., Kuok, K. K., Jayamani, E., Yun, C. M., & Omoregie, A. I. (2022). Resources and energy recovery with recycled plastic biocomposites. *Recycled Plastic Biocomposites*, 261–280. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88653-6.00004-3>
- Blattmann, C. O., & Pratsinis, S. E. (2018). Single-Step Fabrication of Polymer Nanocomposite Films. *MATERIALS*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/ma11071177>
- Chalmpes, N., Bourlinos, A. B., Alsmail, A. W., Aljarrah, A. S., Salmas, C. E., Karakassides, M. A., & Giannelis, E. P. (2024). First synthesis of 2D materials by hypergolic reactions and evaluation of their dispersions for ink formulation: hexagonal boron nitride and fluorinated carbon nanosheets. *Materials Research Express*, 11(3). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad2d42>
- Chen, J., Gao, X., & Song, W. (2019). Effect of various carbon nanofillers and different filler aspect ratios on the thermal conductivity of epoxy matrix nanocomposites. *Results in Physics*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102771>
- Colonna, S., Bernal, M. M., Gavoci, G., Gomez, J., Novara, C., Saracco, G., & Fina, A. (2017a). Effect of processing conditions on the thermal and electrical conductivity of poly (butylene terephthalate) nanocomposites prepared via ring-opening polymerization. *MATERIALS & DESIGN*, 119, 124–132. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.01.067>
- Colonna, S., Bernal, M. M., Gavoci, G., Gomez, J., Novara, C., Saracco, G., & Fina, A. (2017b). Effect of processing conditions on the thermal and electrical conductivity of poly (butylene terephthalate) nanocomposites prepared via ring-opening polymerization. *Materials and Design*, 119, 124–132. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.01.067>
- Colonna, S., Bernal, M. M., Gavoci, G., Gomez, J., Novara, C., Saracco, G., & Fina, A. (2017c). Effect of processing conditions on the thermal and electrical conductivity of poly (butylene terephthalate) nanocomposites prepared via ring-opening polymerization. *Materials & design*, 119, 124–132. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.01.067>
- Duan, C. Q., Long, F., Shi, X. L., Wang, Y. T., Dong, J. J., Ying, S. T., Li, Y. S., Cheng, Y. C., Guo, J. J., Xu, G. J., & Sun, A. H. (2023). MWCNTs-GNPs Reinforced TPU Composites with Thermal and Electrical Conductivity: Low-Temperature Controlled DIW Forming. *MICROMACHINES*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/mi14040815>

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

- Eom, H. S., Kim, D. W., Jang, K. S., & Lee, S. J. (2023a). Electrical and Thermal Properties of Surface-Modified Copper Nanowire/Polystyrene Nanocomposites through Latex Blending. *ACS OMEGA*, 8(49), 46955–46966. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c06775>
- Eom, H. S., Kim, D. W., Jang, K.-S., & Lee, S. J. (2023b). Electrical and Thermal Properties of Surface-Modified Copper Nanowire/Polystyrene Nanocomposites through Latex Blending. *ACS Omega*, 8(49), 46955–46966. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c06775>
- Fawaz, J., & Mittal, V. (2015). *Synthesis of Polymer Nanocomposites: Review of Various Techniques*.
- Gerasin, V. A., Kurenkov, V. V., & Mendelev, D. I. (2022). Successive Modification of Montmorillonite with Quaternary Alkylammonium Salts of Various Structures as a Method of Preparing Nanofillers for in situ Synthesis of Polymer Nanocomposites. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 95(1), 59–69. <https://doi.org/10.1134/S1070427222010086>
- Gómez-Romero, P., Chojak, M., Cuentas-Gallegos, K., Asensio, J. A., Kulesza, P. J., Casañ-Pastor, N., & Lira-Cantú, M. (2003). Hybrid organic–inorganic nanocomposite materials for application in solid state electrochemical supercapacitors. *Electrochemistry Communications*, 5(2), 149–153. [https://doi.org/10.1016/S1388-2481\(03\)00010-9](https://doi.org/10.1016/S1388-2481(03)00010-9)
- Grimes, S., & Du, D. (2022). China’s emerging role in the global semiconductor value chain. *Telecommunications Policy*, 46(2), 101959. <https://doi.org/10.1016/J.TELPOL.2020.101959>
- Hansen, C. M. (2007). *Hansen Solubility Parameters*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420006834>
- Heng, C., Liu, M., Wang, K., Deng, F., Huang, H., Wan, Q., Hui, J., Zhang, X., & Wei, Y. (2015). Biomimic preparation of highly dispersible silica nanoparticles based polymer nanocomposites. *Ceramics International*, 41(10), 15075–15082. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2015.08.072>
- Hong, H., Kim, J., & Kim, T. (2017). Effective Assembly of Nano-Ceramic Materials for High and Anisotropic Thermal Conductivity in a Polymer Composite. *Polymers*, 9(9), 413. <https://doi.org/10.3390/polym9090413>
- Houshi, M. N., Albozahid, M., & Naji, H. Z. (2024). Critical Review: Graphene Production Methods and its Polymer Nanocomposites. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 63(17), 2327–2363. <https://doi.org/10.1080/25740881.2024.2372805>

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

- Hu, Y., Du, G., & Chen, N. (2016). A novel approach for Al₂O₃/epoxy composites with high strength and thermal conductivity. *Composites Science and Technology*, 124, 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.01.010>
- Huang, C., Qian, X., & Yang, R. (2018a). 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>
- Huang, C., Qian, X., & Yang, R. (2018b). 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>
- Jiang, W., Xiao, J., Yuan, D., Lu, H., Xu, S., & Huang, Y. (2018). Design and experiment of thermoelectric asphalt pavements with power-generation and temperature-reduction functions. *Energy and Buildings*, 169, 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.049>
- Kang, D., Hwang, S., Jung, B., & Shim, J. (2021). Characterizations of Polypropylene/Single-Walled Carbon Nanotube Nanocomposites Prepared by the Novel Melt Processing Technique with a Controlled Residence Time. *PROCESSES*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/pr9081395>
- Khan, M. I., Akhter, T., Siddiqi, H. M., Lee, Y. J., Park, H., ul Hassan, M., & Park, C. H. (2022). Oligoimide-Mediated Graphene Oxide-Epoxy Nanocomposites with Enhanced Thermal Conductivity and Mechanical Properties. *MICROMACHINES*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/mi13091379>
- Kochetov, R., Andritsch, T., Lafont, U., Morshuis, P. H. F., Picken, S. J., & Smit, J. J. (2009). Thermal behaviour of epoxy resin filled with high thermal conductivity nanopowders. *2009 IEEE Electrical Insulation Conference*, 524–528. <https://doi.org/10.1109/EIC.2009.5166402>
- Konios, D., Stylianakis, M. M., Stratakis, E., & Kymakis, E. (2014). Dispersion behaviour of graphene oxide and reduced graphene oxide. *Journal of Colloid and Interface Science*, 430, 108–112. <https://doi.org/10.1016/J.JCIS.2014.05.033>
- Lapinska, A., Grochowska, N., Filak, K., Duzynska, A., Polanski, M., Wyrebska, I., Józwik, P., Golofit, T., Dydek, K., Michalski, P. P., & Plichta, A. (2024). Flexible carbon-based fluoropolymer composites for effective EMI shielding and heat dissipation. *POLYMER COMPOSITES*, 45(5), 4319–4337. <https://doi.org/10.1002/pc.28061>
- Lee, W., Kang, Y. H., Lee, J. Y., Jang, K. S., & Cho, S. Y. (2017). Hot-pressing for improving performance of CNT/conjugated polymer thermoelectric films and power generators.

- MATERIALS TODAY COMMUNICATIONS*, 10, 41–45.
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2016.12.002>
- Li, H., Chen, Y., & Xie, Y. (2003). Photo-crosslinking polymerization to prepare polyanhydride/needle-like hydroxyapatite biodegradable nanocomposite for orthopedic application. *Materials Letters*, 57(19), 2848–2854. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(02\)01386-1](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)01386-1)
- Li, J., Xu, J., Liu, X., Zhang, T., Lei, S., Jiang, L., Ou-Yang, J., Yang, X., & Zhu, B. (2020). A novel CNTs array-PDMS composite with anisotropic thermal conductivity for optoacoustic transducer applications. *Composites Part B: Engineering*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108073>
- Lin, Y., Williams, T. V., Xu, T. B., Cao, W., Elsayed-Ali, H. E., & Connell, J. W. (2011). Aqueous dispersions of few-layered and monolayered hexagonal boron nitride nanosheets from sonication-assisted hydrolysis: Critical role of water. *Journal of Physical Chemistry C*, 115(6), 2679–2685. <https://doi.org/10.1021/jp110985w>
- Liu, B., Zhou, Y. H., Zhou, Y., Li, Z. Y., Cheng, L., & Liu, W. F. (2025a). Synergistic enhancement of high-temperature energy storage performance in polypropylene composites via hierarchical BNNS@BTNC nanofillers. *NANO RESEARCH*, 18(9). <https://doi.org/10.26599/NR.2025.94907632>
- Liu, B., Zhou, Y., Zhou, Y., Li, Z., Cheng, L., & Liu, W. (2025b). Synergistic enhancement of high-temperature energy storage performance in polypropylene composites via hierarchical BNNS@BTNC nanofillers. *Nano Research*, 18(9). <https://doi.org/10.26599/NR.2025.94907632>
- Loura, N., Gkartzou, E., Trompeta, A. F., Konstantopoulos, G., Klonos, P. A., Kyritsis, A., & Charitidis, C. A. (2023). Development of CNT-Based Nanocomposites with Ohmic Heating Capability towards Self-Healing Applications in Extrusion-Based 3D Printing Technologies. *C-JOURNAL OF CARBON RESEARCH*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/c9040111>
- Luo, Y., Chen, X., Wu, S., Cao, S., Luo, Z., & Shi, Y. (2020). Molecular Dynamics Simulation Study on Two-Component Solubility Parameters of Carbon Nanotubes and Precisely Tailoring the Thermodynamic Compatibility between Carbon Nanotubes and Polymers. *Langmuir*, 36(31), 9291–9305. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c01736>

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

- Mallakpour, S., & Khadem, E. (2014). Recent development in the synthesis of polymer nanocomposites based on nano-alumina. En *Progress in Polymer Science* (Vol. 51, pp. 74–93). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2015.07.004>
- Mamani, E., Silva, A., & Jimenez, M. (2021). *PROPIEDADES MECÁNICAS A BAJAS Y ALTAS TEMPERATURAS DEL ÓXIDO DE ERBIO*. Universidad de Sevilla.
- Martínez, D. (2010). *PRODUCCIÓN DE ÉSTERES DE POLIGLICEROL Y EVALUACIÓN DE DIFERENTES FORMULACIONES COMO PLASTIFICANTE DE PVC*.
- Minciencias. (s/f). *ANEXO 5. Technology Readiness Levels (TRL)*. Recuperado el 24 de marzo de 2026, de https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/convocatoria/anexo5_7.pdf
- Mittal, G., Dhand, V., Rhee, K. Y., Park, S. J., & Lee, W. R. (2015). A review on carbon nanotubes and graphene as fillers in reinforced polymer nanocomposites. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 21, 11–25. <https://doi.org/10.1016/J.JIEC.2014.03.022>
- Mohajerani, A., Bakaric, J., & Jeffrey-Bailey, T. (2017). The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of Environmental Management*, 197, 522–538. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2017.03.095>
- Moradi, A., & Stachewicz, U. (2025). Enhancing Thermal Conductivity in Electrospun Polymer Structures for Heat Management Applications. *Small Structures*, 6(10). <https://doi.org/10.1002/sstr.202500102>
- Mukherjee, P., Rani, A., & Saravanan, P. (2019). Polymeric materials for 3D bioprinting. *3D Printing Technology in Nanomedicine*, 63–81. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815890-6.00004-9>
- Musto, P., Russo, P., Cimino, F., Acierno, D., Lupò, G., & Petrarca, C. (2015). Dielectric behavior of biopolymer based composites containing multi wall carbon nanotubes: Effect of filler content and aspect ratio. *European Polymer Journal*, 64, 170–178. <https://doi.org/10.1016/J.EURPOLYMJ.2015.01.010>
- Ningaraju, S., Jagadish, K., Srikantaswamy, S., Gnana Prakash, A. P., & Ravikumar, H. B. (2019). Synthesis of graphite oxide nanoparticles and conductivity studies of PSF/GO and PSAN/GO polymer nanocomposites. *Materials Science and Engineering: B*, 246, 62–75. <https://doi.org/10.1016/J.MSEB.2019.06.002>

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

- Nwakaire, C. M., Onn, C. C., Yap, S. P., Yuen, C. W., & Onodagu, P. D. (2020). Urban Heat Island Studies with emphasis on urban pavements: A review. *Sustainable Cities and Society*, 63, 102476. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102476>
- Okada, A., & Usuki, A. (2007, abril 16). *Twenty-Year Review of Polymer-Clay Nanocomposites at Toyota Central R&D Labs., Inc.* <https://doi.org/10.4271/2007-01-1017>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Pereira, C. N., Paim, L., da Cruz, J. A., Dall Agnol, L., Mauler, R. S., & Bianchi, O. (2024). Determination of carbon nanoparticle dispersion solubility parameters using the classic Hansen and the DiPEVa method. *Journal of Molecular Liquids*, 393. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.123540>
- Petrychuk, M. V., Oliynyk, V. V., Zagorodnii, V. V., Ogurtsov, N. A., & Pud, A. A. (2023). PVDF/poly(3-methylthiophene)/MWCNT nanocomposites for EMI shielding in the microwave range. *HELIYON*, 9(12). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23101>
- Pezzana, L., Riccucci, G., Spriano, S., Battegazzore, D., Sangermano, M., & Chiappone, A. (2021). 3D Printing of PDMS-Like Polymer Nanocomposites with Enhanced Thermal Conductivity: Boron Nitride Based Photocuring System. *NANOMATERIALS*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/nano11020373>
- Phelan, P. E., Kaloush, K., Miner, M., Golden, J., Phelan, B., Silva, H., & Taylor, R. A. (2015). Urban Heat Island: Mechanisms, Implications, and Possible Remedies. *Annual Review of Environment and Resources*, 40, 285–307. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102014-021155>
- Puca Pacheco, M., Tacuri Calanchi, E., Pantoja Cadillo, A., Guadalupe Neira Velázquez, M., & Canché Escamilla, G. (s/f). Síntesis de nanocompuestos poliméricos con grafeno y su caracterización mecánica. En *Rev Soc Quím Perú* (Vol. 83, Número 1).
- Pullanchiyodan, A., Nair, K. S., & Surendran, K. P. (2017). Silver-Decorated Boron Nitride Nanosheets as an Effective Hybrid Filler in PMMA for High-Thermal-Conductivity

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

- Electronic Substrates. *ACS OMEGA*, 2(12), 8825–8835.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.7b01436>
- Quiles, S. (2019). *Estrategias de funcionalización de grafeno para el desarrollo de nanocompuestos de matriz termoplástica*. Universidad Autónoma de Madrid .
- Rehman, S. U., Javaid, S., Shahid, M., Ahmad, N. M., Rashid, B., Szczepanski, C. R., & Shahzad, A. (2023). The Synergistic Effect of Polystyrene/Modified Boron Nitride Composites for Enhanced Mechanical, Thermal and Conductive Properties. *POLYMERS*, 15(1).
<https://doi.org/10.3390/polym15010235>
- Salehpour, S., & Dubé, M. A. (2011). Towards the sustainable production of higher-molecular-weight polyglycerol. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 212(12), 1284–1293.
<https://doi.org/10.1002/macp.201100064>
- Salehpour, S., Zuliani, C. J., & Dubé, M. A. (2012). Synthesis of novel stimuli-responsive polyglycerol-based hydrogels. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 114(1), 92–99. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201100049>
- Schechtel, E., Yan, Y. P., Xu, X. F., Cang, Y., Tremel, W., Wang, Z. Y., Li, B. W., & Fytas, G. (2017). Elastic Modulus and Thermal Conductivity of Thiolene/TiO₂ Nanocomposites. *Journal of physical chemistry c*, 121(45), 25568–25575.
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b08425>
- Shaikh, A. M., & Kubade, P. R. (2023). Effect of nanofillers on rolled polymer nanocomposites: A review. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.346>
- Shandong Dazhan Nano materials Co. (2024). *Carbon Nanotubes* . <https://cnanotube.com/>
- Sigma-Aldrich. (2024). *sigmaaldrich*.
<https://www.sigmaaldrich.com/CO/en/product/aldrich/796034>
- Slobodian, R., Olejnik, R., Dmonte, D. J., Sevcik, J., Matyas, J., Jurca, M., Pricilla, R. B., Hanulikova, B., Slobodian, P., & Kuritka, I. (2024). Giant Response and Selectivity of Hansen Solubility Parameters-Based Graphene-SBS Co-Polymer Matrix Composite Room Temperature Sensor to Organic Vapours. *Polymers*, 16(3), 309.
<https://doi.org/10.3390/polym16030309>
- Soleimani, E., & Niavarzi, F. B. (2018). Preparation, characterization and properties of PMMA/NiO polymer nanocomposites. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(3), 2392–2405. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-8158-x>

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

- Sreejivungsa, K., Kum-onsa, P., & Thongbai, P. (2023a). Synergistic enhancement of thermal and dielectric properties in PVDF films with Au-BaTiO₃ hybrid nanoparticles. *Nanocomposites*, 9(1), 203–214. <https://doi.org/10.1080/20550324.2023.2291622>
- Sreejivungsa, K., Kum-onsa, P., & Thongbai, P. (2023b). Synergistic enhancement of thermal and dielectric properties in PVDF films with Au-BaTiO₃ hybrid nanoparticles. *NANOCOMPOSITES*, 9(1), 203–214. <https://doi.org/10.1080/20550324.2023.2291622>
- Su, X., Lee, S. H., Hou, Y., Stanford, N., Meng, Q., Kuan, H.-C., Liu, X., & Ma, J. (2025a). Mechanochemically modified graphene nanoplatelets for high-performance polycarbonate composites. *Smart Materials in Manufacturing*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.smmf.2025.100072>
- Su, X., Lee, S. H., Hou, Y. Z., Stanford, N., Meng, Q. S., Kuan, H. C., Liu, X. H., & Ma, J. (2025b). Mechanochemically modified graphene nanoplatelets for high-performance polycarbonate composites. *SMART MATERIALS IN MANUFACTURING*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.smmf.2025.100072>
- Sunder, A., Hanselmann, R., Frey, H., & Mülhaupt, R. (1999). Controlled Synthesis of Hyperbranched Polyglycerols by Ring-Opening Multibranching Polymerization. *Macromolecules*, 32(13), 4240–4246. <https://doi.org/10.1021/ma990090w>
- Taha, T. A., & Mahmoud, M. H. (2021). Synthesis and characterization of PVDF-Er₂O₃ polymer nanocomposites for energy storage applications. *Materials Chemistry and Physics*, 270, 124827. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHEMPHYS.2021.124827>
- Tian, J., Zhang, H., Liu, M., Deng, F., Huang, H., Wan, Q., Li, Z., Wang, K., He, X., Zhang, X., & Wei, Y. (2015). A bioinspired strategy for surface modification of silica nanoparticles. *Applied Surface Science*, 357, 1996–2003. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2015.09.171>
- Torres Castillo, C. S., Bruel, C., & Tavares, J. R. (2020). Chemical affinity and dispersibility of boron nitride nanotubes. *Nanoscale Advances*, 2(6), 2497–2506. <https://doi.org/10.1039/d0na00136h>
- United Nations Human Settlements Programme. (2022). *world cities report 2022*.
- Uyor, U. O., Popoola, A. P. I., & Popoola, O. M. (2024). Chemically Functionalized Graphene-Boron Nitride/Polypropylene Nanocomposites with Enhanced Nanomechanical and Anti-wear Properties. *CHEMISTRY AFRICA-A JOURNAL OF THE TUNISIAN CHEMICAL SOCIETY*, 7(3), 1595–1604. <https://doi.org/10.1007/s42250-023-00824-y>

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

- Uyor, U. O., Popoola, P. A., & Popoola, O. M. (2022a). Enhanced mechanical and dynamic mechanical properties of polymer nanocomposites containing carbon nanotubes decorated with barium titanate. *POLYMERS & POLYMER COMPOSITES*, 30. <https://doi.org/10.1177/09673911221100160>
- Uyor, U. O., Popoola, P. A., & Popoola, O. M. (2022b). Enhanced mechanical and dynamic mechanical properties of polymer nanocomposites containing carbon nanotubes decorated with barium titanate. *POLYMERS & POLYMER COMPOSITES*, 30. <https://doi.org/10.1177/09673911221100160>
- Wang, C., Wang, Z.-H., Kaloush, K. E., & Shacat, J. (2021). Cool pavements for urban heat island mitigation: A synthetic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111171. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111171>
- Wang, Z. Z., Yang, Q. J., Zheng, X. M., Zhang, S., He, P., Han, R., & Chen, G. (2024). Fused Deposition Modeling of Isotactic Polypropylene/Graphene Nanoplatelets Composites: Achieving Enhanced Thermal Conductivity through Filler Orientation. *POLYMERS*, 16(6). <https://doi.org/10.3390/polym16060772>
- Wong, T. Lo, Vallés, C., Nasser, A., & Abeykoon, C. (2023). Effects of boron-nitride-based nanomaterials on the thermal properties of composite organic phase change materials: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 187, 113730. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2023.113730>
- Ye, S., Stewart, I. E., Chen, Z., Li, B., Rathmell, A. R., & Wiley, B. J. (2016). How Copper Nanowires Grow and How To Control Their Properties. *Accounts of Chemical Research*, 49(3), 442–451. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.5b00506>
- Yu, C. P., Gong, W. B., Zhang, J., Lv, W. B., Tian, W., Fan, X. D., & Yao, Y. G. (2018). Hot pressing-induced alignment of hexagonal boron nitride in SEBS elastomer for superior thermally conductive composites. *RSC ADVANCES*, 8(45), 25835–25845. <https://doi.org/10.1039/c8ra04700f>
- Yuan, F., Guan, Q., Dou, X., Yang, H., Hong, Y., Xue, Y., Cao, Z., Li, H., Xu, Z., & Qin, Y. (2024a). High-yield synthesis of hydroxylated boron nitride nanosheets and their utilization in thermally conductive polymeric nanocomposites. *Rsc Advances*, 14(30), 21230–21240. <https://doi.org/10.1039/d4ra02329c>

REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS

- Yuan, F., Guan, Q. H., Dou, X. H., Yang, H., Hong, Y. M., Xue, Y. W., Cao, Z. X., Li, H. Y., Xu, Z. X., & Qin, Y. Y. (2024b). High-yield synthesis of hydroxylated boron nitride nanosheets and their utilization in thermally conductive polymeric nanocomposites. *RSC ADVANCES*, *14*(30), 21230–21240. <https://doi.org/10.1039/d4ra02329c>
- Yuan, F., Guan, Q. H., Dou, X. H., Yang, H., Hong, Y. M., Xue, Y. W., Cao, Z. X., Li, H. Y., Xu, Z. X., & Qin, Y. Y. (2024c). High-yield synthesis of hydroxylated boron nitride nanosheets and their utilization in thermally conductive polymeric nanocomposites. *RSC ADVANCES*, *14*(30), 21230–21240. <https://doi.org/10.1039/d4ra02329c>
- Zaporotskova, I., Kakorina, O., Kozhitov, L., Muratov, D., Boroznina, N., Boroznin, S., & Panchenko, A. (2024). Polymer Nanocomposite Based on Pyrolyzed Polyacrylonitrile Doped with Carbon Nanotubes: Synthesis, Properties, and Mechanism of Formation. *POLYMERS*, *16*(10). <https://doi.org/10.3390/polym16101308>
- Zeng, G., Liu, M., Liu, X., Huang, Q., Xu, D., Mao, L., Huang, H., Deng, F., Zhang, X., & Wei, Y. (2016). Mussel inspired preparation of MoS₂ based polymer nanocomposites: The case of polyPEGMA. *Applied Surface Science*, *387*, 399–405. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2016.05.093>
- Zeng, X., Sun, J., Yao, Y., Sun, R., Xu, J.-B., & Wong, C.-P. (2017). A Combination of Boron Nitride Nanotubes and Cellulose Nanofibers for the Preparation of a Nanocomposite with High Thermal Conductivity. *ACS NANO*, *11*(5), 5167–5178. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b02359>
- Zhang, D. L., Zha, J. W., Li, C. Q., Li, W. K., Wang, S. J., Wen, Y., & Dang, Z. M. (2017). High thermal conductivity and excellent electrical insulation performance in double-percolated three-phase polymer nanocomposites. *Composites Science and Technology*, *144*, 36–42. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSCITECH.2017.02.022>
- Zuaznabar-Gardona, J. C., & Fragoso, A. (2019). Determination of the Hansen solubility parameters of carbon nano-onions and prediction of their dispersibility in organic solvents. *Journal of Molecular Liquids*, *294*, 111646. <https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2019.111646>