

# Bibliometric Analysis of Global Trends on the Use of Nanofluids in Solar Thermal Systems

Renny Nazario-Naveda<sup>1</sup>, Santiago M. Benites<sup>1</sup>, Moisés Gallozzo-Cárdenas<sup>2</sup>, Jhordan Gómez-Esquivel<sup>2</sup>, Orlando Carrera-Vargas<sup>2</sup> and Yerson Rosas-Paz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Vicerrectorado de Investigación, Universidad Autónoma del Perú, Lima 15842, Perú, [renny.nazario@autonomia.pe](mailto:renny.nazario@autonomia.pe), [santiago.benites@autonomia.pe](mailto:santiago.benites@autonomia.pe)

<sup>2</sup>Departamento de Ciencias, Universidad Tecnológica del Perú, Trujillo 13001, Perú; [c21228@utp.edu.pe](mailto:c21228@utp.edu.pe)

*Abstract— A bibliometric analysis was conducted on the use of nanofluids in solar thermal systems. A total of 753 English-language documents indexed in the Scopus database between 2004 and 2024 were collected. The analysis shows sustained growth in research on the use of nanofluids in solar thermal systems, consolidating it as a dynamic and multidisciplinary field, led by Asia, especially India and China. Institutions such as Shanghai Jiao Tong University and Jiangsu University stand out for their productivity and collaboration. Works such as those by Mahian O., Saidur R., and Taylor R. A. are the most cited and influential, while new authors such as Zafar Said and Jamshed Wasim promote innovative approaches. Frequent keywords such as "nanofluids," "solar heating," and "thermal conductivity" reflect the interest in improving the thermal performance of these systems through the application of nanotechnology. Journals such as Solar Energy and Renewable and Sustainable Energy Reviews are leading the way, and emerging topics in magnetohydrodynamics and nanofluid flow offer new research opportunities.*

*Keywords-- Nanofluids, solar energy, thermal system, thermal conductivity, thermal efficiency.*

# Análisis Bibliométrico de las Tendencias Globales sobre el Uso de Nanofluidos en Sistemas Térmicos Solares

Renny Nazario-Naveda<sup>1</sup>, Santiago M. Benites<sup>1</sup>, Moisés Gallozzo-Cardenas<sup>2</sup>, Jhordan Gómez-Esquivel<sup>2</sup>, Orlando Carrera-Vargas<sup>2</sup> and Yerson Rosas-Paz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Vicerrectorado de Investigación, Universidad Autónoma del Perú, Lima 15842, Perú, renny.nazario@autonoma.pe, santiago.benites@autonoma.pe

<sup>2</sup>Departamento de Ciencias, Universidad Tecnológica del Perú, Trujillo 13001, Perú; c21228@utp.edu.pe

**Resumen—** Se realizó un análisis bibliométrico sobre el uso de nanofluidos en sistemas solares térmicos. Se recopiló 753 documentos en idioma inglés indexados en la base de datos Scopus entre los años 2004 y 2024. El análisis muestra un crecimiento sostenido en la investigación sobre el uso de nanofluidos en sistemas solares térmicos, consolidándose como un campo dinámico y multidisciplinario, liderado por Asia, especialmente India y China. Instituciones como Shanghai Jiao Tong University y Jiangsu University destacan por su productividad y colaboración. Trabajos como los de Mahian O., Saidur R. y Taylor R. A. son los más citados e influyentes, mientras que nuevos autores como Zafar Said y Jamshed Wasim impulsan enfoques innovadores. Las palabras clave frecuentes, como “nanofluids”, “solar heating” y “thermal conductivity”, reflejan el interés por mejorar el rendimiento térmico de estos sistemas mediante la aplicación de la nanotecnología. Revistas como Solar Energy y Renewable and Sustainable Energy Reviews lideran la difusión, y temas emergentes en “magnetohydrodynamics” y “nanofluids flow” ofrecen nuevas oportunidades de investigación.

**Palabras clave--** Nanofluidos, energía solar, sistema térmico, conductividad térmica, eficiencia térmica.

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la energía solar se ha consolidado como una alternativa clave para mitigar el impacto ambiental, considerando que aproximadamente el 88 % de la energía consumida a nivel mundial para satisfacer necesidades domésticas e industriales proviene de combustibles fósiles, responsables de elevadas emisiones contaminantes [1,2]. Frente al creciente aumento de la demanda energética, el aprovechamiento de la energía solar resulta cada vez más necesario, al tratarse de una fuente renovable, abundante y de bajo impacto ambiental [3]. No obstante, la eficiencia de los sistemas térmicos solares se ve limitada por la baja conductividad térmica de los fluidos de trabajo convencionales, como el agua, el etilenglicol y ciertos aceites, los cuales restringen la capacidad de transferencia de calor en dispositivos solares [4]. Esta limitación representa un obstáculo para sectores como la industria o el rubro hotelero, donde la incorporación de sistemas solares térmicos podría reducir significativamente el consumo energético y las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a procesos de calentamiento,

además de generar un ahorro económico al sustituir tecnologías tradicionales por alternativas de accionamiento térmico [5]. En este contexto, mejorar la conductividad térmica de los sistemas solares térmicos es esencial, tanto para incrementar su eficiencia como para ampliar su adopción en diferentes ámbitos de la sociedad.

Los nanofluidos, definidos como suspensiones de nanopartículas en un fluido base, han demostrado ser una solución innovadora para mejorar la eficiencia térmica en sistemas solares. Nanopartículas metálicas como oro, cobre, plata y platino presentan una conductividad térmica significativamente superior a la de fluidos tradicionales como agua, etilenglicol o aceites, comúnmente utilizados en la industria termosolar [6]. Estudios han reportado mejoras de hasta un 70 % en la transferencia de calor con nanofluidos de oro y un 37 % con platino, debido al incremento en la conductividad térmica, lo que permite su aplicación directa en plantas solares de concentración a alta temperatura [7]. Otros estudios revelan que la dispersión de nanopartículas de cobre en etilenglicol puede incrementar la conductividad térmica en un 40 % con solo 0.3 % de volumen, utilizando partículas menores a 10 nm, superando las limitaciones de partículas micrométricas [8,9]. También se ha investigado el uso de óxido de grafeno (GO) con líquidos iónicos (IL), alcanzando incrementos del 36.8 % en conductividad respecto a otras mezclas, siendo prometedores para aplicaciones solares de alta intensidad [10]. Vergara Morales estudió el uso de nanofluidos de disulfuro de molibdeno (MoS<sub>2</sub>), por su bajo costo y toxicidad, para mejorar la transferencia térmica en colectores solares térmicos [11]. Por su parte, Chen et al. destacaron que nanofluidos formado por agua como fluido base con nanopartículas de CuO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> y TiO<sub>2</sub> superan en conductividad térmica y capacidad de transferencia de energía a los fluidos convencionales utilizados en colectores solares [12]. Asimismo, los nanofluidos hídricos (HNF) han demostrado mejorar el rendimiento y la durabilidad de sistemas solares térmicos, incluidos los de calentamiento de agua doméstico e industrial [13]. En otra línea, Chenyu et al. desarrollaron un modelo multiescala para sistemas fotovoltaicos/térmicos (SBS-PV/T), mostrando que las

nanopartículas metálicas, especialmente las de oro, son más efectivas que las de óxidos metálicos al integrar rendimiento térmico, eléctrico y calidad del calor [14].

En este contexto, es importante medir con precisión el impacto de investigadores e instituciones y sus publicaciones dentro de la comunidad académica, para así describir sus dinámicas y anticipar las futuras direcciones del conocimiento, así como posibles oportunidades de colaboración. Para ello, el presente trabajo realizó un análisis bibliométrico sobre el uso de nanofluidos en sistemas solares térmicos entre 2004-2024 para identificar las tendencias investigativas en el área y detectar los posibles vacíos de conocimiento o líneas emergentes de investigación. Este análisis examinó las interconexiones y correlaciones entre las publicaciones científicas mediante sus autores, palabras claves, instituciones y países, evaluando las tendencias de investigación según su importancia para el avance del conocimiento científico en el uso de nanofluidos en sistemas solares térmicos. Este estudio brindará alcances claves para orientar futuros desarrollos en esta área clave para la transición energética sostenible.

TABLA I  
INFORMACIÓN GENERAL SOBRE LA BÚSQUEDA EN SCOPUS

Descripción	Resultados
Periodo	2004-2024
Fuentes	260
Documentos	753
Antigüedad promedio de los documentos	4.57
Palabras clave plus	3951
Palabras clave de autor	1625
Autores	2226
Coautores por Documento	4.44
% Coautoría internacional	37.58

## II. METODOLOGÍA

Se realizó un análisis bibliométrico sobre el uso de nanofluidos en sistemas solares térmicos, enfocado en publicaciones en inglés entre los años 2004 y 2024. Para este estudio, se recopiló información de publicaciones desde la base de datos Scopus, una base de datos multidisciplinaria que recopila resúmenes y referencias de artículos científicos, libros y actas de congresos desde 1996, con actualizaciones diarias. Scopus ofrece herramientas para evaluar el impacto de investigaciones mediante métricas de citación, permitiendo analizar el rendimiento de autores y publicaciones. Además, facilita la identificación de tendencias emergentes y posibles colaboradores a través de búsquedas por autor, afiliación o documento. [15]. En la búsqueda se usaron las siguientes palabras clave: “nanofluids” AND “solar” AND “thermal” AND “heating”, restringiendo la búsqueda en tipo de documento a solo artículos, artículos de conferencia, revisiones y revisiones de conferencia en idioma inglés. La

Tabla I resume los resultados de una búsqueda en Scopus. Se identificaron 753 documentos publicados en 260 fuentes, con una antigüedad promedio de 4.57 años. El procesamiento y la visualización de redes temáticas se realizaron utilizando herramientas especializadas como Biblioshiny by RStudio (versión 4.3.3), Microsoft Excel (versión 16) y VOSviewer (versión 1.6.15) [16].

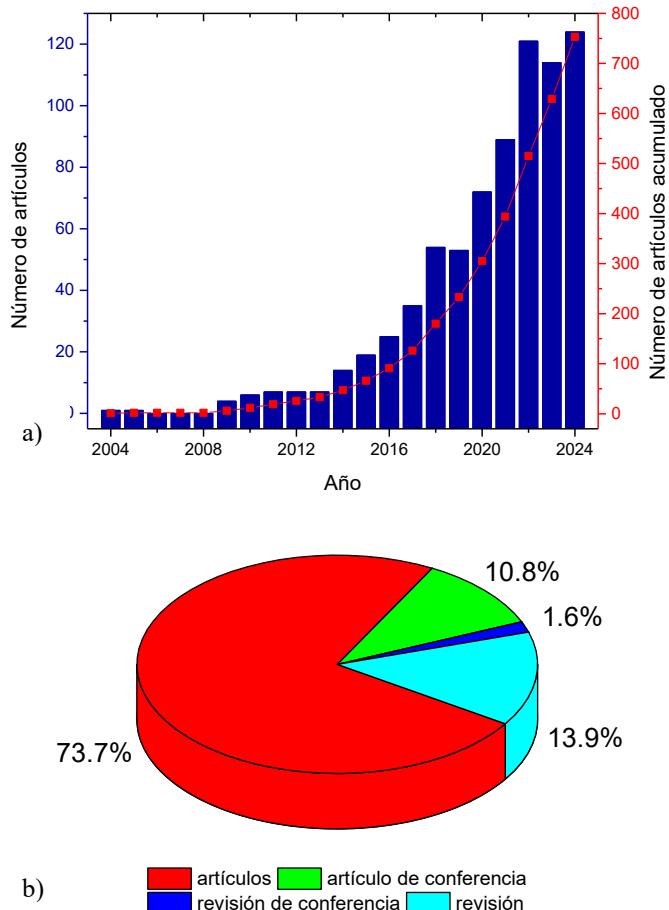


Fig. 1 a) Producción científica en el período 2004-2024 y b) tipos de documentos.

## III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Fig. 1a muestra la evolución de la producción científica relacionada con el uso de nanofluidos en sistemas solares térmicos durante el período 2004–2024. Se observa un incremento sostenido en el número anual de publicaciones, con un crecimiento más pronunciado a partir de 2014, esto refleja el creciente interés en la investigación de nanofluidos para aplicaciones solares térmicas, especialmente en la última década, lo que podría estar relacionado con avances tecnológicos y la necesidad de soluciones energéticas más eficientes [17-19]. Paralelamente, la curva acumulativa evidencia un crecimiento exponencial, superando los 750 documentos acumulados al final del periodo analizado. En la

parte inferior, la Fig. 1b muestra la distribución de los tipos de documentos científicos publicados sobre nanofluidos en sistemas térmicos solares. Según los datos, el 73.7% corresponde a artículos (investigaciones originales), lo que indica que este formato es el predominante en la literatura del

campo [20]. Le siguen las revisiones (13.9%); los artículos de conferencia (10.8%), que reflejan contribuciones en eventos académicos; y las revisiones de conferencia (1.6%), con menor representación.

TABLA II  
DOCUMENTOS MÁS RELEVANTES EN LA LITERATURA SOBRE EL USO DE NANOFUIDOS EN SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS

Documento	DOI	Año	Citaciones Locales	Citaciones Globales	Citaciones Locales Normalizadas	Citaciones Globales Normalizadas
Mahian O, 2013, Int J Heat Mass Transf	10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.10.037	2013	81	1189	5.67	5.56
Lenert A, 2012, Sol Energy	10.1016/j.solener.2011.09.029	2012	70	406	6.15	5.33
Gorji Tb, 2017, Renewable Sustainable Energy Rev	10.1016/j.rser.2017.01.015	2017	54	282	6.73	2.83
Hordy N, 2014, Sol Energy	10.1016/j.solener.2014.03.013	2014	45	247	4.77	1.05
Saidur R, 2011, Renewable Sustainable Energy Rev	10.1016/j.rser.2010.11.035	2011	42	1776	2.77	4.78
Khanafer K, 2018, Renew Energy	10.1016/j.renene.2018.01.097	2018	38	328	4.72	3.59
Sani E, 2011, Sol Energ Mater Sol Cells	10.1016/j.solmat.2011.06.011	2011	37	208	2.44	0.56
Liu J, 2015, Sol Energ Mater Sol Cells	10.1016/j.solmat.2015.01.013	2015	36	201	2.89	1.55
Michael Jj, 2015, Energy Convers Manage	10.1016/j.enconman.2015.02.017	2015	34	170	2.73	1.31
Hjerrild Ne, 2016, Sol Energ Mater Sol Cells	10.1016/j.solmat.2015.12.010	2016	33	234	3.14	2.40

La Fig. 2 destaca las instituciones con mayor producción científica en el ámbito del uso de nanofluidos en sistemas solares térmicos. Entre las afiliaciones más prominentes se encuentran Shanghai Jiao Tong University, Jiangsu University, School of Energy Science and Engineering of Central South University y University of Malaya, que lideran con 64, 50, 36 y 36 publicaciones cada una. Esta concentración de artículos refleja un fuerte interés investigativo en China, seguido por contribuciones relevantes de universidades de Malasia, Irán y Pakistán. El análisis bibliométrico indica una tendencia geográfica específica en la generación de conocimiento sobre el tema, sugiriendo polos de investigación con instituciones mayoritariamente ubicadas en Asia, esto permite establecer oportunidades estratégicas para futuras colaboraciones académicas en el desarrollo de soluciones energéticas sostenibles.

La Tabla II identifica los documentos más relevantes en la investigación sobre nanofluidos para sistemas térmicos solares, destacando contribuciones clave entre 2011 y 2018. El artículo de Mahian et al. (2013) lidera con 1,189 citaciones globales y 81 citaciones locales, reflejando su influencia tanto en el campo específico como en la literatura general [21]. Le siguen trabajos como el de Saidur et al. (2011) con 1,776 citaciones globales, aunque con menor impacto local (42 citaciones), lo que sugiere un alcance multidisciplinario [22]. Las citaciones normalizadas revelan que Lenert (2012) y Gorji (2017) tienen una influencia sostenida, con valores de 6.15 y

6.73 localmente, respectivamente. La mayoría de los artículos proceden de revistas especializadas en energía solar (Sol Energy y Renewable Sustainable Energy Rev), confirmando el enfoque temático [23,24]. La tabla subraya la evolución del campo, con contribuciones seminales entre 2011-2015 y una persistente relevancia en citaciones, pese a la antigüedad de algunos trabajos. Esta selección refleja tanto la calidad como el impacto duradero de estas investigaciones en la optimización de sistemas térmicos solares mediante nanofluidos.

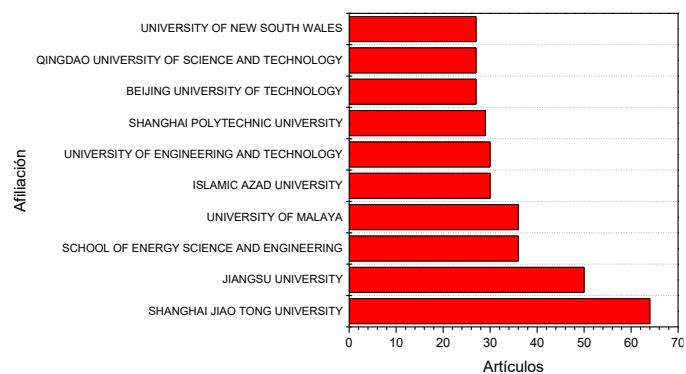


Fig. 2 Afiliaciones más relevantes en investigaciones sobre el uso de nanofluidos en sistemas solares térmicos.

En la Tabla III se destaca a los autores más influyentes en la investigación sobre nanofluidos para sistemas térmicos solares, revelando patrones de productividad e impacto. Robert A. Taylor lidera con el mayor h-index (14) y citaciones totales (2,490), consolidándose como una figura clave desde 2010, lo que refleja su influencia sostenida en el campo [25,26]. Saidur R., cuyo trabajo del 2011 ya aparecía en la Tabla II con 1,776 citaciones globales, mantiene un alto impacto (3,409 citaciones totales), aunque su m-index (0.8) sugiere una productividad menos reciente comparado con autores como Zafar Said (m-index: 1.083) o Jamshed Wasim (m-index: 1.8), quienes muestran una trayectoria ascendente

[27,28]. La presencia de investigadores como He Yurong y Yu Wei, vinculados a instituciones asiáticas, refuerza el papel central de esta región en el campo [29,30]. Destacan autores emergentes (Khan Sami Ullah, activo desde 2021) con altos m-index, indicando dinamismo en la investigación reciente [31]. Esta tabla describe un panorama donde la investigación en nanofluidos solares combina figuras consolidadas (como Taylor y Saidur) con nuevos contribuyentes, principalmente de la región Asia-Pacífico. La diversidad en índices (g-index, m-index) subraya tanto el impacto histórico como la evolución continua del campo.

TABLA III  
AUTORES MÁS RELEVANTES EN LA LITERATURA SOBRE EL USO DE NANOFUIDOS EN SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS

Autor	h-index	g-index	m-index	CT	NP	AP_inicio
TAYLOR RA	14	18	0.875	2490	18	2010
SAID Z	13	14	1.083	1472	14	2014
SAIDUR R	12	13	0.8	3409	13	2011
HE Y	11	12	1.1	1108	12	2016
WANG X	10	12	1	1126	12	2016
YU W	10	10	0.833	374	10	2014
JAMSHED W	9	11	1.8	509	11	2021
KHAN SU	9	11	1.8	215	11	2021
KUMAR S	9	11	1.5	244	11	2020
DENG T	8	8	0.8	175	8	2016

TABLA IV  
FUENTES MÁS RELEVANTES EN LA LITERATURA SOBRE EL USO DE NANOFUIDOS EN SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS

Fuente	h-index	g-index	m-index	CT	NP	AP_inicio
SOLAR ENERGY	28	40	1.867	3452	40	2011
SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS	25	33	1.667	2403	33	2011
RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS	23	24	1.533	5941	24	2011
APPLIED THERMAL ENGINEERING	20	28	1.176	1430	28	2009
JOURNAL OF THERMAL ANALYSIS AND CALORIMETRY	20	26	2.222	1086	26	2017
CASE STUDIES IN THERMAL ENGINEERING	16	28	2.667	821	30	2020
RENEWABLE ENERGY	16	22	1.6	2048	22	2016
ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT	13	13	1.083	1510	13	2014
APPLIED ENERGY	12	13	1.091	1134	13	2015
ENERGY	11	11	1.1	553	11	2016

La Tabla IV identifica las revistas más influyentes en la investigación sobre nanofluidos para sistemas térmicos solares, destacando publicaciones clave que han impulsado el avance del campo. Solar Energy lidera con el mayor h-index (28) y citaciones totales (3,452), seguida de cerca por Solar Energy Materials and Solar Cells (h-index: 25) y Renewable and Sustainable Energy Reviews (h-index: 23), esta última con un notable impacto reflejado en sus 5,941 citaciones totales.

Estas revistas, especializadas en energía solar y sostenibilidad, coinciden con los temas centrales de los documentos más citados analizados previamente en la Tabla II, como los trabajos de Mahian (2013) y Saidur (2011). Destacan también revistas como Applied Thermal Engineering y Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, que, aunque con menor h-index, muestran un alto m-index (2.222 y 2.667, respectivamente), indicando una influencia reciente y

creciente en el campo [32,33]. Esta distribución de fuentes refuerza el predominio de publicaciones enfocadas en aplicaciones energéticas y térmicas, alineándose con los autores e instituciones previamente identificados. La presencia de revistas como Case Studies in Thermal Engineering, con un m-index elevado (2.667) y un inicio reciente (2020), sugiere una evolución hacia estudios más aplicados y específicos como por ejemplo en el uso de inteligencia artificial para la optimización de nanofluidos [34].

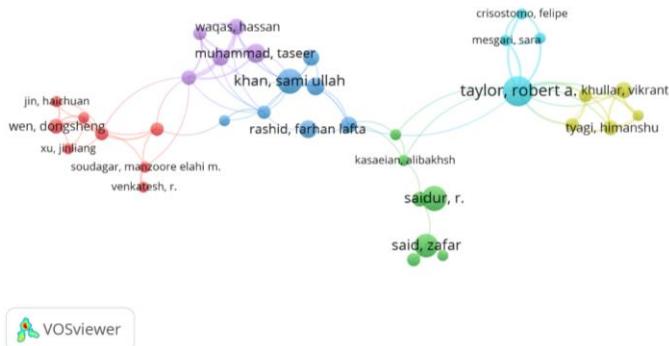


Fig. 3 Red de autores en co-autoría (realizado en VOS-viewer).

La Figura 3 presenta una red de coautorías generada con VOSviewer, revelando la estructura colaborativa predominante en la investigación sobre el uso de nanofluidos en sistemas solares térmicos. Aunque no aparecen como nodos centrales en esta visualización, vale destacar la presencia periférica pero intelectualmente significativa de Robert A. Taylor y Saidur Rahman. Ambos han sido ampliamente citados por autores dentro de la red, y su impacto se refleja más en la estructura cognitiva del campo, en la evolución de los temas, métodos y marcos teóricos. La conexión de Saidur R. con Said Z. muestra la conexión con autores emergentes con altos índices de productividad reciente, en temas relacionados sobre caracterización de nanofluidos [35]. Taylor R. A., por otro lado, cuyas conexiones con Mesgari Sara, y Crisostomo Felipe, muestra un grupo australiano importante [36], también tiene conexiones con el cluster de Khullar Vikrant y Tyagi Himanshu de la India, lo que demuestra la importancia de la colaboración internacional [37]. Khan Sami Ullah emerge en un clúster distinto, su conexión con Muhammad Taseer evidencia las fuertes relaciones entre Pakistán y Arabia Saudita en el estudio de nuevos métodos de análisis de nanofluidos [38].

Destaca también, la agrupación de autores como Jin Haichuan, Wen Dongsheng y Xu Jinliang, estrechamente conectados, lo que sugiere núcleos de producción científica altamente cohesionados, reflejando la intensa colaboración institucional en China, particularmente en investigación experimental sobre colectores solares con nanofluidos, en línea con las instituciones chinas previamente mencionadas que lideran en volumen de publicaciones [39]. Wen Dongsheng, y sus vínculos con autores, como Navarrete N. (España) y Ding Y. (UK), refuerzan la dimensión

internacional del campo [40,41]. Este mapa no solo permite identificar clústeres productivos, sino también zonas potenciales para reforzar la colaboración internacional, especialmente entre investigadores con enfoques complementarios en transferencia de calor, eficiencia energética y diseño de sistemas híbridos.

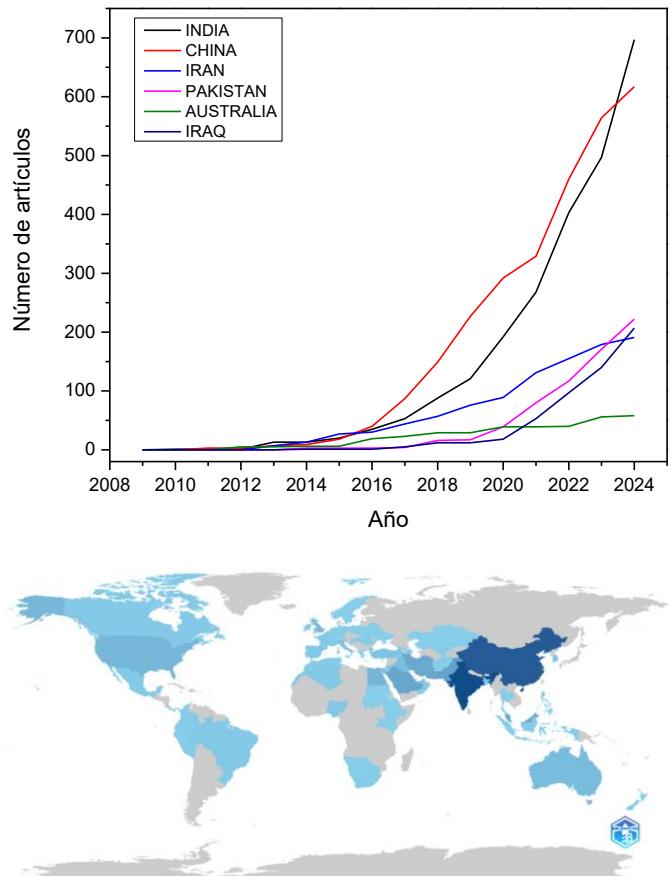


Fig. 4 Producción científica por país por autor correspondiente (realizado en Biblioshiny con R-Studio).

La evolución de la producción científica por país en el campo (Fig. 4) revela patrones significativos en la consolidación geográfica del conocimiento. India emerge como líder indiscutible con un crecimiento acelerado a partir de 2018, impulsado en parte por la destacada actividad investigadora de autores como Reddy y Padma [42]. China le sigue de cerca con un aporte constante desde 2016, respaldado por figuras influyentes como He Yurong, Yu Wei, y Wen Dongsheng, lo cual refuerza lo observado en los análisis previos, donde autores y afiliaciones chinas mostraban una alta densidad colaborativa. Países como Irán y Australia presentan una evolución sostenida pero más moderada, mientras que Pakistán e Irak contribuyen con producciones emergentes, mostrando un rápido crecimiento a partir del 2020. El mapa de calor geográfico evidencia que Asia es el epicentro del desarrollo científico en esta temática, impulsados probablemente por un mayor interés en el desarrollo de

energías renovables como un enfoque estratégico para reducir el uso de combustibles fósiles [43,44]. Este conocimiento, permite a los investigadores establecer y fortalecer redes académicas internacionales y fomentar investigaciones interdisciplinarias en eficiencia energética, transferencia de calor y materiales avanzados.

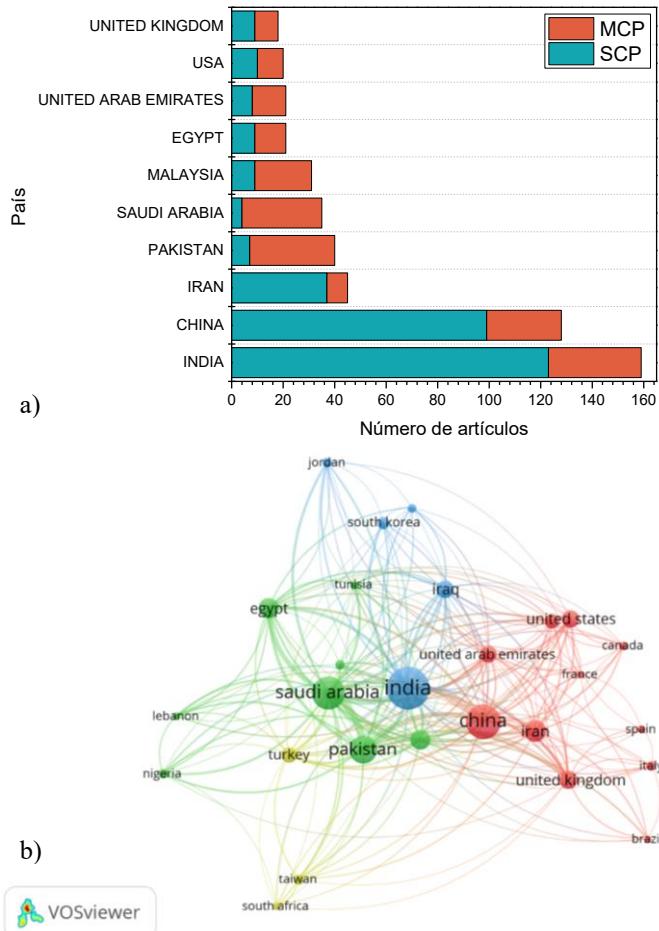


Fig. 5 a) Producción científica por país por autor correspondiente (realizado en Bibioshiny con R-Studio) y b) Red de colaboración científica entre países (realizado en VOS-viewer).

La Fig. 5a ofrece una visión integral de la producción y colaboración científica global en nanofluidos para sistemas térmicos solares. Con predominancia de publicaciones de un solo país (SCP), India lidera en volumen total, reflejando un fuerte núcleo nacional de investigación. China, en segundo lugar, respaldada por redes densas que involucran a autores como Jin Haichuan y Xu Jinliang. Irán destaca también, con más de 40 publicaciones totales. En cambio, Pakistán, Arabia Saudita y Malasia, aunque con menor volumen, presentan una proporción relevante de MCP, lo que indica una orientación colaborativa que se ve reflejada en la red interpaís [38]. Países como Estados Unidos, Egipto, Emiratos Arabes Unidos y Reino Unido muestran una producción moderada,

equilibrando su producción entre colaboraciones internas y múltiples.

La red de colaboración entre países (Fig. 5b) muestra la arquitectura colaborativa global en torno al estudio de nanofluidos aplicados a sistemas solares térmicos. India, Arabia Saudita y China destacan como nodos principales, evidenciando una alta productividad científica. Arabia saudita, por su parte guarda relación con India, Egipto y Pakistán entre otros países del oriente medio, estos países buscan disminuir su relación del petróleo mediante investigaciones científicas y el desarrollo de energías [45]. El clúster formado por países occidentales como Estados Unidos, Reino Unido, Francia, Canada e Italia conectan con países asiáticos como Irán, Emiratos Arabes Unidos y China, facilitando el intercambio interdisciplinario en el sector de la nanotecnología e ingeniería energética [46]. Estos hallazgos refuerzan que el campo es impulsado por sinergias entre la masa crítica asiática y la cooperación técnica internacional, esencial para avanzar en aplicaciones energéticas sostenibles.

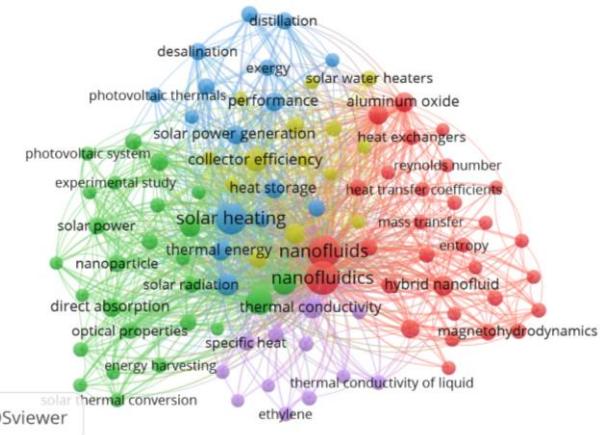


Fig. 6 Red de co-ocurrencia de palabras clave de índice (realizado en VOS-viewer).

La red de co-ocurrencia de palabras clave es presentada en la Fig. 6, esta muestra la estructura temática de la investigación sobre el uso de nanofluidos en sistemas solares térmicos. En el gráfico, se identifican varios clústeres temáticos bien definidos, representados por colores diferentes. El término central “nanofluids” aparece como el nodo más prominente, indicando su papel clave en el campo. Este se conecta fuertemente con palabras como “thermal conductivity”, “solar heating”, “thermal energy” y “hybrid nanofluid”, lo que sugiere un enfoque en el análisis del transporte de calor y la eficiencia térmica. El clúster rojo, por ejemplo, agrupa términos relacionados con transferencia de calor y masa, como “entropy”, “heat exchangers” y “Reynolds number”, mostrando una orientación hacia estudios termodinámicos y de dinámica de fluidos. El clúster verde incluye conceptos asociados a aplicaciones solares y estudios experimentales, como “solar radiation”, “photovoltaic system” y “optical properties”. Otros grupos incluyen temas como la

desalinización, sistemas híbridos y propiedades específicas de los nanofluidos. Esta red evidencia la naturaleza multidisciplinaria del campo, abarcando desde el diseño experimental y optimización de colectores solares hasta el estudio detallado de las propiedades termo-físicas de los nanofluidos.

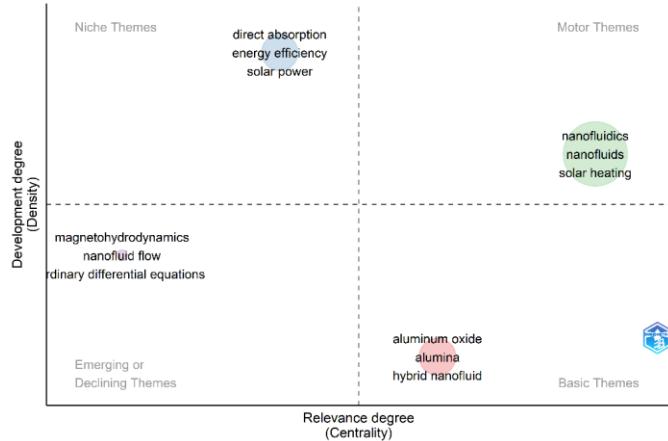


Fig. 7 Mapa temático (realizado en Biblioshiny con R-Studio).

El mapa temático, presentado en la Fig. 7, proporciona una visión estratégica de los principales temas abordados en la investigación sobre nanofluidos en sistemas solares térmicos, clasificándolos según su centralidad (grado de relevancia) y densidad (grado de desarrollo). En el cuadrante superior derecho (temas motores), destacan “nanofluids”, “nanofluidics” y “solar heating”, los cuales son altamente relevantes y desarrollados, reflejando su papel central y consolidado en el área, lo cual concuerda con su protagonismo en la red de co-ocurrencia de palabras clave previamente analizada. En el cuadrante inferior derecho (temas básicos), aparecen términos como “aluminum oxide”, “alumina” y “hybrid nanofluid”, indicando que, aunque son fundamentales para la investigación, aún presentan un desarrollo más incipiente. Por otro lado, en el cuadrante superior izquierdo (temas especializados o de nicho), se encuentran “direct absorption”, “energy efficiency” y “solar power”, los cuales presentan un alto nivel de desarrollo, pero menor conexión con otras temáticas, sugiriendo áreas de investigación más específicas o técnicas. Finalmente, en el cuadrante inferior izquierdo (temas emergentes o en declive), se ubican “magnetohydrodynamics”, “nanofluid flow” y “ordinary differential equations”, que podrían representar líneas de investigación emergentes o menos exploradas. En conjunto, este análisis refuerza la relevancia de los nanofluidos como eje central del campo y destaca oportunidades de profundización en temas básicos y emergentes.

#### IV. CONCLUSIONES

El análisis bibliométrico realizado evidencia que la investigación sobre el uso de nanofluidos en sistemas solares

térmicos ha experimentado un crecimiento sostenido desde el 2004 hasta el 2024, consolidándose como un campo dinámico y multidisciplinario dominado por Asia, particularmente India y China, tanto en volumen como en densidad colaborativa, articuladas por instituciones como la Shanghai Jiao Tong University y Jiangsu University. Aunque el campo muestra madurez con contribuciones vigentes y con influencia sostenida en el tiempo, como las de Mahian O., Saidur R. y Taylor R. A.; la aparición de nuevos autores, como Zafar Said y Jamshed Wasim, señalan una evolución continua, orientada a optimizar la eficiencia térmica con enfoques innovadores y sostenibles. Las palabras clave más frecuentes, como “nanofluids”, “solar heating” y “thermal conductivity”, reflejan el enfoque predominante en la mejora del rendimiento térmico. El mapa temático revela que estos conceptos son temas motores, altamente desarrollados y centrales en la literatura científica, siendo las revistas especializadas en energía solar como Solar Energy y Renewable and Sustainable Energy Reviews los principales canales de difusión. Finalmente, palabras como “magnetohydrodynamics” y “nanofluid Flow” sugieren líneas emergentes que podrían representar futuras oportunidades de investigación en el diseño y optimización de tecnologías solares basadas en nanofluidos.

#### REFERENCES

- [1] Torres, P. J. R. Combustibles, fósiles y contaminación. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 8(1), 11, 1999.
- [2] Ormeño Muñoz S. H. Aplicación de paneles solares termodinámicos en sistemas solares térmicos [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Institucional UC, 2016.
- [3] Suman, S., Khan, M. K., & Pathak, M. Performance enhancement of solar collectors—A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 49, 192–210, 2015.
- [4] Mahian, O., Kianifar, A., Kalogirou, S. A., Pop, I., & Wongwises, S. A review of the applications of nanofluids in solar energy. International Journal of Heat and Mass Transfer, 57(2), 582-594, 2013.
- [5] Silva P. & Romero F. Propuesta de un sistema de energía solar térmica como forma de mitigar emisiones de CO<sub>2</sub>. Estudio de caso Sonesta Hotel Bogotá [Tesis de posgrado Universidad Agustiniana]. Repositorio Institucional UA, 2019.
- [6] Campos C. A. Efecto de distintos nanofluidos en la absorción de radiación solar. [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio institucional UC, 2018.
- [7] Gómez R. Nanofluidos basados en nanopartículas metálicas con propiedades térmicas optimizadas para su uso en la industria termosolar [Tesis Doctoral, Universidad de Cádiz]. Repositorio Institucional UCA, 2018.
- [8] Selvakumar, P., & Suresh, S. Convective performance of CuO/water nanofluid in an electronic heat sink. Experimental Thermal and Fluid Science, 40, 57-63, 2012.
- [9] Khedkar, R. S., Sonawane, S. S., & Wasewar, K. L. Influence of CuO nanoparticles in enhancing the thermal conductivity of water and monoethylene glycol based nanofluids. International Communications in Heat and Mass Transfer, 39(5), 665-669, 2012.
- [10] Yusuf, A., Bhatti, M. M., & Ellahi, R. Study of ionic water/graphene nanofluids in solar panels under the effects of thermal radiation and slip conditions using experimental data. International Communications in Heat and Mass Transfer, 164, 108845, 2025.
- [11] Vergara Morales, C. Nanofluidos de disulfuro de molibdeno para aplicaciones en colectores solares por absorción directa (DASC). [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Institucional UC, 2022.

- [12]Chen, M., Arcia, A., Díaz, N., & Medina, A. Evaluación de fluidos caloportadores no convencionales para aplicación solar térmica: Un estudio numérico en Panamá. *Revista de Iniciación Científica*, 7(2), 50-57, 2021.
- [13]Farooq, U., Ali, A. B., Fatima, N., Khan, S. A., Noreen, S., Imran, M., & Muhammad, T. Applications of hybrid nanofluid in advanced solar thermal technologies with enhanced heat transfer with Cattaneo–Christov heat flux in a cylinder. *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 105(2), e202400286, 2025.
- [14]Zhang, C., Wang, N., Qu, Z., Ma, Z., & Xu, H. Multi-objective optimization of an advanced multiscale full spectrum concentrated solar photovoltaic/thermal system with nanofluid beam splitter. *Renewable Energy*, 245, 122862, 2025.
- [15]Cañedo Andalia, R., Rodríguez Labrada, R., & Montejo Castells, M. Scopus: la mayor base de datos de literatura científica arbitrada al alcance de los países subdesarrollados. *Acimed*, 21(3), 270-282, 2010.
- [16]Van Eck, N., & Waltman, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523-538, 2010.
- [17]García, E. M., Fernández, J. P. S., & García, A. (2016). Mecanismos de mejora de la eficiencia en colectores solares térmicos mediante técnicas de rugosidad artificial. In *Comunicaciones presentadas al XX Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos. Asociación Española de Ingeniería de Proyectos (AEIPRO)*, Cartagena, 63, 2016.
- [18]Ruiz, M. I. (2022). Nanofluidos: la nueva generación de fluidos. *Manufactura y gestión del ciclo de vida del producto (PLM)*, 154, 2022.
- [19]Fakhrulddin, M. A., Abbas, E. F., & Yagoob, J. A. Assessment of thermal performance of PV/T collectors under different enhancement methods: A review study. In *AIP Conference Proceedings*, 2862(1), 020026, 2023.
- [20]Cué Brugueras, M., & Oramas Díaz, J. Síntesis de información y artículos de revisión. *Acimed*, 17(2), 0-0, 2008.
- [21]Mahian, O., Kianifar, A., Kalogirou, S. A., Pop, I., & Wongwises, S. (2013). A review of the applications of nanofluids in solar energy. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 57(2), 582-594, 2013.
- [22]Saidur, R., Leong, K. Y., & Mohammed, H. A. A review on applications and challenges of nanofluids. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(3), 1646-1668, 2011.
- [23]Gorji, T. B., & Ranjbar, A. A. A review on optical properties and application of nanofluids in direct absorption solar collectors (DASCs). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 10-32, 2017.
- [24]Lenert, A., & Wang, E. N. Optimization of nanofluid volumetric receivers for solar thermal energy conversion. *Solar Energy*, 86(1), 253-265, 2012.
- [25]Otanicar, T. P., Phelan, P. E., Prasher, R. S., Rosengarten, G., & Taylor, R. A. Nanofluid-based direct absorption solar collector. *Journal of renewable and sustainable energy*, 2(3), 2010.
- [26]Taylor, R. A., Phelan, P. E., Otanicar, T. P., Walker, C. A., Nguyen, M., Trimble, S., & Prasher, R. Applicability of nanofluids in high flux solar collectors. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 3(2), 2011.
- [27]Said, Z., Hachicha, A. A., Aberoumand, S., Yousef, B. A., Sayed, E. T., & Bellos, E. Recent advances on nanofluids for low to medium temperature solar collectors: energy, exergy, economic analysis and environmental impact. *Progress in Energy and Combustion science*, 84, 100898, 2021.
- [28]Jamshed, W. Thermal augmentation in solar aircraft using tangent hyperbolic hybrid nanofluid: A solar energy application. *Energy & Environment*, 33(6), 1090-1133, 2022.
- [29]Wang, X., Liu, D., Liu, X., & He, Y. Graphene oxide stabilized carbon nanotube-water nanofluids for direct absorption solar collectors. In *IOP conference series: materials science and engineering*. 556(1), 012037, 2019.
- [30]Qu, J., Zhou, G., Zhang, M., Shang, L., & Yu, W. Effect of reverse irradiation angle on the photo-thermal conversion performance of MXene nanofluid-based direct absorption solar collector. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 251, 112164, 2023.
- [31]Khan, S. U., Bibi, S., Bibi, A., Saleem, K. B., Alshammari, B. M., Hajlaoui, R., & Kolsi, L. Evaluation of thermal bioconvective phenomenon for periodically accelerating nonlinear radiated flow of Maxwell nanofluid with triple diffusion effects. *Alexandria Engineering Journal*, 93, 22-32, 2024.
- [32]Sathish, T., Giri, J., Saravanan, R., Ubaidullah, M., Shangdiar, S., Iikela, S., ... & Amesho, K. T. Amplifying thermal performance of solar flat plate collector by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cu/MWCNT/SiO<sub>2</sub> mono and hybrid nanofluid. *Applied Thermal Engineering*, 252, 123692, 2024.
- [33]Almohammadi, B. A., Alharthi, M. A., Alshareef, R. S., Sharafeldin, M. A., Refaey, H. A., & El-Ghany, H. A. Effects of hybrid ZnO-WO<sub>3</sub>/water nanofluid on the performance of active solar still equipped with a heat exchanger. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149(15), 8631-8645, 2024.
- [34]Kumar, K. P., Khedkar, R., Sharma, P., Elavarasan, R. M., Paramasivam, P., Wanatasanappan, V. V., & Dhanasekaran, S. Artificial intelligence-assisted characterization and optimization of red mud-based nanofluids for high-efficiency direct solar thermal absorption. *Case Studies in Thermal Engineering*, 54, 104087, 2024.
- [35]Said, Z., Saidur, R., Hepbasli, A., & Rahim, N. A. New thermophysical properties of water based TiO<sub>2</sub> nanofluid—The hysteresis phenomenon revisited. *International communications in heat and mass transfer*, 58, 85-95, 2014.
- [36]Mesgari, S., Taylor, R. A., Hjerrild, N. E., Crisostomo, F., Li, Q., & Scott, J. An investigation of thermal stability of carbon nanofluids for solar thermal applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 157, 652-659, 2016.
- [37]Salvi, S. S., Bhalla, V., Taylor, R. A., Khullar, V., Otanicar, T. P., Phelan, P. E., & Tyagi, H. Technological advances to maximize solar collector energy output: a review. *Journal of Electronic Packaging*, 140(4), 040802, 2018.
- [38]Hamid, A., Naveen Kumar, R., Punith Gowda, R. J., Varun Kumar, R. S., Khan, S. U., Ijaz Khan, M., ... & Muhammad, T. (2024). Impact of Hall current and homogenous-heterogenous reactions on MHD flow of GO-MoS<sub>2</sub>/water (H<sub>2</sub>O)-ethylene glycol (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>) hybrid nanofluid past a vertical stretching surface. *Waves in Random and Complex Media*, 34(5), 3928-3945, 2024.
- [39]Amjad, M., Jin, H., Du, X., & Wen, D. Experimental photothermal performance of nanofluids under concentrated solar flux. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 182, 255-262, 2018.
- [40]Navarrete, N., Mondragón, R., Wen, D., Navarro, M. E., Ding, Y., & Juliá, J. E. Thermal energy storage of molten salt-based nanofluid containing nano-encapsulated metal alloy phase change materials. *Energy*, 167, 912-920, 2019.
- [41]Amjad, M., Jin, H., Du, X., & Wen, D. Experimental photothermal performance of nanofluids under concentrated solar flux. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 182, 255-262, 2018.
- [42]Padma, S. V., Mallesh, M. P., Jamuna, B., Reddy, S. R. R., & Jakeer, S. Exploring double-diffusive convection in ferromagnetic Carreau nanofluid with magnetic dipole: Insights for solar thermal systems over plate, wedge, and stagnation. *Case Studies in Thermal Engineering*, 61, 104952, 2024.
- [43]Hajimineh, R., & Moghani, A. M. The important factors of Saudi Arabian policy-making in renewable energy resources. *Future Energy*, 2(2), 29-38, 2023.
- [44]Villar-Roldán, J. J., Galiano, A., & Martín-Álvarez, J. M. Economic and geopolitical drivers of renewable energy in Sub-Saharan Africa: A panel data analysis. *Energy Economics*, 147, 108479, 2025.
- [45]Naqvi, S. M. R. S., Waqas, H., Yasmin, S., Liu, D., Muhammad, T., Eldin, S. M., & Khan, S. A. (2022). Numerical simulations of hybrid nanofluid flow with thermal radiation and entropy generation effects. *Case Studies in Thermal Engineering*, 40, 102479.
- [46]Ghazinoory, S., Divsalar, A., & Soofi, A. S. A new definition and framework for the development of a national technology strategy: The case of nanotechnology for Iran. *Technological Forecasting and Social Change*, 76(6), 835-848, 2009.