

Materiales y condiciones externas en los procesos físicos de aislamiento térmico

Materials and External Conditions in Physical Thermal Insulation Processes

LUIS ADOLFO ALVARENGA AGUILAR

Maestro en Gerencia y Gestión Ambiental

Docente-investigador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Universidad Católica de El Salvador, El Salvador

Email: luis.alvarenga@catolica.edu.sv

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4823-3084>

Fecha de recepción: 20-12-2024

Fecha de aceptación: 18-02-2025

Resumen

El artículo explora los materiales y condiciones que influyen en los procesos físicos de aislamiento térmico. Partiendo de un enfoque teórico sobre el calor y la temperatura, se destaca que la conductividad y la resistividad térmica, junto con propiedades como la capacidad calorífica, son determinantes en la eficiencia de los materiales aislantes. El estudio revisa fuentes bibliográficas de alto impacto para identificar materiales innovadores, como aerogeles y nanomateriales, que ofrecen tolerancia térmica y eficiencia con poco espesor. En cuanto a los resultados, se observa un interés creciente por materiales de origen biológico y por combinaciones orgánicas e inorgánicas, debido a su balance entre sostenibilidad y eficacia. Además, factores externos como la humedad afectan el desempeño térmico al reducir la capacidad aislante de las estructuras internas. Finalmente, se señala la importancia de optimizar las propiedades estructurales internas y de explorar materiales avanzados para mejorar la eficiencia energética en sistemas térmicos.

Palabras clave: Conductividad térmica, resistividad térmica, aislamiento térmico, aerogel, nanomateriales, nanocelulosa.

Abstract

This article explores the materials and conditions that influence physical thermal insulation processes. Based on a theoretical approach to heat and temperature, it highlights that thermal conductivity and resistivity, along with properties such as heat capacity, are key determinants of the efficiency of insulating materials. The study reviews high-impact bibliographic sources to identify innovative materials, such as aerogels and nanomaterials, which provide thermal tolerance and efficiency with minimal thickness.

Regarding the results, there is a growing interest in biologically derived materials and combinations of organic and inorganic materials due to their balance between sustainability and effectiveness. Additionally, external factors such as humidity affect thermal performance by reducing the insulating capacity of internal structures. Finally, the study emphasizes the importance of optimizing internal structural properties and exploring advanced materials to enhance energy efficiency in thermal systems.

Keywords: Thermal conductivity, thermal resistivity, thermal insulation, aerogel, nanomaterials, nanocellulose.

1. Introducción

El calor es un concepto que se utiliza con frecuencia en el habla cotidiana; sin embargo, cuando en física se habla de calor, se deben tomar en cuenta algunas consideraciones que podrían no coincidir con lo que comúnmente se supone que es el calor.

En tiempos pasados se tenía un concepto del calor como un fenómeno en el cual había un fluido sin masa ni color que pasaba de un cuerpo a otro. A este fluido se le llamaba *calórico* y se decía que cuanto más fluido calórico tuviese un cuerpo, mayor sería la temperatura que este alcanzaría. Luego, cuando dos cuerpos de distinta temperatura estuviesen en contacto, se transfería el calórico del cuerpo de mayor temperatura al de menor, provocando que la temperatura en uno bajara y en el otro subiera. Esta teoría del calórico daba solución a diversos fenómenos; sin embargo, algunos físicos no estaban satisfechos con ella (Alvarenga y Máximo, 1986).

Benjamin Thompson, quien fue conde de Rumford, trabajaba en una fábrica de cañones en Baviera, donde observó que en el proceso de torneado de los cañones estos se calentaban tanto que necesitaban ser enfriados con agua. Dicha situación le hizo sospechar que, si el calor era un fluido, debería agotarse en algún momento, lo cual no sucedía mientras se efectuaba el proceso de torneado. De esta manera, propuso que el calor era el resultado de la fricción entre el torno y el cañón, por tanto, el calor debía ser algún tipo de movimiento. Esta idea lo llevó a ser atacado por científicos de la época, ya que la teoría del calórico tenía más de 20 siglos. Fue casi medio siglo después cuando James Prescott Joule demostraría que el calor es un tipo de energía, al provocar un aumento de la temperatura mediante la acción de energía mecánica (Educar Cultural y Recreativa, 1997).

Actualmente se debe hacer una distinción entre la energía interna y el calor, ya que, aunque en ambos conceptos puede haber un cambio en la temperatura, no son términos intercambiables. La energía interna se refiere a toda la energía que es exclusiva de los componentes microscópicos que forman un cuerpo, sin importar la energía cinética macroscópica o la energía potencial gravitatoria externa; se debe solo a los movimientos y posición de los átomos. Si bien un aumento en la temperatura provoca un aumento en la energía interna, esta energía puede aumentar sin necesidad de cambios en la temperatura, pues es una energía intrínseca.

El calor, en cambio, es un fenómeno extrínseco, puesto que consiste en la transferencia de energía en un sistema y sus alrededores, dadas unas fronteras que se han especificado en un marco de referencia, que es nuestro campo de estudio, y una vecindad. Esta transferencia de energía se reconoce ya que hay un cambio en la temperatura (Serway y Jewett, 2018).

Dada la extensa historia que hubo con el fluido calórico, se utiliza una palabra similar, *caloría*, para medir el aumento de la temperatura en 1 °C (grado Celsius) en la cantidad de 1 g de agua, específicamente agua con una temperatura inicial cercana a 14.5 °C. Otra magnitud utilizada en el Sistema Internacional es la kilocaloría, que equivale a 1000 calorías. Estas son unidades energéticas; la Caloría, con “C” mayúscula, equivale a 1 kcal y se usa principalmente en temas de nutrición. Con el cambio de teorías del fluido calórico al calor como transferencia de energía, gracias a los experimentos realizados por Joule, se estableció que 1 cal equivale a 4.186 joules (J). Existen otras unidades de medida del calor, como las *British Thermal Units* (BTU), donde 1 BTU equivale a 1055 J (Giancoli, 2006).

Un concepto que se ha mencionado anteriormente es el de la temperatura; sin embargo, es necesario destacar que calor y temperatura no son lo mismo. La temperatura es la medida de qué tan frío o caliente está algo, utilizando instrumentos termométricos, el color o la radiación que emite (Giancoli, 2006).

La temperatura se mide con termómetros y actualmente hay tres escalas principales: la escala Celsius, que coloca el punto de congelación del agua en el número 0 (cero) y el punto de ebullición en el número 100 (cien), a una presión de 1 atmósfera (atm); por ello es conocida como la escala centígrada. William Thomson, también conocido como *Lord Kelvin*, consideró que debía haber una escala de temperatura que no utilizase números negativos. La escala absoluta coloca el punto de congelación del agua en 273.15 kelvin (K) y el punto de ebullición en 373.15 K. En la escala absoluta, el 0 (cero), llamado *cero absoluto*, es la temperatura más baja posible (Alvarenga y Máximo, 1986). Existe también la escala Fahrenheit (°F), donde el punto de congelación del agua está en 32 °F y el punto de ebullición en 212 °F (Giancoli, 2006).

Ya que el calor es realmente una forma de transferencia de energía, esta puede realizarse por cambios en la temperatura o por el trabajo efectuado durante un proceso. Por ello se necesita diferenciar entre un proceso *adiabático* y uno *isotérmico*: en el primero no hay cambios en la temperatura, aunque puede haber cambios en la energía por la realización de un trabajo. En cuanto a la transferencia de energía que se produce por cambios en la temperatura, se reconocen tres procesos: *conducción*, *convección* y *radiación* (Çengel y Boles, 2012).

La transferencia de calor por *conducción* sucede cuando dos cuerpos están en contacto directo y existe una diferencia de temperatura, donde los átomos cargados de energía chocan con sus vecinos, transfiriéndoles energía y calentándose hasta que se llega a un equilibrio térmico. Se considera un proceso lento en comparación con otros, ya que sucede en cuerpos sólidos. La rapidez con que se calienta un cuerpo depende del flujo de calor (H), cuya expresión es $H = \frac{Q}{t}$, siendo Q la cantidad de calor y t el tiempo. También puede conocerse el flujo de calor según el cambio en la temperatura, la constante de conductividad térmica (k) y el área (A), además de depender de la profundidad o largo del objeto (L). La fórmula puede expresarse como $H = kA \frac{(T_f - T_i)}{L}$, siendo T_f la temperatura final y T_i la temperatura inicial. La conductividad es inversa a la resistividad. En los procesos de conducción no suele haber transferencia de masa.

En cuanto a la *convección*, el calor se transfiere mediante el movimiento de un fluido, sea líquido o gas. En la mayoría de las sustancias, al ganar calor, su densidad disminuye, por lo que ascienden a capas superiores y desplazan las sustancias más frías hacia abajo. En el caso de la convección sí suele haber transferencia de masa, ya que los fluidos, al variar su temperatura, modifican la temperatura de lo que se encuentra a su alrededor.

La *radiación* es otra manera en que un cuerpo adquiere o cede energía por medio del calor. En este caso, la energía se transfiere por medio de ondas electromagnéticas, las cuales, al interactuar con otros cuerpos, los calientan de una manera particular según sus características. Como las ondas son de energía pura, no necesitan un medio físico para la transmisión del calor y pueden viajar por el espacio.

La energía irradiada varía según las siguientes características: la temperatura absoluta de un cuerpo elevada a la cuarta potencia, la superficie del cuerpo radiante y las propiedades de emisividad de dicha superficie. La potencia radiada (P) o el flujo de calor (H) es calculable mediante la *ley de Stefan-Boltzmann*, donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann, que equivale a $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$, y e es el valor de emisividad, dependiente de la naturaleza de la superficie radiante, con valores entre 0 y 1. Considérese que si un cuerpo es buen absorbente de radiación también será buen emisor y tendrá una superficie radiante con emisividad cercana a 1; por el contrario, si es mal absorbente también será mal emisor. La absorción y emisión de calor por radiación se realizan a la misma velocidad, y este tipo de equilibrio térmico se enuncia en la *ley de Prevost* (Gutiérrez, 2011).

Propiedades físicas de los materiales que determinan su capacidad de aislamiento térmico

En cuanto al aislamiento térmico, algunas propiedades físicas son especialmente relevantes. Una de ellas es la *resistividad térmica*, que es el inverso de la *conductividad térmica* anteriormente descrita. Un cuerpo cuya superficie radiante tienda a 0 tendrá menor capacidad de absorber y emitir calor, ya que se encuentra en el extremo opuesto de lo que, en el párrafo anterior, se expresó como buen absorbente y emisor de calor.

Otra propiedad física relevante es la *capacidad calorífica*, también llamada *capacidad térmica*, representada comúnmente por la letra C mayúscula, y que relaciona la cantidad de calor (Q), medida en calorías (cal) o en joules (J), por unidad de temperatura (T) en $^{\circ}\text{C}$ o K . En caso de trabajar con el sistema inglés es válido usar $^{\circ}\text{F}$, quedando la función $C = \frac{Q}{\Delta T}$. Cuando una sustancia tiene una alta capacidad calorífica, necesita recibir más energía para aumentar su temperatura; esta fórmula es válida al considerarse un aumento de temperatura global en todo el cuerpo del objeto de estudio.

Ya que cuerpos de diferentes masas, pero de la misma sustancia, presentan distintas capacidades caloríficas, al dividirse entre la masa de cada cuerpo se obtiene una unidad llamada *calor específico*, que puede representarse con “c” minúscula (Alvarenga y Máximo, 1986). Si se comparan dos objetos de la misma cantidad de materia, pero de diferente composición, el que tenga un calor específico más alto puede retardar más la transferencia del calor, al requerir más energía para aumentar su temperatura. Sin embargo, el valor de la *conductividad térmica* y su inverso, la *resistividad térmica* (k), son aún más relevantes.

Dado que en la actualidad existe el problema de la disponibilidad energética, y en ocasiones la demanda supera a la oferta, es necesario conocer qué materiales se han utilizado o se utilizan para el aislamiento térmico, así como los factores externos que pueden influir en la capacidad aislante. Considérese que, al contar con un apropiado aislamiento térmico, la cantidad de energía utilizada en calefacción o en enfriamiento se verá disminuida.

2. Desarrollo

Para la realización de este artículo de revisión documental se hizo uso de libros de física para el desarrollo teórico de las propiedades térmicas. Luego se utilizó la base de datos *Dimensions* para

obtener artículos relacionados experimentalmente con pruebas de aislamiento térmico. Al emplear las palabras clave “*thermal*” e “*isolation*” se obtuvieron 2,350 resultados, por lo que se aplicó el filtro de citations, para que se mostraran primero los resultados con mayor número de citas. Posteriormente se procedió a exportar los primeros 500 resultados en formato *xlsx*.

De esta base de datos se ordenó la información utilizando el software *Microsoft Excel* por autor, año de publicación, título, *abstract*, DOI y palabras clave. Se eliminaron los artículos que, por errores de metadatos, no presentaban *abstract*, quedando 499 resultados. Luego se aplicó un segundo filtro para mostrar únicamente artículos del año 2010 en adelante, reduciendo la selección a 328 artículos; sin embargo, se utilizaron algunos artículos previos a 2010 como referencia histórica, demostrando que este tema ha sido relevante a lo largo del tiempo.

Se procedió a leer el título y el *abstract*, y el artículo completo en caso de ser permisible, para conocer cuáles son las materias utilizadas en el aislamiento térmico y cuáles son los factores que inciden en su capacidad de aislamiento.

En las tablas 1–4 se muestran los resultados de la investigación en cuanto a la selección de los materiales aislantes recientemente estudiados.

Tabla 1
Materiales biológicos recientemente estudiados como aislantes térmicos

Origen del aislante	Aislante	Propiedades térmicas	Características complementarias
Paja de trigo y cáscaras de soja	Nanofibras de celulosa	Degradación de las nanofibras superó los 290 °C	Diámetros de la paja de 10-80 nm, diámetro de la soja de 20-120 nm
Kenaf (líber)	Nanofibras	Degradación de nanofibras en 351 °C	Fibras blanqueadas

Linaza (tallo)	Nanofibras de celulosa	Degradación en 347.4 °C	---
Palma de aceite (racimos de frutas vaciadas)	Nanofibras	Principal degradación en 339 °C ± 3 °C	---
Bambú	Nanofibras de celulosa	Degradación en 331.7° C	
Caña de azúcar (bagaso)	Fibras	Inicio de degradación en 270 °C	Fibras blanqueadas
Yute	Fibras	Inicio de degradación en 270 °C	Sin tratamiento previo
Helicteres isora	Nanofibras de celulosa	Punto máximo 450 °C	Componentes de lignina
Phoenix dactylifera L.	Fibra de palma datilera de alta cristalinidad	La degradación inicia a los 245.4 °C	78.6% de cristalinidad
Piña	Nanofibras de celulosa	La degradación máxima comienza en 344.49 °C	Cristalinidad del 77%
Pulpa termomecanizada	Nanocelulosa contenida en lignina	Estabilidad térmica máxima en 358 °C	Obtenido con disolvente ácido eutéctico profundo, amigable con el medio ambiente
Uva blanca	Piel de orujos de uva blanca	Conductividad térmica de 0.09 a 0.12 W/m*K	Conductividad medida en temperaturas de 40 a 200 °C
Hoja de maíz	Celulosa nanocristalina	La temperatura máxima soportada fue de 249 °C	Pretratamiento de blanqueo, cristalinidad del 89±2%
Bagaso de Agave Tequilana Weber	Celulosa por organosolv	Temperatura máxima soportada de 378 °C previa degradación	Cristalinidad del 63.5%

Tabla 2*Materiales inorgánicos y orgánicos recientemente estudiados como aislantes térmicos*

Aislante	Propiedades térmicas	Características complementarias	Características complementarias
Tierra, minerales, derivado de petróleo	Barro, piedra pómez basáltica, fibra plástica	Coefficiente de resistividad térmica de $4.95 \text{ m}^2\text{K/W}$	Composición en kg: barro 60, piedra pómez basáltica 10, fibra plástica 0.2
Derivado de petróleo y obtención tecnológica del oxirano	Panel PVC, polietilenglicol 600	Temperatura exterior 60°C , temperatura interior 40°C aproximadamente	Usado como paneles aislantes en paredes de construcción
Minerales y derivado del petróleo	Poliestireno de alto impacto, arena, cemento	Coefficiente de resistividad térmica de $3.7037 \text{ m}^2\text{K/W}$	Usando 50% de HIPS como sustituto de arena
Sólidos nanolaminados	Grafeno, WSe ₂ , MoS ₂ , SiO ₂	Según la combinación puede tener una conductividad térmica de 0.007 a $0.009 \text{ W/m}^2\text{K}$	Combinaciones de monocapas, materiales 2D
Derivado del petróleo, grafito, no metales	Grafeno funcionalizado con epoxy compuesta con fósforo en una matriz de poliuretano	Grafeno funcionalizado con epoxy compuesta con fósforo en una matriz de poliuretano	Utilizado como espuma retardante del fuego, supresor de humo y aislante térmico
Aerogel	Polímeros solubles de alcohol polivinil y alginato, con nano arcillas inorgánicas	Conductividad térmica de 0.025 a $0.042 \text{ W/m}^2\text{K}$	Presenta una densidad de 0.05 a 0.1 g/cm^3
Mineral y derivados de estireno	Vermiculita, cemento, residuos de poliestireno	Conductividad térmica de $0.09 \text{ W/m}^2\text{K}$	En la fabricación de mortero, soportando presiones de 0.57 a 5.89 Mpa

Tabla3*Materiales inorgánicos recientemente estudiados como aislantes térmicos*

Origen del aislante	Aislante	Propiedades térmicas	Características 31w w complementarias
Minerales	Cemento con diatomita	Coefficiente de resistividad térmica de $4.35 \text{ m}^2\text{K/W}$	Utilizado como material de construcción
Arcilla	Agregado ligero de arcilla expandida (LECA)	Coefficiente de resistividad térmica entre 2 y $7.27 \text{ m}^2\text{K/W}$	Valor menor al agregarse con arena y más alto al agregarse en concretos.

Silicio	Goma de silicona con microesferas huecas de vidrio (HGM)	Conductividad térmica de 0.165 W/m*K aproximadamente	Considerando que no hay HGM rotas.
Mineral	Zirconia ZrO ₂	Conductividad térmica de 3 W/m*K	Utilizado en fabricación de cerámicas finas
Aerogel monolítico (PNGA)	Nanocables de MnO ₂	Conductividad térmica de 0.21882 W/m*K	Los nanocables fueron tratados con óxido de grafeno reducido y una capa de polipirrol
Aerogel nanofibroso de sílice con estructura de red binaria	Nanofibras de SiO ₂	Conductividad térmica de 21.96 mW/m*K	Es capaz de resistir llamas de butano de ~1000 °C si el grosor es de 20 mm.
Mineral	Gel de montmorillonita	Conductividad térmica de 0.04366 W/m*K	Parte del diseño jerárquico HBG

Tabla 4*Material orgánico recientemente estudiado como aislante térmico*

Origen del aislante	Aislante	Propiedades térmicas	Características complementarias
Polímero conjugado	Cz-TzTz CMP	Presentó estabilidad térmica hasta los 623 °C	Considerando un área superficial de 1530 m ² /g

En la tabla 5 se muestra como existen diferentes tipos de materiales para aislamiento térmico, algunos presentan sus propiedades por factores de conductividad, otros por resistividad, y en el caso de los de origen biológico se puede observar que un valor importante es la temperatura que son capaces de tolerar.

Tabla 5*Conteo de tipos de materiales aislantes*

Tipo de aislante	Cantidad de materiales	Porcentaje
Biológico	14	56%
Combinación de orgánicos e inorgánicos	7	28%
Inorgánicos	3	12%
Orgánicos	1	4%
Total	25	100 %

La información de la tabla 5 expone el interés en los materiales de origen biológico, luego en segundo lugar y siendo la mitad del primer porcentaje se encuentran las diversas combinaciones de materiales orgánicos e inorgánicos, siguen en menor cantidad los completamente inorgánicos y completamente orgánicos.

3. Conclusión

Según los artículos revisados, como los de Hu *et al.* (2013) y Cao *et al.* (2018), un factor importante en la resistividad térmica es la cantidad de espacio lleno de aire en las estructuras que componen el material aislante. Pueden considerarse condiciones internas que afectan la capacidad de aislamiento el tamaño de la estructura y, como factores externos, la presencia de humedad, como menciona Pant (s.f.). Esto se debe a que el agua es mejor conductora térmica que el aire, y el agua llena las cavidades de los materiales aislantes.

Son materiales relevantes en el aislamiento térmico los aerogeles, que pueden tolerar altas temperaturas directamente con poco espesor (Liao *et al.*, 2019), y los nanomateriales monoatómicos, que, al considerarse materiales en

dos dimensiones, podrían tener una alta influencia en los recubrimientos si fuera posible fabricarlos y utilizarlos en equipos macroscópicos, como se describió por Vaziri *et al.* (2019).

Se identificaron diversos materiales útiles en el aislamiento térmico, destacándose los de origen biológico con capacidad para tolerar altas temperaturas, como las nanofibras de celulosa provenientes de *Helicteres isora*. Los aerogeles como el PNGA y los nanomateriales compuestos de WSe₂, MoS₂ y SiO₂ son de alta eficiencia en aplicaciones avanzadas.

La presencia de humedad representa un factor externo crítico que afecta negativamente la capacidad aislante de los materiales al reemplazar el aire en sus estructuras por agua, lo que incrementa su conductividad térmica.

La microestructura de los materiales, específicamente el espacio con aire en sus cavidades, es de alta relevancia en la resistividad térmica, determinando su eficacia como aislantes bajo diferentes condiciones externas, como se observó con las microesferas huecas de vidrio.

4. Referencias

- Ahmad, M., Bontemps, A., Sallée, H., y Quenard, D. (2006). Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.11.002>
- Ai Z., Zhao Y., Gao R., Chen L., Wen T., Wang W., Zhang T., Ge W. y Song S. (2022) Self-assembly hierarchical binary gel based on MXene and montmorillonite nanosheets for efficient and stable solar steam generation. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132000>
- Alemdar A y Sain M. (2007) Isolation and characterization of nanofibers from agricultural residues – Wheat straw and soy hulls. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.04.029>
- Alotabi, M., Alshammari, B., Saba, N., Al Othman, O., Sanjay, M., Almutairi, Z., y Jawaid, M. (2019). Characterization of natural fiber obtained from different parts of date palm tree (*Phoenix dactylifera* L.). International Journal of Biological Macromolecules. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.102>
- Binici H., Aksogan O., Bodur M., Akca E. y Kapur S. (2007) Thermal isolation and mechanical properties of fibre reinforced mud bricks as wall materials. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.11.004>

- Cao, Z., Liao, W., Wang, S., Zhao, H., y Wang, Y. (2018). Polyurethane foams with functionalized graphene towards high fire-resistance, low smoke release, superior thermal insulation. *Chemical Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.12.176>
- Çengel Y. y Boles M. (2012) *Termodinámica*. 7ma Ed. ISBN 978-0-07-352932-5
- Dou, L., Cheng, X., Zhang, X., Si, Y., Yu, J., y Ding, B. (2020). Temperature-invariant superelastic, fatigue resistant, and binary-network structured silica nanofibrous aerogels for thermal superinsulation. *Journal of Materials Chemistry A*. <https://doi.org/10.1039/d0ta01092h>
- Educación Cultural y Recreativa (1997) *Master enciclopedia temática: Física y Química*
- Giancoli D. (2008) *Física para ciencias e ingeniería*. 4ta Ed. Pearson Education.
- Gutiérrez C. (2011) *Física II, enfoque por competencias*. 2da Ed. ISBN-13: 978-607-15-0445-6
- Heat - Thermal Conductivity | Characteristics of Fine Ceramics | Fine Ceramics World | Kyocera. (s. f.). Heat - Thermal conductivity | Characteristics of Fine Ceramics | Fine Ceramics World | Kyocera. (s.f.) <https://global.kyocera.com/fcworld/charact/heat/thermalcond.html>
- Hinestroza H., Díaz J., Alfaro M., Toriz G., Rojas O. y Sulbarán B. (2019) Isolation and Characterization of Nanofibrillar Cellulose from Agave tequilana Weber Bagasse. <https://doi.org/10.1155/2019/1342547>
- Hu, Y., Mei, R., An, Z., y Zhang, J. (2013). Silicon rubber/hollow glass microsphere composites: Influence of broken hollow glass microsphere on mechanical and thermal insulation property. *Composites Science and Technology*, 79, 64–69. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.02.015>
- Jiang, J., Carrillo N., Oguzlu H., Han X., Bi R., Saddler J., Sun, R. y Jiang F. (2020). Acidic deep eutectic solvent assisted isolation of lignin containing nanocellulose from thermomechanical pulp. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116727>
- Jonoobi M., Oladi R., Davoudpour Y., Oksman K., Dufresne A., Hamzeh Y y Davoodi R. (2015) Different preparation methods and properties of nanostructured cellulose from various natural resources and residues: a review. <https://doi.org/10.1007/s10570-015-0551-0>
- Koksal F., Mutluay E. y Gencel O. (2020) Characteristics of isolation mortars produced with expanded vermiculite and waste expanded polystyrene. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117789>
- Liao, W., Zhao, H.-B., Liu, Z., Xu, S., y Wang, Y.-Z. (2019). On controlling aerogel microstructure by freeze casting. *Composites Part B: Engineering*, 173, 107036. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107036>
- Mendes A., Xavier M., Evtuguin V. y Lopes L. (2013) Integrated utilization of grape skins from white grape pomaces. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.05.003>
- Mendes C., Ferreira N., Furtado C. y de Sousa, A. (2015). Isolation and characterization of nanocrystalline cellulose from corn husk. *Materials Letters*, 148, 26–29. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.02.047>
- Pant S. (s. f.) Factors Affecting Thermal Insulation Properties of Garment <https://www.technicaltextile.net/articles/factors-affecting-thermal-insulation-6445>
- Rashad, A. (2018). Lightweight expanded clay aggregate as a building material – An overview. *Construction and Building Materials*, 170, 757–775. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.009>

- Palomo, M. (2017). Aislantes térmicos. Criterios de selección por requisitos energéticos. [PDF]. https://oa.upm.es/47071/1/TFG_Palomo_Cano_Marta.pdf Trabajo de fin de grado.
- Ünal, O., Uygunoğlu, T. y Yildiz, A. (2007). Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation. *Building and Environment*, 42(2), 584–590. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.09>
- Ravindran, L., Sreekala, M., y Sabu, T. (2019). Novel processing parameters for the extraction of cellulose nanofibres (CNF) from environmentally benign pineapple leaf fibres (PALF): Structure-property relationships. *International Journal of Biological Macromolecules*. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.134>
- Saber F., Elewa M., Chou H. y EL-Mahdy F. (2022) Donor-acceptor carbazole-based conjugated microporous polymers as photocatalysts for visible-light-driven H₂ and O₂ evolution from water splitting. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2022.121624>
- Serway R. y Jewett J. (2018) Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna. 10ma. Ed. Cengage Learning.
- Tippens P. (2007) Física, conceptos y aplicaciones. 7ma Ed. McGraw-Hill.
- Vaziri S., Yalon E., Muñoz M., Suryavanshi S., Zhang H., McClellan C., Bailey C., Smithe K., Gabourie A., Chen V., Deshmukh., Bendersky L., Davydov A. y Pop Eric (2019) Ultrahigh thermal isolation across heterogeneously layered two-dimensional materials. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax1325>
- Wang, R., y Meyer, C. (2012). Performance of cement mortar made with recycled high impact polystyrene. *Cement and Concrete Composites*, 34(9), 975–981. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.014>
- Zhang Z., Mu P., Han J., He J., Zhu Z., Sun H., Liang W. y Li A. (2019) Superwetting and mechanically robust MnO₂ nanowire–reduced graphene oxide monolithic aerogels for efficient solar vapor generation. <https://doi.org/10.1039/c9ta04509k>