



Análisis comparativo de la convección natural y forzada: Fundamentos, ventajas y aplicaciones en sistemas térmicos y agroindustriales

Comparative analysis of natural and forced convection: Fundamentals, advantages, and applications in thermal and agro-industrial systems

Luigui Calderon¹; Sofian Huacacolqui¹

¹ Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n, Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.

ORCID de los autores:

L. Calderon: <https://orcid.org/0009-0005-6249-4338>

S. Huacacolqui: <https://orcid.org/0009-0009-3567-7760>

RESUMEN

Este estudio se realiza un análisis detallado, tanto técnico como bibliométrico, de los procesos de transferencia de calor mediante convección natural y forzada. Se abordan sus principios físicos fundamentales, formulaciones matemáticas, variables que condicionan su desempeño y aplicaciones relevantes en los sectores térmico y agroindustrial. La investigación se sustentó en el examen de 169 publicaciones científicas difundidas entre 2010 y 2024, empleando herramientas especializadas como VOSViewer y Bibliometrix para explorar tendencias, ejes temáticos y vacíos existentes en la literatura. La convección natural, reconocida por su eficiencia energética y simplicidad estructural, ha mostrado efectividad en sistemas pasivos como el secado solar o la refrigeración sin partes móviles. Por otro lado, la convección forzada, al requerir intervención mecánica, permite un control más preciso de las condiciones térmicas, resultando fundamental en procesos como el enfriamiento de baterías, la pasteurización, la esterilización y el funcionamiento de paneles fotovoltaicos térmicos. Los hallazgos bibliométricos reflejan un incremento sostenido en estudios sobre dinámica de fluidos computacional (CFD), uso de nanofluidos y mejoras geométricas. Se concluye que ambos mecanismos de convección pueden integrarse estratégicamente según las exigencias térmicas, energéticas y operativas de cada sistema, favoreciendo el diseño de soluciones térmicas robustas, sostenibles y adaptables a diversos entornos industriales.

Palabras clave: transferencia de calor; convección natural; convección forzada; coeficiente de convección; aplicaciones industriales.

ABSTRACT

This study presents a detailed technical and bibliometric analysis of natural and forced convection heat transfer processes. It addresses their fundamental physical principles, mathematical formulations, variables that condition their performance and relevant applications in the thermal and agroindustrial sectors. The research was based on the examination of 169 scientific publications disseminated between 2010 and 2024, using specialized tools such as VOSViewer and Bibliometrix to explore trends, thematic axes and existing gaps in literature. Natural convection, recognized for its energy efficiency and structural simplicity, has shown effectiveness in passive systems such as solar drying or cooling without moving parts. On the other hand, forced convection, requiring mechanical intervention, allows more precise control of thermal conditions, being fundamental in processes such as battery cooling, pasteurization, sterilization and the operation of thermal photovoltaic panels. Bibliometric findings reflect a steady increase in studies on computational fluid dynamics (CFD), use of nanofluids and geometrical improvements.

Keywords: heat transfer; natural convection; forced convection; convection coefficient; industrial applications.

1. Introducción

La transferencia de calor, definida como la energía térmica que se transfiere entre sistemas debido a diferencias de temperatura (Çengel & Klein, 2007), ocurre mediante tres mecanismos fundamentales: conducción, convección y radiación. La conducción se produce en sólidos a través de la vibración molecular y sigue la ley de Fourier, mostrando un perfil lineal de temperatura en sistemas simples como paredes planas (Han & Wright, 2022). La radiación, por su parte, implica la transmisión de ondas electromagnéticas sin necesidad de medio material, gobernada por la ley de Stefan-Boltzmann. Sin embargo, es la convección el proceso de transferencia en fluidos mediante movimiento molecular y flujo macroscópico el mecanismo dominante en aplicaciones industriales, representando más del 75% de la energía térmica transferida (Wang et al., 2024).

La convección, la cual aparece subdividida en los tipos natural y forzada (Figura 1). La convección natural se define como el hecho de que el movimiento del fluido está solamente impulsado por fuerzas de flotabilidad que son consecuencia de los gradientes de la densidad, mientras que la convección forzada implica el movimiento del fluido mediante algún medio externo, como por ejemplo, una bomba o un ventilador, o una interacción de ambos (Incropera & Witt, 2009). La convección es un fenómeno complejo por su naturaleza no lineal y la dependencia que tiene de

múltiples magnitudes físicas, de las propiedades del fluido a las condiciones de frontera (Umbricht et al., 2020). Esta técnica tiene gran relevancia en ingeniería desde sus primeras aplicaciones existentes en la industria termoeléctrica y posteriormente está vinculada a la atención de la demanda en la aviación, en la energía nuclear, en la tecnología aeroespacial (Ikramov et al., 2023). En el sector industrial, entender estos fenómenos es esencial para la creación de sistemas de calor eficaces. Por ejemplo, en el sector de alimentos, los congeladores de lotes que utilizan convección forzada se topan con retos como la distribución desequilibrada de la temperatura (Xu et al., 2025), mientras que el diseño ideal de insertos en intercambiadores de calor necesita balancear la transferencia de calor con las pérdidas de fricción (Kadhim et al., 2025). Igualmente, aplicaciones en auge como la refrigeración de aparatos electrónicos y los procesos de calentamiento por radiación infrarroja requieren un enfoque holístico que tome en cuenta los fenómenos de transferencia de calor y masa (Bhandari et al., 2025).

Es por ello que el presente artículo tiene como finalidad analizar y compilar la evidencia científica sobre la transferencia de calor por convección, con un enfoque particular en las diferencias que se encuentran entre la convección libre y forzada, por medio de un análisis bibliométrico. Esto abre las puertas al interés sobre la importancia que tiene este tema en la ingeniería.

CONVECCION NATURAL

Tanque sin agitación



CONVECCION FORZADA

Tanque con agitador



Figura 1. Principios de la transferencia de calor por convección natural y forzada en tanques pasteurizadores.

Figure 1. Principles of heat transfer by natural and forced convection in pasteurizing tanks.

2. Transferencia de calor por convección

2.1. Coeficiente de convección "h"

El coeficiente de convección (h) representa una variable clave en el análisis de la transferencia de calor por convección, ya que expresa la capacidad con la que un fluido transfiere calor a una superficie sólida (Sheng et al., 2025). Este coeficiente actúa como un indicador de la resistencia térmica en la interfaz fluido-sólido, relacionando el flujo de calor con la diferencia de temperatura entre ambos medios.

A diferencia de propiedades como la conductividad térmica, que son propias de cada material, el coeficiente de convección (h) no tiene un valor constante. Se trata de un parámetro empírico que varía según varios factores, como la forma del sistema, el tipo de flujo del fluido y del sólido, las temperaturas involucradas, el área disponible para la transferencia de calor y las propiedades físicas del medio (Munir et al., 2025).

3. Convección libre y forzada

3.1. Convección libre

3.1.1. Principio físico

La convección natural es un mecanismo de transferencia de calor que ocurre por gradientes de temperatura o concentración sin intervención mecánica externa (Abdulkadhim et al., 2021). Este fenómeno surge cuando las diferencias de densidad en un fluido generan fuerzas de flotabilidad que inducen su movimiento. A diferencia de la convección forzada, este proceso es más eficiente energéticamente, aunque produce coeficientes de transferencia de calor generalmente bajos debido a las menores velocidades de flujo (Alsabery et al., 2023).

Este principio se manifiesta en diversos fluidos (aire, agua, metales) y es fundamental en aplicaciones donde el ahorro energético es prioritario, como en sistemas de ventilación pasiva o enfriamiento de equipos electrónicos.

3.1.2. Modelos matemáticos y ecuaciones relevantes

La ecuación representativa de la convección natural se basa en el número de Nusselt (Nu), que relaciona la transferencia de calor por convección con la conducción térmica. Para convección natural, Nu se expresa comúnmente en función del número de Rayleigh (Ra) elevado a una constante n y multiplicado por otra constante C, y

por último el número de Prandtl (Pr), siguiendo correlaciones empíricas (Boujelbene et al., 2025).

$$Nu = C * Ra_L^n \quad (1)$$

en donde Ra es el número de Rayleigh, el cual es el producto de los números de Grashof y de Prandtl (Çengel & Klein, 2007).

Nu (Número de Nusselt):

$$Nu = \frac{h*L}{k} \quad (2)$$

En donde h: Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m²·K); L: Longitud característica del sistema (m); k: Conductividad térmica del fluido (W/m·K).

Ra (Número de Rayleigh):

$$Ra = Gr * Pr = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu*\alpha} \quad (3)$$

En donde Gr: Número de Grashof; g: Gravedad (m/s²); β: Coeficiente de expansión térmica del fluido (1/K); ΔT: Diferencia de temperatura entre superficie y fluido (K); ν: Viscosidad cinemática del fluido (m²/s); α: Difusividad térmica del fluido (m²/s).

Los valores de las constantes C y n dependen de la configuración geométrica de la superficie y del régimen de flujo.

3.1.3. Influencia de parámetros en el sistema

La convección natural se clasifica en dos categorías según su geometría y patrón de flujo: convección interna, donde el fluido está confinado por límites sólidos, y convección externa, donde el fluido circula alrededor de un cuerpo sólido (Izadi & El Haj Assad, 2021). Esta distinción es relevante porque la convección interna presenta mayor complejidad debido a la interacción del fluido con todas las fronteras del sistema.

En el caso de convección externa, el análisis se simplifica mediante la teoría de capa límite, que considera que la región exterior no se ve afectada por los límites sólidos. Para la convección interna, existen dos configuraciones principales según las condiciones de contorno térmico: (1) cavidades con paredes laterales calentadas/enfriadas, donde el gradiente de temperatura es perpendicular a la gravedad, y (2) cavidades con paredes inferiores calentadas, donde el gradiente de temperatura es paralelo a la gravedad (Izadi & El Haj Assad, 2021).

Por otro lado, según Hulle et al. (2025), los resultados muestran que aumentar los números de Rayleigh mejora la transferencia de calor, observándose valores de número de Nusselt medio (NuMean) más elevados.

3.1.4. Aplicaciones representativas

Sus aplicaciones abarcan no solo campos industriales como generadores de energía, reactores, turbinas, intercambiadores de calor y otros dispositivos de conversión de energía, sino también fenómenos naturales como las corrientes atmosféricas y oceánicas, la transferencia de calor biológico, el efecto invernadero y la transferencia de calor en atmósferas estelares (Barhaghi et al., 2005).

En el ámbito de edificaciones y sistemas pasivos, la convección natural se emplea en radiadores para calefacción, ventanas multicristalinas, sistemas de ventilación natural y control térmico de edificios (Forsberg, 2021). Estos sistemas aprovechan los movimientos fluidos naturales para lograr confort térmico sin consumo energético adicional.

En el campo del almacenamiento térmico y energía, las aplicaciones incluyen intercambiadores de calor, colectores solares, hornos eléctricos, procesos de desalinización solar y sistemas de refrigeración (Abdulkadhim et al., 2021). Particularmente, en energía nuclear, la convección natural es fundamental para sistemas de seguridad pasiva en reactores.

Para enfriamiento de electrónica, se aplica en la refrigeración de dispositivos electrónicos, transformadores eléctricos y líneas de transmisión (Forsberg, 2021). Esta solución resulta atractiva por su simplicidad y confiabilidad en sistemas pasivos.

La convección natural también se manifiesta en fenómenos geológicos y atmosféricos, como corrientes oceánicas, transferencia en atmósferas estelares y efectos invernadero (Alsabery et al., 2023). Además, presenta aplicaciones especializadas en medios porosos y bajo campos magnéticos, áreas que han atraído considerable atención investigadora (Izadi & El Haj Assad, 2021).

Se evidencia la importancia de este tipo de transferencia en sus múltiples aplicaciones, tales como: radiadores para calentar una habitación, serpentines de refrigeración, ventanas multicristalinas, líneas de transmisión, transformadores eléctricos, calentadores de inmersión y enfriamiento de dispositivos electrónicos.

3.2. Convección forzada

3.2.1. Principio físico

La convección forzada es un tipo particular de transferencia de calor que se basa en la circulación inducida de un fluido, con el objetivo de mejorar la eficiencia del intercambio térmico

entre una superficie y dicho fluido. Este movimiento no ocurre de manera espontánea, sino que es provocado mediante el uso de dispositivos como ventiladores, bombas, agitadores o sistemas de succión (Caliskan Temiz et al., 2025). A diferencia de la convección natural (Tabla 1), donde el flujo se genera por diferencias de densidad causadas por variaciones de temperatura, en la convección forzada el movimiento es externo y controlado (Yang et al., 2025).

Este tipo de transferencia de calor se describe mediante la ley de enfriamiento de Newton, la cual establece que la tasa de transferencia de calor es proporcional a la diferencia de temperaturas entre la superficie sólida y el fluido, al área de contacto, y al coeficiente convectivo h (Barragán, 2009). Dicho coeficiente depende de las propiedades del fluido y de las condiciones de flujo, como velocidad, viscosidad y geometría del sistema. La relación fundamental es:

$$q = h \cdot A \cdot (T_s - T_f) \quad (4)$$

Donde "q" es la tasa de transferencia de calor, "A" es el área de la superficie, "T_s" es la temperatura de la superficie, y "T_f" la temperatura del fluido. Aunque en general los fluidos calientes tienden a ser menos densos que los fríos, este principio se simplifica en la convección forzada, ya que el movimiento no depende de las diferencias de densidad, sino de un impulso mecánico impuesto (Aguilar & Hernández, 2014).

3.2.2. Modelado matemático y correlaciones

Existen correlaciones que permiten modelar el comportamiento del intercambio térmico en función de parámetros adimensionales como los números de Reynolds, Prandtl y Nusselt, facilitando la comparación entre diferentes condiciones de operación y fluidos, de esta manera se pueden aplicar a diversas metodologías de investigación (Najafpour & Bahrami, 2025; Will et al., 2017). Las correlaciones empíricas más utilizadas son las siguientes:

Dittus-Boelter:

$$Nu = 0,023Re^{0,8}Pr^n \quad (5)$$

Es aplicable a flujo turbulento en tuberías lisas. El exponente n es 0,4 si el fluido se calienta y 0,3 si se enfría.

Gnielinski:

$$Nu = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1+12,7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3}-1)} \quad (6)$$

Más precisa en rangos de $2300 < Re < 5 \times 10^6$, tanto para tuberías lisas como rugosas. Depende

del factor de fricción f , que se puede estimar con la ecuación de Blasius para tuberías lisas.

Sieder-Tate:

$$Nu = 0,027Re^{0,8}Pr^{1/3}\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,14} \quad (7)$$

Esta correlación es recomendada para líquidos con propiedades dependientes de la temperatura, especialmente viscosidad. Se usa en flujo turbulento con diferencias significativas entre la viscosidad del fluido a granel y la viscosidad en la pared (Xu et al., 2025).

3.2.3. Influencia de parámetros en el sistema

Diversos factores del sistema, como la velocidad del flujo, la textura de las superficies y el tipo de régimen de movimiento del fluido, influyen de manera significativa en la transferencia de calor por convección forzada. Estos parámetros modifican la estructura de la capa límite térmica y, en consecuencia, el valor del coeficiente convectivo (Zhao et al., 2025). Analizar cómo estos elementos interactúan entre sí permite una mejor comprensión y optimización de procesos térmicos aplicados en alimentos líquidos, especialmente en operaciones como el enfriamiento, calentamiento y tratamiento térmico. Empleando técnicas de termografía y simulaciones numéricas, Zhang et al. (2023), demostraron que patrones en V generan pares de vórtices longitudinales que intensifican el flujo turbulento cerca de la superficie, incrementando la transferencia de calor convectiva hasta en un 121% con respecto a geometrías esféricas convencionales. Asimismo, en contextos de ventilación humana, se ha demostrado que los perfiles de flujo de aire generados por ventiladores eléctricos también influyen de manera significativa en la h_c (coeficiente de transferencia de calor por convección del cuerpo humano). Flujos en forma de arco, por ejemplo, pueden incrementar la h_c corporal hasta en un 20%, particularmente en las extremidades, debido a la distribución no uniforme del aire (Xu et al., 2025). Estos hallazgos nos muestran la importancia de considerar no solo la velocidad del flujo, sino también su distribución y geometría, como factores determinantes en la optimización del intercambio térmico convectivo.

3.2.4 Aplicaciones representativas

En el ámbito de la energía renovable, la convección forzada se ha aplicado con éxito en sistemas fotovoltaicos térmicos (PVT) mediante el uso de sistemas de enfriamiento por agua. En el diseño reciente elaborado por (Zaini et al., 2025), mejoró el rendimiento de estos paneles al enfriar

previamente el agua antes de su ingreso al colector, aumentando el gradiente térmico y favoreciendo la disipación del calor. Esta mejora permitió incrementar la eficiencia eléctrica en más del 16% en comparación con sistemas tradicionales, destacando el potencial de la convección forzada en aplicaciones de refrigeración activa.

La convección forzada también se aplica en sistemas de enfriamiento de baterías de iones de litio para mejorar la disipación térmica. Al aumentar el número de Reynolds y ajustar el espaciado entre celdas, se incrementa el número de Nusselt y se reduce la temperatura. Esto mejora el rendimiento eléctrico y prolonga la vida útil del sistema (Shaik et al., 2025).

En aplicaciones de enfriamiento activo, como disipadores de calor para componentes electrónicos, el diseño estructural influye directamente en la eficiencia térmica. (Hossain et al., 2025), demostró que un disipador de aletas tipo horquilla con ranuras y torsión mejoró significativamente la transferencia de calor por convección forzada. Se alcanzaron aumentos del número de Nusselt y del rendimiento hidrotérmico de hasta un 158% respecto a diseños convencionales, optimizando así la disipación térmica en condiciones de flujo turbulento.

En procesos termoquímicos como la licuefacción hidrotermal de lodos, se ha demostrado que aumentar el caudal mejora el régimen turbulento y, con ello, la transferencia convectiva de calor. Un modelo multifásico permitió optimizar las condiciones del reactor, mejorando la eficiencia energética y la conversión a biocrudo (Wodolązski & Smoliński, 2025).

Otra investigación reciente, como la de (Rostane et al., 2024), ha demostrado que el uso de obstáculos cúbicos perforados dispuestos en patrón escalonado mejora significativamente la convección forzada, aumentando el número de Nusselt en comparación con obstáculos sólidos. Estos resultados evidencian el impacto de la disposición y diseño de elementos internos en el rendimiento térmico de sistemas de enfriamiento y disipación de calor.

4. Transferencia de calor en procesos agroindustriales

a. Convección forzada

I. Esterilización

La esterilización con vapor en autoclaves, ampliamente utilizada en las industrias alimentaria y farmacéutica, implica una significativa demanda

energética, especialmente cuando varios equipos operan en paralelo. Un estudio reciente desarrolló una simulación numérica para modelar el consumo térmico de una autoclave industrial, incluyendo productos en su interior y un controlador de flujo de vapor. Los resultados permitieron predecir con precisión los perfiles de temperatura, presión y consumo de vapor durante el ciclo de esterilización, mostrando una diferencia inferior al 3% respecto a datos reales. Además, se evidenció una reducción del 8% en el consumo de vapor mediante el aislamiento de las paredes, lo que resalta la importancia de optimizar la transferencia de calor en este tipo de procesos (Lau et al., 2015).

Otro estudio experimental sobre esterilización por duchas de agua caliente examinó la transferencia de calor en botellas de vidrio de 1000 mL y bolsas plásticas de 500 mL, evaluando el efecto de distintas configuraciones de caudal y diseño de aspersión. Se encontró que el incremento del caudal superficial promedio aceleró el calentamiento y enfriamiento en botellas, pero tuvo el efecto contrario en bolsas, debido a diferencias en la geometría y el contacto térmico. Además, el uso de bandejas distribuidoras con mayor número de orificios pequeños mejoró la uniformidad del proceso y redujo el tiempo de enfriamiento. Estos resultados ofrecen valiosos aportes para optimizar la convección forzada de agua en procesos térmicos agroindustriales, como la pasteurización o esterilización de productos envasados (Hashemian Nik et al., 2024).

II. Secado

Un estudio reciente propuso un secador solar de convección forzada de tipo indirecto, equipado con un colector de aire fotovoltaico/térmico (PV/T), aplicado al secado de rodajas de tomate. Este sistema generó simultáneamente aire caliente y energía eléctrica, mejorando la eficiencia del secado. Se validaron modelos CFD con resultados experimentales, mostrando una diferencia de temperatura menor al 5%. Las eficiencias diarias del colector, el secador y el panel fotovoltaico fueron de 30,9%, 15,2% y 8,7%, respectivamente. Este tipo de tecnología representa una solución energética sostenible y eficiente para procesos agroindustriales (Chouikhi & Amer, 2023).

III. Deshidratación

Durante la congelación de alimentos sin envasar, puede ocurrir deshidratación superficial por sublimación del hielo, lo que modifica la dinámica

térmica del proceso. Un estudio desarrolló un método simplificado para predecir los tiempos de congelación bajo estas condiciones, considerando variables como el tamaño del producto, la humedad del ambiente y la velocidad del aire refrigerante que rodea el alimento. Este flujo controlado del medio refrigerante, fundamental para asegurar una adecuada transferencia de calor, permitió obtener resultados con alta concordancia frente a datos experimentales, facilitando así la optimización del proceso en la agroindustria (Campañone et al., 2005).

IV. Pausterización

Başaran et al. (2018) evaluaron un sistema de calentamiento por inducción aplicado a la pasteurización de pasta de tomate, comparándolo con un sistema convencional. El método inductivo, basado en convección forzada, alcanzó una eficiencia energética del 95% y una exergética del 46,56%, mientras que el sistema convencional obtuvo 75,43% y 16,63%, respectivamente. Los autores destacan que este tipo de tecnología ofrece una alternativa más eficiente y sostenible para la industria alimentaria. Además, reduce el consumo energético y mejora el control higiénico del proceso térmico.

b. Convección natural

I. Esterilización

En procesos de esterilización de alimentos enlatados, la convección natural optimiza significativamente la transferencia de calor. Se explora la mejora de la transferencia de calor convectiva natural en la esterilización de alimentos enlatados mediante modificaciones en la geometría y la orientación del recipiente. Varma & Kannan (2006) demostraron, mediante modelado CFD con fluidos no newtonianos (CMC al 0,85%), que una geometría cónica en orientación vertical permite que la Zona de Calentamiento Más Lenta alcance los 100 °C más rápidamente que en envases cilíndricos convencionales. Sus resultados evidencian que el diseño geométrico del envase, junto con su orientación adecuada (sin necesidad de agitación mecánica), puede optimizar significativamente los procesos de esterilización térmica en la industria alimentaria para productos viscosos, donde la convección natural es determinante.

II. Secado

El estudio de secado solar pasivo por convección natural demostró su eficacia en el procesamiento de grosellas espinosas indias, con ventajas para

la agroindustria sostenible. Mediante un secador tipo gabinete que aprovecha exclusivamente energía solar, reduciendo el contenido de humedad desde 78% hasta 5% (base húmeda), manteniendo una mejor calidad comparado con el secado tradicional al sol. Los resultados revelaron que el pre-tratamiento del producto (grosellas rebanadas) incrementó significativamente la velocidad de secado y la difusión efectiva de humedad, gracias a los patrones de convección natural generados dentro de la cámara. Este sistema, al operar sin insumos energéticos externos, ofrece una solución técnicamente viable y ambientalmente sostenible para el secado de frutas a pequeña y mediana escala, reduciendo costos operativos y la huella ambiental, al tiempo que mejora la calidad final del producto deshidratado (Prajapati & Sheorey, 2023).

III. Refrigeración

Según Chen et al. (2023) nos indica los enfriadores termoeléctricos (TEC) con convección natural representan una solución eficiente para la refrigeración agroindustrial. Un diseño optimizado con 5 pares de patas termoeléctricas logró mantener 12,2 °C internos (ambiente 29 °C) con solo 10.8W, mostrando un error experimental < 6,3%. Este sistema, sin partes móviles, es ideal para conservar productos hortofrutícolas (10 - 15 °C) con bajo consumo energético, especialmente en zonas rurales. Los resultados sugieren que sistemas TEC con convección natural podrían implementarse eficientemente en cámaras de

almacenamiento para productos hortofrutícolas, donde se requieren temperaturas moderadas con bajo costo operativo.

IV. Descongelación

En operaciones de descongelación de alimentos, la convección natural del aire alrededor del producto influye en el intercambio térmico superficial, modificando el coeficiente convectivo de transferencia de calor (hasta 110 W/m² K) y generando gradientes de temperatura dentro del alimento (Altin et al., 2022; González et al., 2021). Estos efectos impactan la uniformidad del proceso, crucial para mantener calidad microbiológica y organoléptica en la industria pesquera/cárnica (Altin et al., 2022).

V. Cocción

La cocción por convección natural demostró ser tan efectiva como la forzada para garantizar seguridad microbiológica en jamón, logrando reducciones >15D (superando requisitos regulatorios). Con valores F_{a1} de 45,7 min (vs 45 min en convección forzada) y usando *Enterococcus faecalis* como indicador, ambos sistemas alcanzaron la reducción requerida de 8D. El punto frío se ubicó consistentemente en el lado izquierdo/frontal/inferior del tanque ($\Delta T < 1,4$ °C), indicando que la convección natural representa una alternativa energéticamente eficiente para procesos industriales cuando se controla adecuadamente la ubicación del punto frío (Verlindo et al., 2024).

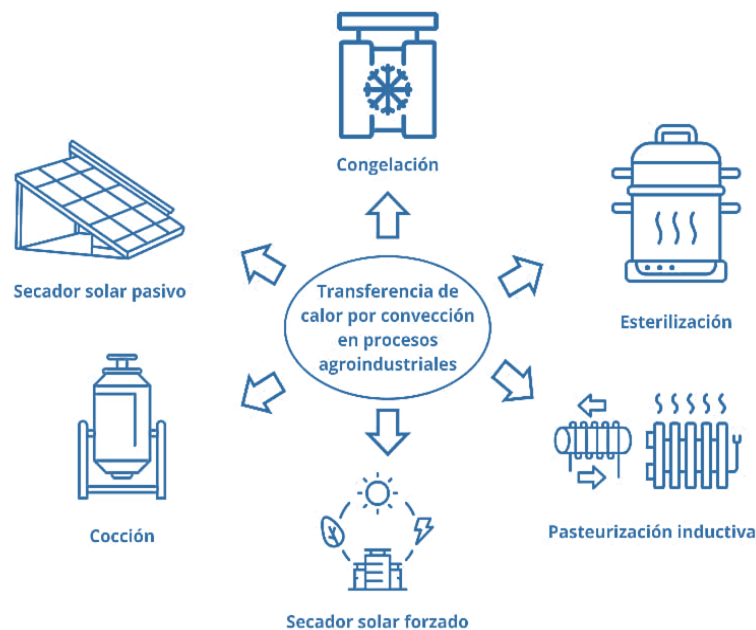


Figura 2. Principales procesos agroindustriales donde se aplica la transferencia de calor por convección.

Figure 2. Main agro-industrial processes where heat transfer by convection are applied.

La Tabla 1 presenta una clara comparación entre la convección natural y forzada en sistemas térmicos. Se resalta que la convección natural ocurre sin intervención mecánica, favoreciendo la simplicidad y sostenibilidad, pero con menor eficiencia térmica; mientras que la convección forzada requiere energía adicional mediante equipos auxiliares, lo que permite un mayor control del proceso térmico y diseños más compactos y eficientes. Por otro lado, la Tabla 2 presenta una recopilación de casos prácticos donde se han aplicado la transferencia de calor por convección, tanto natural como forzada, en distintos contextos. En situaciones donde se busca reducir el consumo energético o se prioriza la simplicidad del sistema, la convección natural resulta bastante útil, como en el enfriamiento de servidores o el almacenamiento criogénico. Por otro lado, la convección forzada se destaca en aplicaciones que requieren mayor control sobre las condiciones térmicas, como en los sistemas de enfriamiento activo de baterías o en paneles solares térmicos. Cada uno de los ejemplos incluidos en la tabla está respaldado por modelos y metodologías variadas, que van desde simulaciones computacionales hasta pruebas experimentales, lo que resalta la importancia de elegir adecuadamente el tipo de convección según las necesidades del sistema en cuestión.

5. Retos actuales y futuros: Enfoque Bibliométrico

Se recopiló información utilizando los conceptos estudiados, y como segundo paso, empleamos un análisis de datos usando un software bibliométrico y VOSViewer (Wang, Shao & Gao, 2025). Los términos “convective heat transfer - natural

convection - forced convection” acompañados por el conector booleano AND, se utilizaron como temas de búsqueda en la mayoría de los campos dentro de la base de datos Scopus. La recolección de datos se llevó a cabo en junio de 2024 abarcando las áreas temáticas más importantes y el tipo de documento (artículo). Se identificaron 169 artículos científicos publicados desde el 2010. Estos documentos se descargaron en un archivo CSV, para ser utilizado en el procesamiento de datos.

La investigación se centró en el uso de palabras clave para llevar a cabo un mapeo bibliométrico, así como en la organización y representación visual para el estudio de redes. Se aplicó la medida de similitud conocida como fuerza de asociación, calculada a partir de una matriz de coocurrencia que fue previamente normalizada. La herramienta VOSViewer fue empleada para la elaboración de mapas y la clasificación de los documentos obtenidos. Las palabras clave fueron representadas mediante círculos de distintos colores. El tamaño de estos círculos estaba directamente relacionado con la frecuencia de aparición de cada palabra clave en los títulos y resúmenes de los artículos. Por lo tanto, el peso asignado a cada elemento determinaba tanto el tamaño de su etiqueta como el del círculo correspondiente. El estudio presenta y analiza las visualizaciones generadas por VOSViewer a partir de los datos extraídos de la base Scopus.

La Figura 3 muestra, por un lado, la distribución de las publicaciones por áreas temáticas relacionadas con la transferencia de calor por convección en el gráfico circular, y por otro, la evolución anual del número de publicaciones entre los años 2010 y 2024 mostrados en el gráfico de barras.

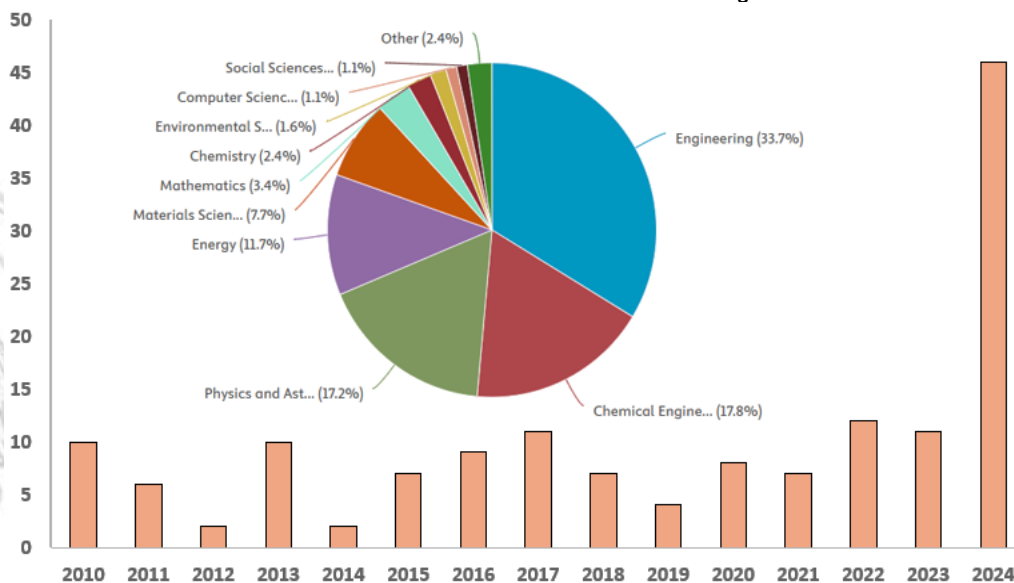


Figura 3. Distribución temática y evolución anual de publicaciones sobre transferencia de calor por convección de 2010 a 2024.

Figure 3. Thematic distribution and annual evolution of publications on convective heat transfer from 2010 to 2024.

Tabla 1 / Table 1

Diferencias clave entre la convección natural y la convección forzada en sistemas térmicos / Key differences between natural and forced convection in thermal systems

Parámetro	Principio físico	Ventajas	Desventajas	Ecuación representativa	Referencias
Convección Natural	Ocurre por gradientes de temperatura o concentración sin intervención mecánica externa, cuando las diferencias de densidad en un fluido generan fuerzas de flotabilidad que inducen su movimiento.	<ul style="list-style-type: none"> Naturaleza pasiva y la ausencia de componentes mecánicos, lo que hace que los sistemas sean más fiables, silenciosos, consumen menos energía y tienen sostenibilidad ambiental. 	<ul style="list-style-type: none"> Baja eficiencia térmica, limitaciones en geometrías complejas, limitación en control y calidad. 	$Nu = C * Ra_L^n$ donde: Nu: Número de Nusselt Ra: Número de Rayleigh C: constante empíricas	(Biswal & Meshram, 2025) (Çengel & Klein, 2007)
Convección Forzada	Se basa en la ley de enfriamiento de Newton, la cual establece que un fluido es movido mediante un agente externo para acelerar el intercambio de calor entre una superficie sólida y el fluido.	<ul style="list-style-type: none"> Permite alcanzar rápidamente temperaturas deseadas en procesos térmicos. Se puede regular el caudal de fluido (aire, vapor, líquidos) Permite diseños más pequeños y eficientes. 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere bombas o ventiladores que consumen energía. Incremento de la complejidad del diseño de los equipos auxiliares, al igual que requieren mantenimiento. 	$Q = h \cdot A_S(T_S - T_\infty)$ donde: Q: tasa de transferencia de calor (W) h: coeficiente convectivo (W/m ² ·K) A _S : área de la superficie (m ²) T _S : temperatura de la superficie (°C) T _∞ : temperatura del fluido alejado de la superficie (°C)	(Ohlsson et al., 2016) (Will et al., 2017)

Tabla 2 / Table 2

Aplicaciones representativas de la transferencia de calor por convección natural y forzada / Representative applications of heat transfer by natural and forced convection

Convención	Ámbito	Medios	Método de solución y modelos utilizados	Resultados y observaciones	Referencias
Natural	Enfriamiento de Servidores en Centros de Datos	Líquidos dieléctricos	CFD 3D transitorio (simulación de 10 min) + validación experimental con servidor Intel® M50FCP1UR	- FC-40 mejor en zonas de alta velocidad (pico: 0,062 m/s). - EC-130 superior en zonas de baja velocidad/conducción. - Viscosidad del mineral oil limitó su desempeño.	(Vagiakis et al., 2025)
	Refrigeración y Sistemas de Congelación	Superficies frías horizontales	Visualización por método Schlieren + medición de velocidades de flujo con PIV (Particle Image Velocimetry)	La convección natural influyó en la velocidad de transferencia de calor (reducción del 90% en velocidad horizontal), reducción del 52,6% en velocidad de crecimiento de la capa de escarcha, al aumentar la temperatura superficial de -9 °C a -5 °C en la velocidad.	(Zuo et al., 2025)
	Energía/Almacenamiento Térmico	Medios porosos	Método de Elementos Finitos (FEM) + validación experimental	Aumento del número de Rayleigh (Ra = 10 ⁴ -10 ⁶) intensifica efectos de flotabilidad, incrementando generación de entropía. Además, la radiación (parámetro 0-5) reduce la irreversibilidad del sistema.	(Mirzaei et al., 2025)
	Electrónica de Potencia y Telecomunicaciones	Disipadores de calor de dos fases	Fabricación Aditiva (LPBF) + pruebas experimentales en condiciones de convección natural vertical	Reducción del 19,2% en resistencia térmica vs. disipador sólido. Además 34% menos peso que el diseño convencional y por otro lado se obtuvo mejor desempeño con 12 cm ³ de acetona (modo termosifón).	(Hasan et al., 2025)

	Sistemas Láser	Enfriamiento de láser Nd:YAG	Diseño teórico-experimental + pruebas de rendimiento térmico y óptico.	- Energía de pulso: 105 mJ a 10 Hz. - Potencia pico: 20,2 MW. - Tamaño compacto: 200×50×38 mm ³ . - Divergencia: 0,3 mrad (X), 1,26 mrad (Y).	(Wu et al., 2025)
	Almacenamiento Criogénico (Hidrógeno Líquido)	Aislamiento multicapa no-vacio	Teoría de inestabilidad lineal + simulaciones numéricas de bifurcación	Un diseño óptimo requiere mantener Ra por debajo del límite crítico para minimizar la ebullición. Bifurcaciones subcríticas demuestran coexistencia de estados conductivos/convectivos.	(Sharma & Balakotaiah, 2025)
Forzada	Confort térmico en espacios cerrados	Paneles radiantes (interiores)	Modelo híbrido 3D CFD (k- ω) + datos experimentales	A 10 m/s se garantiza el confort térmico general; ángulo óptimo de paleta: 45° CHTC incrementa de 6 a 8 W/m ² K entre 5 y 10 m/s; confort térmico mejora con mayor velocidad y ángulo óptimo	(Caliskan Temiz et al., 2025)
	Sistema fotovoltaico-térmico (PVT) con refrigeración por agua (WCS)	Paneles fotovoltaicos con colector térmico integrado	Enfriamiento activo con agua a 20 °C y análisis comparativo de rendimiento	Aumento del 16,54 % en potencia de salida y eficiencia global del 83,26 %. El mejor rendimiento se debe a una mayor diferencia de temperatura, que mejora el coeficiente convectivo	(Zaini et al., 2025)
	Refrigeración pasiva en depósitos de sistemas de refrigeración líquida	Líquido en cavidad de depósito con medio poroso	Modelado numérico 2D y 3D; flujo laminar; modelo de medios porosos con ecuaciones de Brinkman y Forchheimer	Aumento del enfriamiento hasta 61,61 %; optimización de entrada; caída de presión moderada (2.3 kPa); mejora en Nu con menor porosidad	(Kumar et al., 2024)
	Gestión térmica de baterías de iones de litio	Aire como fluido de trabajo entre celdas de baterías	Simulación computacional variando el número de Reynolds y el espaciado entre baterías	Aumento del 51,70 % en el número de Nusselt y reducción de 49,23 °C en la temperatura máxima. Un número de Re alto y un espaciado óptimo mejoran la convección y prolongan la vida útil de la batería	(Shaik et al., 2025)
	Enfriamiento de CRDM en reactores PWR	Espacio anular vertical estrecho con termosifón	Estudio experimental con variación de temperatura y velocidad de enfriamiento	Relación lineal entre temperatura de entrada y potencia de refrigeración; nueva correlación propuesta.	(Xiao et al., 2020)
	Intercambiador de calor con espumas metálicas	estructuras porosas tipo "sponge" y (BCS)	Simulación numérica en poroescala y validación con literatura (desviación < 3%)	BCS duplicó el número de Nusselt y aumentó 4,7 veces el factor de fricción respecto a estructuras cúbicas. La alta tortuosidad y área expuesta del BCS mejoran significativamente la transferencia de calor	(Zhao et al., 2025)
	Calentadores en estaciones de entrada de gas (City Gate Stations - CGS)	Sistema de calentamiento de gas en estaciones CGS	Modelado térmico usando la primera ley de la termodinámica; comparación entre convección libre y forzada	La eficiencia disminuye al cambiar de convección libre (32 %) a forzada, por mayores pérdidas térmicas. Aunque mejora el coeficiente de transferencia de calor, la convección forzada reduce la eficiencia general	(Shafiei et al., 2022)



En cuanto a las áreas temáticas, se observa que la mayoría de los estudios se concentran en el área de Ingeniería (33,7%), seguida de Ingeniería Química (17,8%) y Física y Astronomía (17,2%). También destacan otras disciplinas como Energía (11,7%), Ciencia de los Materiales (7,7%), Matemáticas (3,4%) y Química (2,4%), lo que evidencia el carácter multidisciplinario del estudio de la transferencia de calor. Áreas como Ciencias Ambientales, Ciencias de la Computación y Ciencias Sociales tienen una participación menor, por debajo del 2% cada una.

Respecto a la evolución temporal (Figura 3) se aprecia una tendencia creciente en el número de publicaciones, con un incremento significativo en el año 2024, que alcanza el mayor número de publicaciones en el período analizado. Este aumento puede estar asociado al creciente interés en aplicaciones industriales, energéticas y de sostenibilidad relacionadas con la transferencia de calor por convección.

La Figura 4a presenta un mapa de co-ocurrencia de palabras clave, donde los términos se agrupan en cinco clústeres diferenciados por color según su afinidad temática. El clúster **rojo** está asociado a los fundamentos teóricos del análisis convectivo, incluyendo conceptos clásicos como el número de Reynolds, número de Nusselt, diferencias de temperatura, correlaciones empíricas y flujo turbulento, lo que indica un enfoque centrado en los principios básicos de la transferencia de calor. Por su parte, el clúster **azul** refleja el uso creciente de herramientas computacionales y de modelado, con términos como dinámica de fluidos computacional (CFD), dinámica de fluidos y número de Prandtl. El clúster **verde** agrupa aplicaciones prácticas en sistemas térmicos, como calefacción eléctrica, plumas térmicas, refrigeración y operaciones a baja temperatura, evidenciando un interés aplicado en contextos energéticos. El clúster **amarillo** destaca investigaciones sobre nanofluidos y propiedades térmicas avanzadas, incluyendo conductividad térmica de líquidos, lo que indica un enfoque hacia el uso de materiales innovadores para mejorar la eficiencia térmica. Finalmente, el clúster celeste está orientado a estudios experimentales, con términos como enfriamiento, estudios experimentales y eficiencia de colectores, lo que sugiere una preocupación por optimizar sistemas térmicos mediante ensayos prácticos.

La Figura 4b muestra un mapa temporal que evidencia la evolución de las temáticas en función del año promedio de publicación de las palabras clave. Los términos representados en tonos

azulados, como convección natural, número de Prandtl y dinámica de fluidos computacional, se asocian a estudios previos al 2018, lo que indica que han constituido las bases teóricas y metodológicas del área de estudio. En contraste, los términos que aparecen en tonos verdes a amarillos, como calefacción eléctrica, refrigeración, operaciones a baja temperatura y conductividad térmica de líquidos, se vinculan con investigaciones más recientes, aproximadamente desde el año 2022. Este cambio cromático sugiere una evolución temática que se orienta cada vez más hacia aplicaciones energéticas y materiales con propiedades térmicas avanzadas, marcando una transición desde enfoques tradicionales hacia soluciones tecnológicas innovadoras.

El mapa temático, utiliza las "palabras clave del autor" para visualizar la estructura temática del área de investigación, destacando las relaciones entre los distintos grupos. Está organizado en cuatro cuadrantes, definidos por su importancia y nivel de desarrollo (Wei & Jiang, 2023). Se determina que los conceptos más desarrollados como 'convective heat transfer' y 'heat transfer coefficients' se ubican en la transición hacia temas motores, indicando un enfoque activo en la cuantificación y aplicación de la transferencia de calor. Por otro lado, 'aspect ratio' y 'grashof number' aparecen como temas de nicho, con un cuerpo de conocimiento específico y bien definido, pero de menor interconexión con el campo.

La ausencia de temas en los cuadrantes "Motor" y "Emergente/Declive" sugiere una madurez y estabilidad en las áreas de investigación clave sobre convección.

Este procedimiento, que abarca desde la recopilación de datos bibliográficos hasta la interpretación de los mapas temáticos y gráficos generados mediante el software Bibliometrix, resulta fundamental para fortalecer y ampliar el conocimiento en torno a la transferencia de calor por convección natural y forzada. Al aplicar un enfoque bibliométrico, no solo se visualizan las tendencias actuales de investigación y las principales líneas temáticas, sino que también se identifican vacíos científicos y posibles áreas de oportunidad para futuras investigaciones.

Este capítulo busca precisamente resaltar el valor de utilizar herramientas como Bibliometrix en estudios técnicos, ya que contribuyen no solo a sistematizar la información existente, sino también a proyectar nuevas líneas de investigación que integren avances científicos, innovación tecnológica y sostenibilidad en el campo de la ingeniería térmica y agroindustrial.

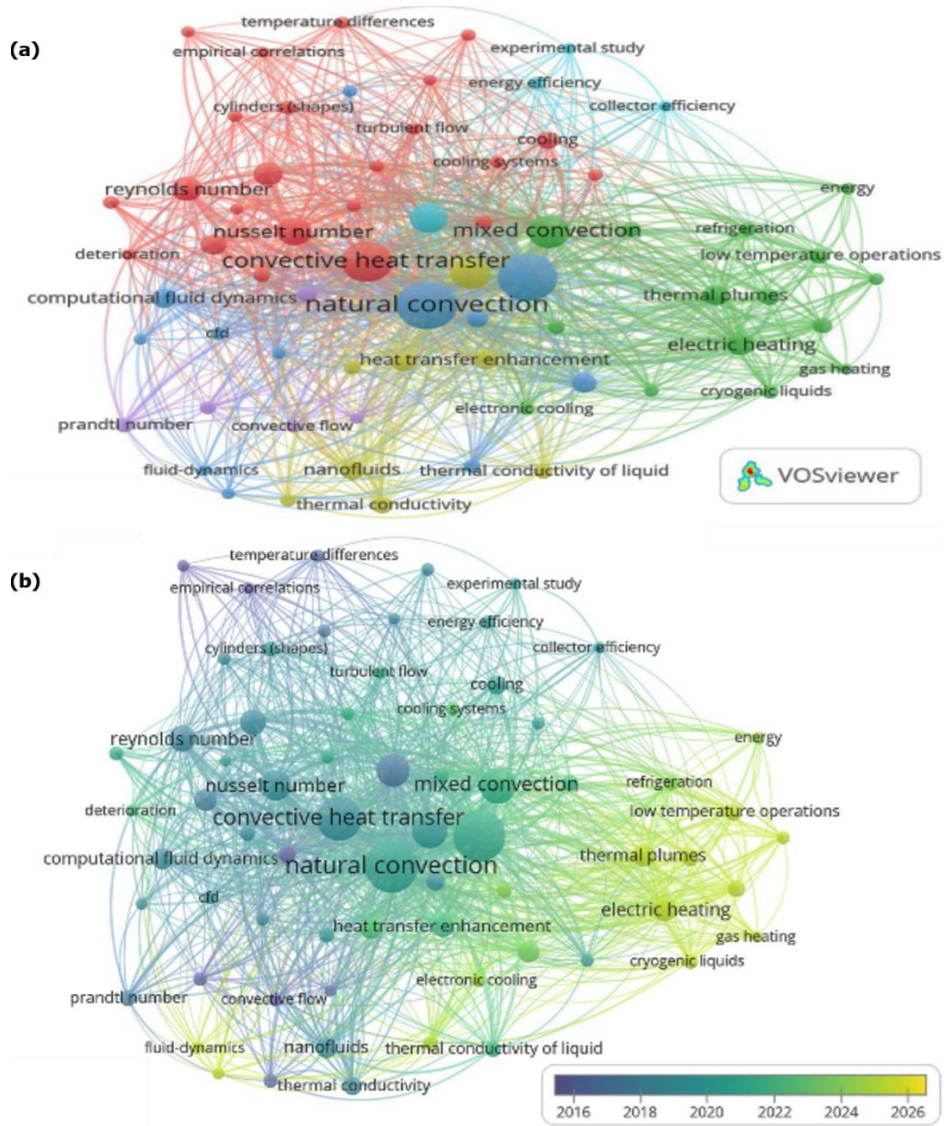


Figura 4. Mapa de co-ocurrencia de palabras clave (a) clúster, y (b) tendencia.
 Figure 4. Co-occurrence map of keywords (a) cluster, and (b) trend.

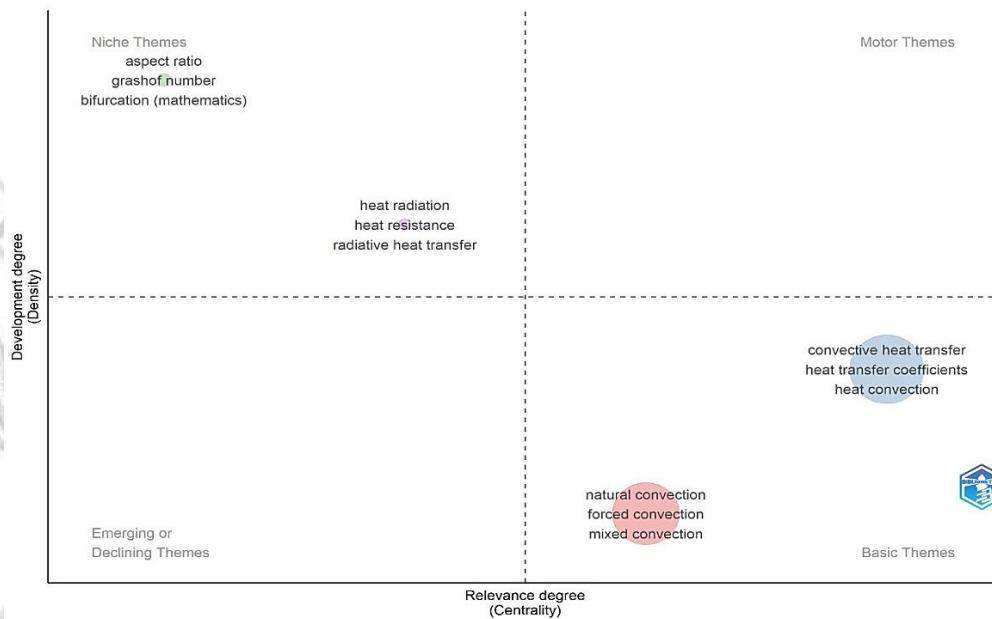


Figura 5. Mapa temático / Figure 5. Thematic map.

7. Conclusiones

Esta revisión permitió destacar diferencias y semejanzas entre la convección natural y la convección forzada. Mientras la convección natural se basa en fenómenos pasivos inducidos por diferencias de densidad, la convección forzada implica la intervención de mecanismos externos que potencian la eficiencia térmica. Esta distinción no solo tiene implicancias teóricas, sino que determina el diseño, operación y sostenibilidad de diversos sistemas térmicos, especialmente en aplicaciones industriales y agroindustriales.

Por otro lado, se demuestra que la elección del tipo de convección depende estrechamente de los objetivos energéticos, la geometría del sistema, las propiedades del fluido y las condiciones de operación. En procesos donde la eficiencia energética y la simplicidad operativa son prioritarias la convección natural ofrece una solución confiable y de bajo impacto ambiental. Al contrario, en aplicaciones que demandan precisión térmica, rápida respuesta o control estricto, como la pasteurización de alimentos o el enfriamiento de baterías, la convección forzada resulta indispensable.

Con el uso del análisis bibliométrico se pudo revelar un crecimiento en investigaciones multidisciplinarias (33,7% en ingeniería, 17,8% en química), con enfoques emergentes en nanofluidos y simulaciones CFD, no obstante, persisten desafíos como la optimización de geometrías para minimizar pérdidas por fricción en convección forzada o el escalado de sistemas pasivos en convección natural.

Referencias bibliográficas

- Abdulkadhim, A., Abed, I. M., & Said, N. M. (2021). An exhaustive review on natural convection within complex enclosures: Influence of various parameters. *Chinese Journal of Physics*, 74, 365-388. <https://doi.org/10.1016/j.cjph.2021.10.012>
- Aguilar, J. F. G., & Hernández, J. R. R. (2014). Ley de enfriamiento de Newton de orden fraccionario Fractional Newton cooling law. *Atin*, O., Marra, F., & Erdogdu, F. (2022). Computational study for natural convection effects on temperature during batch and continuous industrial scale radio frequency tempering/thawing processes. *Journal of Food Engineering*, 312, 110743. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110743>
- Barragán, D. (2009). Entropy production and Newton's cooling law. *Ingeniería e Investigación*, 29(2), 88-93. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v29n2.15167>
- Başaran, A., Yilmaz, T., & Çivi, C. (2018). Application of inductive forced heating as a new approach to food industry heat exchangers: A case study—Tomato paste pasteurization. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 134(3), 2265-2274. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7250-7>
- Bhandari, M., Sharma, R., Bobade, H., Sharma, S., & Singh, B. (2025). Infrared thermogenesis: Review of multifaceted effects on cereal grains' functional, morphological & rheological properties and safety concerns. *Food Control*, 172, 111207. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2025.111207>
- Caliskan Temiz, M., Bacak, A., Camci, M., Karakoyun, Y., Acikgoz, O., & Dalkilic, A. S. (2025). A new hybrid CFD approach to study the impact of forced convection on radiant cooled wall with baseboard diffuser including various vane angles. *International Journal of Thermal Sciences*, 213, 109804. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2025.109804>
- Campañone, L. A., Salvadori, V. O., & Mascheroni, R. H. (2005). Food freezing with simultaneous surface dehydration: Approximate prediction of freezing time. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(6), 1205-1213. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.09.030>
- Chen, Z., Liao, M., Hu, X., Ma, Y., Jiang, S., Chen, X., Zou, F., Fan, X., & He, Z. (2023). Study on the performance of thermoelectric refrigerator under natural convection heat transfer condition. *Applied Thermal Engineering*, 230, 120822. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120822>
- Choukhi, H., & Amer, B. M. A. (2023). Performance Evaluation of an Indirect-Mode Forced Convection Solar Dryer Equipped with a PV/T Air Collector for Drying Tomato Slices. *Sustainability*, 15(6), 5070. <https://doi.org/10.3390/su15065070>
- González, N. P., Rivera, D. R., & Moraga, N. O. (2021). Conjugate turbulent natural heat convection and solid food freezing modelling: Effects of position and number of pieces of salmon on the cooling rate. *Thermal Science and Engineering Progress*, 26, 101101. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.101101>
- Han, J.-C., & Wright, L. M. (2022). Analytical Heat Transfer (2.a ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003164487>
- Hasan, M., Pema, R., Elkholy, A., Durfee, J., & Kempers, R. (2025). A lightweight additively manufactured two-phase integrated natural convection heat sink. *Applied Thermal Engineering*, 266, 125700. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125700>
- Hashemian Nik, E., Macheiner, G., Thang, V. H., & Hochenauer, C. (2024). Experimental investigation of heat transfer for hot water shower sterilization of bags and bottles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 229, 125729. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125729>
- Hossain, M. I., Chowdhury, M. S. H., Ahmed, S. S. U., Hamja, A., & Siddique, I. J. (2025). Forced convective heat transfer over twisted and perforated forked pin fin heat sink: A numerical study. *International Journal of Thermal Sciences*, 211, 109719. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2025.109719>
- Ikramov, A. M., Polatov, A. M., & National University of Uzbekistan. (2023). 10.26516/1997-7670.2023.45.89. The Bulletin of Irkutsk State University. *Series Mathematics*, 45, 104-120. <https://doi.org/10.26516/1997-7670.2023.45.104>
- Incropera, F. P., & Witt, D. P. de. (2009). Fundamentos de transferencia de Calor (4a ed). Prentice Hall.
- Kadhim, S. A., Ashour, A. M., Sherza, J. S., Bouabidi, A., Hussein, A. K., Togun, H., Rashid, F. L., & Ahmad, S. (2025). Review of insertion scenarios in enhancement performance of double-pipe heat exchanger: Case of cut twist tape. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 213, 110308. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2025.110308>
- Kumar, R., Kumar, A., & Assam, A. (2024). Investigating forced convection in porous media-filled cavities for designing supplementary passive cooling systems. *Thermal Science and Engineering Progress*, 55, 102914. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102914>
- Lau, W. L., Reizes, J., Timchenko, V., Kara, S., & Kornfeld, B. (2015). Heat and mass transfer model to predict the operational performance of a steam sterilisation autoclave including products. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 90, 800-811. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.06.089>
- Mirzaei, A. M., Mokhtari Mehmandousti, M., Bijarchi, M. A., & Ganji, D. D. (2025). Investigation of entropy generation and natural convection in a trapezoidal porous enclosure with a square hole: A finite element analysis. *Case Studies in Thermal Engineering*, 70, 106069. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106069>
- Munir, S., Rahman, A., Alkhuayli, N. A. M., & Nawaz, R. (2025). Computational analysis of thermal enhancement and flow dynamics in lid-driven staggered cavities with uniform/nonuniform temperature walls. *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift Für Angewandte Mathematik Und Mechanik*, 105(5), e70011.

- <https://doi.org/10.1002/zamm.70011>
- Ohlsson, K. E. A., Östin, R., & Olofsson, T. (2016). Accurate and robust measurement of the external convective heat transfer coefficient based on error analysis. *Energy and Buildings*, 117, 83-90. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.040>
- Prajapati, C., & Sheorey, T. (2023). Exploring the efficacy of natural convection in a cabinet type solar dryer for drying gooseberries: An experimental analysis. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, 100684. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100684>
- Rostane, B., Aliane, K., Alqahtani, S., Kaid, N., Menni, Y., & Chamkha, A. J. (2024). Three-dimensional assessment of convective heat transfer in perforated cubic obstacles arranged in a staggered pattern under laminar flows. *Physics of Fluids*, 36(9), 093615. <https://doi.org/10.1063/5.0223015>
- Shafiei, D., Mostafavi, S. A., Mehrabadi, S. J., & Toghrarie, D. (2022). Analysis of the effects of forced convective heat transfer to reduce the efficiency of heaters of gas pressure reducing stations. *Case Studies in Thermal Engineering*, 38, 102356. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102356>
- Shaik, S. A., Nigam, P. K., & Gugulothu, S. K. (2025). Optimizing cooling efficiency in Li-ion battery packs: A numerical study on the influence of inter-cell gaps and airflow dynamics. *Thermal Science and Engineering Progress*, 62, 103624. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.103624>
- Sharma, S., & Balakotaiah, V. (2025). Analysis of natural convection effects in non-vacuum-based insulation layers of large-scale liquid hydrogen tanks. *AIChE Journal*, 71(4), e18725. <https://doi.org/10.1002/aic.18725>
- Sheng, X., Gao, C., Li, L., Lu, X., Zhang, J., Xu, Y., & Ding, J. (2025). Numerical fitting of convective heat transfer coefficient on ball screw surface with linear-rotary composite motion. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 165, 108977. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.108977>
- Umbricht, G. F., Rubio, D., Echarri, R., & El Hasi, C. (2020). A technique to estimate the transient coefficient of heat transfer by convection. *Latin American Applied Research - An international journal*, 50(3), 229-234. <https://doi.org/10.52292/j.laar.2020.179>
- Vagiakis, A., Korres, D. N., & Tzivanidis, C. (2025). Simulation of natural convection heat transfer in dielectric liquids for single-phase immersion cooling rack server. *Applied Thermal Engineering*, 274, 126595. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126595>
- Varma, M. N., & Kannan, A. (2006). CFD studies on natural convective heating of canned food in conical and cylindrical containers. *Journal of Food Engineering*, 77(4), 1024-1036. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.07.035>
- Verlindo, R., Schwert, R., Peruzzolo, M., Fischer, B., Dornelles, R. C. P., Mello, R. D. O., Junges, A., Backes, G. T., & Cansian, R. L. (2024). Efficiency of natural and forced convection systems in cooking ham: Industrial scale validation. *Journal of Food Process Engineering*, 47(9). <https://doi.org/10.1111/jfpe.14740>
- Wang, Q., Li, X., Wang, T., Ma, S., Zhang, B., & Ma, T. (2024). Analysis methodology of thermal conduction-advection resistance in parallel during heat transfer in the fluid domain. *Scientia Sinica Technologica*, 54(9), 1789-1796. <https://doi.org/10.1360/SST-2023-0310>
- Wei, W., & Jiang, Z. (2023). A bibliometrix-based visualization analysis of international studies on conversations of people with aphasia: Present and prospects. *Heliyon*, 9(6), e16839. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16839>
- Will, J. B., Kruyt, N. P., & Venner, C. H. (2017). An experimental study of forced convective heat transfer from smooth, solid spheres. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 109, 1059-1067. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.02.018>
- Wodolazski, A., & Smoliński, A. (2025). Optimization Study of Hydrothermal Liquefaction Sewage Sludge to Biocrude Oil in Continuous Multiphase Plug Flow Reactor. *Processes*, 13(4), 976. <https://doi.org/10.3390/pr13040976>
- Wu, T., Yan, R., Jin, Z., Cao, S., Xu, H., Jiang, Y., Fan, R., & Li, X. (2025). A compact and less heat affected Nd:YAG laser with heat dissipation by natural convection solely. *Optics & Laser Technology*, 183, 112371. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.112371>
- Xiao, Y., Zhang, C., & Gu, H. (2020). Investigation of thermosyphon characteristics in a vertical narrow annulus closed at top with external forced convection cooling. *Annals of Nuclear Energy*, 138, 107226. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.107226>
- Xu, C., Rao, Y., & Zhang, P. (2025). Experimental and numerical studies of turbulent flow and heat transfer enhancement over oblong-dimple patterned surfaces. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 115, 109863. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2025.109863>
- Yang, M., Wang, D., Dong, Z., Zhang, Z., Li, Y., & Du, D. (2025). Insight into the permeability effect on forced convective heat transfer characteristics in porous media based on the pore-scale numerical study. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 165, 109004. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109004>
- Zaini, M. I. A., Mustapha, M., Nazri, N. S., Rosli, N. N., Mutalib, M. A., Sulong, W. M. W., Ibrahim, M. A., & Fudholi, A. (2025). Innovative water-cooling system for enhanced energy efficiency in photovoltaic-thermal system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 70, 106137. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106137>
- Zhao, J., Liaw, K. L., Zolfaghroshan, M., Xu, M., Akbarzadeh, A., & Sasmito, A. P. (2025). Exposed-area dependent forced convective heat transfer in periodic lattice structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 241, 126683. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.126683>
- Zuo, Z., Dong, L., Yang, Q., Wang, Z., Zhao, W., Zhan, B., Tong, L., Wu, P., & Wang, L. (2025). Visualization study of frosting characteristics on a horizontal cold plate under natural convection condition. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 241, 126789. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.126789>

