

Green Computing in Data Centers: Strategies for Energy Optimization and Carbon Footprint Mitigation – A Systematic Review

José Suaña Cruzarte¹ ; José Carlos Ormeño¹ ; Cristhian Ronceros-Morales¹ 

¹ Universidad Tecnológica del Perú, Facultad de Ingeniería de Sistemas e Informática, Perú. U20211611@utp.edu.pe, U20217994@utp.edu.pe, C20605@utp.edu.pe

Abstract— *The accelerated growth of Data Centers and Cloud Computing has significantly contributed to the increase in global energy consumption and carbon emissions, creating an urgent need to adopt green computing strategies aimed at sustainability. This study conducts a Systematic Literature Review (SLR) with the purpose of identifying and analyzing the most effective strategies for energy optimization and carbon footprint reduction within data center environments. The PICO methodology was used as the basis for the research. A structured search filter was applied in the SCOPUS database, covering the period from 2020 to 2025 and following the guidelines of the PRISMA model. The search initially yielded a total of 244 articles, which were filtered by year, language, and accessibility, and then screened using inclusion and exclusion criteria (focused on the PICO questions). In the end, 52 articles were selected. These articles address key topics such as the use of renewable energy sources, advanced thermal management techniques, virtualization, and intelligent energy optimization algorithms. The results highlight a comprehensive approach that integrates operational effectiveness, technological innovation, and environmental sustainability to improve the energy performance of data centers.*

Keywords-- *green computing, data centers, energy efficiency, carbon footprint, sustainability*

Computación Verde en Centros de Datos: Estrategias para la Optimización Energética y la Mitigación de la Huella de Carbono – Una Revisión Sistemática.

José A. Suaña¹ ; Cristhian Ronceros-Morales² 

^{1,2} Universidad Tecnológica del Perú, Facultad de Ingeniería de Sistemas e Informática, Perú. U20211611@utp.edu.pe, C20605@utp.edu.pe

Resumen- El crecimiento acelerado de los Centros de Datos y la Computación en la Nube ha contribuido significativamente al aumento del consumo energético global y de las emisiones de carbono, lo que ha generado una urgente necesidad de adoptar estrategias de computación verde orientadas a la sostenibilidad. En el presente estudio se realiza una Revisión Sistemática de Literatura (RSL) con la finalidad de identificar y analizar las estrategias más efectivas en la optimización energética y la reducción de la huella de carbono dentro de los entornos de los centros de datos. Dentro del estudio se empleó la metodología PICO como base para la investigación. Se realizó un filtro de búsqueda estructurado en la base de datos de SCOPUS, cubriendo los periodos entre 2020-2025, y siguiendo los lineamientos de la guía del modelo PRISMA. La búsqueda inicio con un total de 244 artículos. Estos fueron filtrados por año, idioma y accesibilidad, y luego se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión (enfocados en las preguntas PICO). Finalmente, se seleccionaron 52 artículos. Dichos artículos abordan temas esenciales como el uso de fuentes de energía renovables, el uso de técnicas avanzadas de gestión térmica, virtualización y algoritmos inteligentes de optimización energética. Los resultados muestran un enfoque integral que combina efectividad operativa, innovación tecnológica y sostenibilidad ambiental para mejorar el desempeño energético de los centros de datos.

Palabras clave-- computación verde, centros de datos, eficiencia energética, huella de carbono, sostenibilidad

I. Introducción

El auge de los centros de datos y la computación en la nube ha transformado la economía digital mundial, pero también ha aumentado el consumo energético del sector y su huella de carbono [1], [2]. Los centros de datos se basan en arquitecturas distribuidas y heterogéneas que exigen alta disponibilidad (24/7), tolerancia térmica y flexibilidad operativa, creando tensiones simultáneas entre rendimiento, costes operativos y sostenibilidad [3], [4].

En este marco, se han propuesto infraestructuras de centros de datos neutras en carbono que combinan captura de CO₂, conversión de energía en gas y control inteligente basado en aprendizaje por refuerzo multiagente, con estudios recientes que muestran reducciones combinadas de costos energéticos y emisiones utilizando datos operativos reales, pero con implementación limitada a casos piloto o controlados [5].

Además, la optimización algorítmica del uso de recursos con metaheurísticas, aprendizaje por refuerzo y esquemas avanzados de programación energética se ha convertido en

una principal línea de investigación para minimizar el consumo energético y las emisiones en cargas de trabajo variables y restricciones térmicas severas [6]–[9], con soluciones principalmente de software que no requieren cambios costosos en la infraestructura física.

A pesar de estos avances, aún existen lagunas importantes en la literatura y en la práctica industrial: primero, la variabilidad térmica y los sistemas redundantes de refrigeración siguen consumiendo una parte importante de la energía total, especialmente en configuraciones con pasillos frío/caliente y sistemas de refrigeración líquida e inmersiva [10]–[12]; y segundo, la recuperación y utilización del calor residual aún enfrenta desafíos relacionados con el diseño del sistema, la integración urbana y la estacionalidad de la demanda, aunque hay pruebas de su potencial de descarbonización en campus universitarios y entornos urbanos [13]–[16]. En tercer lugar, la integración de energías renovables y la migración activa de cargas según su intensidad de carbono demandan una sincronización fina entre las operaciones de TI y las redes eléctricas, con grandes beneficios cuando la migración se realiza a escala interregional y se evita la curtailment de generación renovable [17]–[19]. Finalmente, la coexistencia de múltiples criterios y metodologías de evaluación (como el uso dominante del PUE frente a métricas ajustadas por carbono, o enfoques basados en temperatura frente a análisis exergéticos) dificulta la comparación sistemática de resultados y la identificación de mejores prácticas en diferentes contextos climáticos y tecnológicos [20]–[23].

Desde un punto de vista político y legislativo, varios países han fomentado el desarrollo de centros de datos "verdes" con marcos legislativos que apoyen la eficiencia energética, las energías renovables y la reducción de emisiones, pero aún existen disparidades legislativas, dificultades de trazabilidad de carbono y diferencias entre las metas anunciadas y el rendimiento real de las operaciones de TI [17], [24], [25]. Informes recientes sobre la huella ambiental de los centros de datos en Estados Unidos ilustran la magnitud del desafío y la necesidad de enfoques integrales que aborden la eficiencia energética, la electrificación limpia, el almacenamiento y la gestión sensible al carbono [1], [26], [27].

Paralelamente, enfoques técnicos de impacto probado han emergido en la literatura reciente, tales como estrategias de gestión térmica inteligente con control zonificado en función de la carga TI [28], optimización de sistemas HVAC

usando nanofluidos [29], técnicas avanzadas de refrigeración por absorción y de dos fases para puntos calientes [12], [30], o esquemas de gestión de cargas basados en energía y exergía que sincronizan la carga TI con la dinámica termo-fluídica de la sala de datos [22].

En este contexto, esta revisión sistemática abarca el período 2020-2025 de estrategias de eficiencia energética y reducción de huella de carbono en centros de datos y entornos de computación en la nube, que se categorizan en cuatro áreas principales: (i) optimización y programación de cargas de trabajo (metaheurísticas, aprendizaje por refuerzo, migración de máquinas virtuales y conectividad); (ii) gestión térmica y tecnologías de refrigeración (control avanzado, refrigeración líquida y por absorción, análisis exergético); (iii) integración de energías renovables, almacenamiento y colaboración con la red eléctrica (gestión sensible al carbono, respuesta a la demanda); y (iv) recuperación y aprovechamiento del calor residual en sistemas energéticos de campus y vecindarios [6], [7], [12], [13], [15], [16], [18], [27], [35].

Finalmente, debido a la gran dispersión de casos de estudio, métricas y contextos climáticos que se encuentran en la literatura, esta revisión sintetiza narrativamente la evidencia en lugar de realizar un metanálisis cuantitativo, lo que permite revelar patrones fuertes, barreras para la implementación y oportunidades para la estandarización metodológica y la reproducibilidad de resultados que aceleren la transición hacia centros de datos de bajas emisiones sin sacrificar la confiabilidad y continuidad del servicio [20], [21], [26], [29].

II. Metodología

A. Identificación de las interrogantes secundarias de la investigación.

A través de la implementación de la metodología PICO se planteó la siguiente pregunta para definir la propuesta de investigación: ¿En centros de datos, las estrategias de computación verde frente a la operación convencional reducen el consumo energético y la huella de carbono manteniendo fiabilidad y costos aceptables? Adicionalmente se desarrollaron las siguientes preguntas a la metodología PICO, que se muestran en la siguiente tabla

Tabla I
Preguntas PICO

P	¿Qué tipos de centros de datos (hyperscale, colocation, edge, HPC, micro-DC, cloud/on-premise) son objeto de aplicación de estrategias de eficiencia energética y sostenibilidad?
I	¿Qué estrategias de computación verde se aplican (virtualización, renovables, enfriamiento, optimización)?
C	¿Qué diferencias existen entre centros con estrategias verdes y convencionales?
O	¿En qué medida las estrategias verdes reducen los indicadores clave como PUE y CUE en los centros de datos?

Mediante el análisis de estas preguntas, se busca profundizar sobre las estrategias de computación verde que se están aplicando en los centros de datos.

B. Identificación Proceso de Búsqueda

Para el desarrollo de trabajo se utilizó como fuente de investigación, la base de datos Scopus. Esta base de datos proporciono información altamente relevante para el proceso de búsqueda. Luego se procedió a realizar las preguntas PICO con sus componentes que se desprenden de la misma, obteniendo una ecuación de búsqueda, la cual permitió obtener información relevante del tema de investigación.

La ecuación de búsqueda obtenida es la siguiente: (TITLE-ABS-KEY("data center" OR "green data center" OR "sustainable data center" OR "edge data center" OR "micro-DC" OR "hyperscale data center" OR "colocation data center" OR "cloud data center" OR "High Performance Computing" OR HPC) AND TITLE-ABS-KEY("green computing" OR "sustainable computing" OR "energy efficiency" OR "energy optimization" OR "carbon efficiency" OR virtualization OR "server consolidation" OR "power management" OR "thermal management" OR "cooling systems" OR "liquid cooling" OR "heat recovery" OR "renewable energy" OR microgrid* OR "demand response" OR "workload management" OR "AI for energy optimization") AND TITLE-ABS-KEY(PUE OR CUE OR WUE OR "carbon emissions" OR "carbon footprint" OR "energy savings" OR "sustainability metrics")) AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE,"ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE,"re")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE,"English")) AND (LIMIT-TO (OA,"all"))

C. Criterios de inclusión y exclusión

Para el desarrollo de la investigación se realizaron los criterios de inclusión (I) / exclusión (E), ver tabla 2.

Tabla II
Criterios de inclusión y exclusión

C.I – 1	Artículos proporcionados de la plataforma Scopus
C.I – 2	Estudios que abarquen temas sobre estrategias de computación verde en los centros de datos
C.I – 3	Estudios que abarquen un tiempo limitado, entre 2020-2025.
C.I – 4	Se consideraron estudios en el idioma Ingles
C.E – 1	Artículos de acceso restringido
C.E – 2	Se excluye artículos que no cuenten con suficiente sustento en la información
C.E – 3	Falta de métricas de sostenibilidad
C.E - 4	Se excluyen artículos con enfoque comercial, no técnico o superficial

D. Selección de datos

Una vez obtenidos los artículos de la base de datos SCOPUS y para su organización se usó el diagrama PRISMA, el cual fue fundamental para el análisis de la información, siendo un diagrama de flujo para los datos pertinentes sobre estrategias de computación verde en centros de datos. La lista de artículos que apoyan la presente investigación se codificó en esta sección, figura 1.

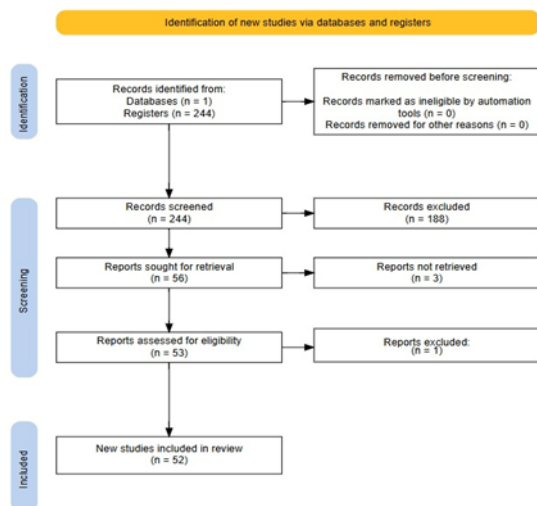


Fig. 1 Diagrama de flujo PRISMA
Fuente: Elaboración propia

III. Resultados

En esta parte se muestran los resultados de la revisión sistemática de literatura (RSL) que muestran las tendencias temporales, las revistas y los países más relevantes en el área de estudio, lo que permite conocer las estrategias más utilizadas en la literatura, así como el año y el país de publicación.

La tabla 3 presenta la distribución de los artículos según las estrategias aplicadas, esta clasificación permite identificar los principales enfoques considerados en la literatura, además de indicar el año y el país de origen.

TABLA III
ARTICULOS DISTRIBUIDOS POR ESTRATEGIAS

Artículo	Año	País	Estrategias Implementadas	%
[6], [7], [8], [9], [22], [31], [32], [33], [35], [37], [38], [40], [44], [45], [49], [50]	2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025	China, Myanmar, India, Canadá, Irán, Arabia Saudita, Corea del Sur	Gestión de cargas y recursos (scheduling/VM edge-fog-cloud)	30.77%
[10], [11], [12], [21], [28], [29], [30], [41], [42], [43]	2021, 2022, 2023, 2025	Taiwán, Francia, China, India, Australia, Italia, Países Bajos, Turquía	Gestión térmica y tecnologías de enfriamiento (PUE)	19.23%
[5], [18], [19], [23], [27], [34], [36], [48]	2020, 2021, 2022, 2024, 2025	China, Estados Unidos, Irlanda, Alemania	Abastecimiento energético y operación "carbon-aware"	15.38%
[13], [14], [15], [16]	2020, 2023	Finlandia, España, Países Bajos, Dinamarca	Reutilización de calor (WHR) y valorización térmica	7.69%
[1], [2], [17], [52]	2020, 2021	Estados Unidos, China, Arabia Saudita	Medición, métricas y modelización (PUE/CUE/CO ₂)	7.69%
[3], [4], [20], [24], [25], [26], [39], [51]	2022, 2023, 2024, 2025	Australia, Bangladesh, Canadá, China, Reino Unido, India	Políticas, gobernanza y hojas de ruta (incl. revisiones)	15.38%

En la tabla 4 se presenta la distribución de los artículos según el sector de aplicación, lo que permite analizar los ámbitos tecnológicos más estudiados, a y as su vez, refleja la diversidad y la evolución de los escenarios considerados en la literatura.

TABLA IV
ARTICULOS DISTRIBUIDOS POR SECTOR DE APLICACIÓN

Artículo	Año	País	Sector de Aplicación	%
[2], [5], [10], [12], [13], [21], [22], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [33], [43]	2020, 2021, 2022, 2023, 2025	China, Taiwán, Finlandia, India, Canadá, Australia, Italia, Países Bajos, Arabia Saudita, Turquía	Centro de Datos	28.85%
[38], [40]	2021, 2025	Arabia Saudita, China	Centro de Datos Híbrido	3.85%
[11], [16], [19], [23], [24], [42], [46]	2020, 2022, 2023, 2024	Francia, Dinamarca, China, Irlanda, España	Centros de datos de gran escala	13.46%
[48]	2021	Alemania	Centros de datos energéticamente intensivos	1.92%
[34], [37]	2021, 2020	China, India	Centros de datos geo-distribuidos	3.85%
[3], [4], [6], [7], [8], [9], [17], [18], [31], [32], [35], [36], [39], [44], [45], [47], [49], [50], [51], [52]	2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025	Australia, Bangladesh, China, Myanmar, India, Estados Unidos, Irán, Arabia Saudita, Reino Unido, Corea del Sur	Cloud data center	38.46%
[14], [15]	2023, 2020	España, Países Bajos	Data Center universitario	3.85%
[20]	2025	Canadá	Edge Computing	1.92%
[1]	2021	Estados Unidos	Hyperscale data center	1.92%
[41]	2025	China	Prototipo de Intelligent Data Center	1.92%

Para los estudios se han considerado los artículos entre los años 2020 hasta 2025. En la siguiente figura 2, se muestra la cantidad de publicaciones por año, reflejando que la mayor cantidad de publicaciones fue en el año 2020 con 12 publicaciones, el año 2025 cuenta con 11 publicaciones, demostrando que este tipo de estudios es muy importante actualmente, el año 2021 cuenta con 10 publicaciones, el año 2022 tiene 7 publicaciones, mientras que el año 2023 cuenta con 8 publicaciones y en el año 2024 se muestra con 4 publicaciones. Las estrategias implementadas en los centros de datos para el control de las emisiones de carbono, son un tema muy importante y relevante, siendo de interés para los investigadores en los últimos años.

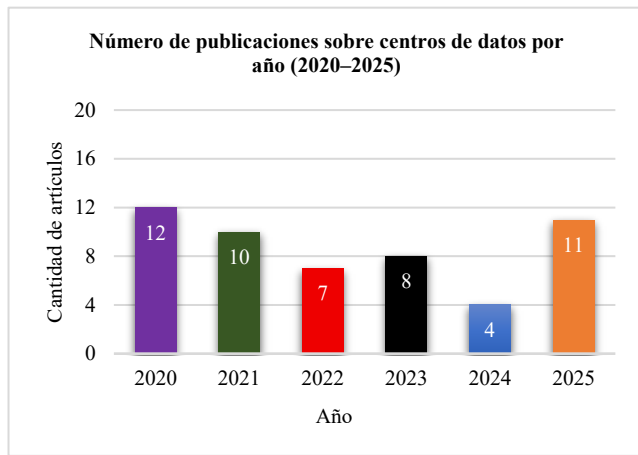


Fig. 2 Distribución anual de artículos
Fuente: Elaboración propia

La figura 3 muestra la distribución geográfica de los artículos publicados. Esta representación geográfica facilita la comprensión de los patrones mediante la intensidad de los colores y la procedencia de los artículos de investigación, ayudando en la identificación de áreas con actividades que sean superiores o inferiores.

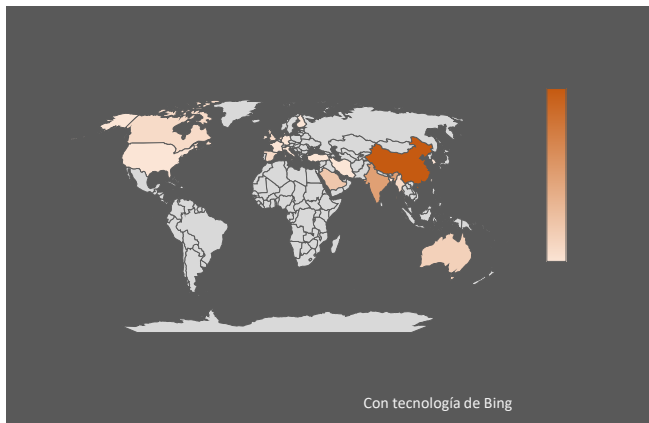


Fig. 3 Publicaciones según país
Fuente: Elaboración propia

Así mismo, en la figura 4 se muestra la cantidad de artículos por país, logrando identificar a China con un 30.77%, siendo el mayor aportante con 16 publicaciones, India con un 15.38%, siendo el segundo país con 8 publicaciones y en el tercer lugar con un 7.69% Arabia Saudita con 4 publicaciones, mientras que (Australia, Canadá, Reino Unido, Estados Unidos, España, Países Bajos) representan 3.85% cada uno, aportando 2 publicaciones, por otro lado, los países: (Myanmar, Finlandia, Taiwán, Italia, Turquía, Bangladesh, Irlanda, Francia, Alemania, Irán, Dinamarca, Corea del Sur) aportan con 1 publicación, representando independiente mente cada uno el 1.92%, siendo muy importante la identificación para facilitar la interpretación de los artículos.

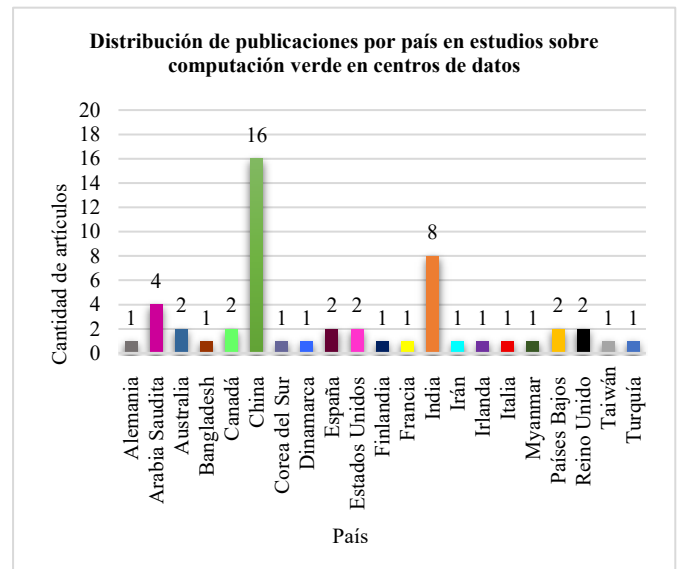


Fig. 4 Distribución de artículos por país
Fuente: Elaboración propia

En la figura 5, se visualiza un conjunto de palabras representados en un mapa bibliométrico, que han sido seleccionados para la Revisión Sistemática de Literatura (RSL). Esta visualización se ejecutó utilizando la herramienta VOSviewer, para establecer las interconexiones entre las palabras claves. Este análisis se basa en la división de cuatro clústeres temáticos principales, manteniendo un enfoque independiente dentro del ámbito de la computación sostenible y la eficiencia energética.

El grafo semántico revela claramente estos cuatro clústeres, que representan las líneas de investigación más significativas en computación sostenible. El clúster rojo se centra en Cloud Computing y las tecnologías verdes, destacando conceptos como la asignación de recursos en conjunto con los algoritmos de planificación (scheduling) y la programación de tareas, todos orientados a optimizar los recursos computacionales en entornos basados en la nube. El clúster verde se enfoca en la gestión de centros de datos y la eficiencia energética, incluyendo términos como los sistemas de enfriamiento, centros de datos y machine learning, lo que subraya el uso de la IA para reducir el consumo energético y optimizar procesos en infraestructuras digitales. El clúster azul se refiere a la sostenibilidad ambiental: huella de carbono, emisiones de carbono, fuentes de energías renovables, pero sobre todo a disminuir el impacto ecológico de las tecnologías digitales usando fuentes de energía limpia. Finalmente, el clúster amarillo profundiza en temas específicos como gestión térmica y gestión de energía, que tienen que ver con control de calor y consumo de energía en cualquier ambiente de cómputo.

En conjunto, este grafo va a permitir identificar las principales trayectorias del trabajo de investigación y visualizar las conexiones entre temas y palabras clave, guiando futuras investigaciones hacia una computación más sostenible, eficiente y ambientalmente responsable.

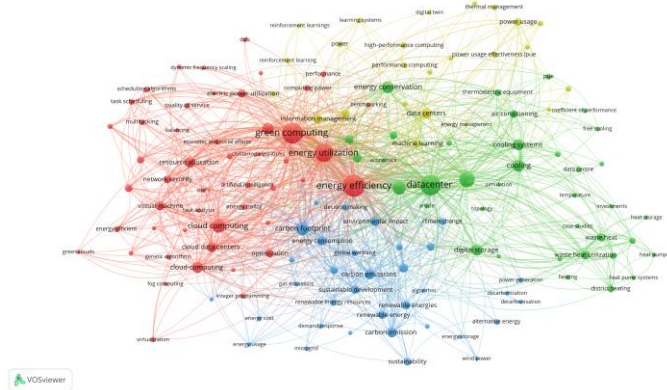


Fig. 5 Mapa de palabras claves
Fuente: Elaboración propia

En la figura 6 se pueden visualizar los términos más relevantes y el enfoque de los modelos más utilizados de los estudios examinados, donde se destaca: “Data Center” con (16.05%) y “Energy Efficiency” con un (15.72%) enfocando la mayor frecuencia de concurrencia, la cual evidencia que la eficiencia energética es el tema más abordado en la literatura reciente. Por consiguiente, destacan “Carbon Emission” (12.37%), “Cloud Computing (11,04%) y “PUE” (10.70%), lo que evidencia un enfoque integrado entre sostenibilidad ambiental y eficiencia operativa. Así mismo, la visualización de “Machine Learning” con un (8,03%) y “Energy Optimization” con (8,03%) la cual enfoca la tendencia hacia el uso de inteligencia artificial y técnicas de predicción para reducir consumos energéticos y mejoras en la gestión térmica. Por último, los estudios analizados como “Green Computing” con (4,01%), “Hyperscale Data Center” con (3,01%) y “CUE” con un (0,67%), estos datos reflejan una menor representación, lo que implica que el enfoque de la investigación está dirigido más bien a la aplicación práctica de estrategias concretas que a la conceptualización teórica.

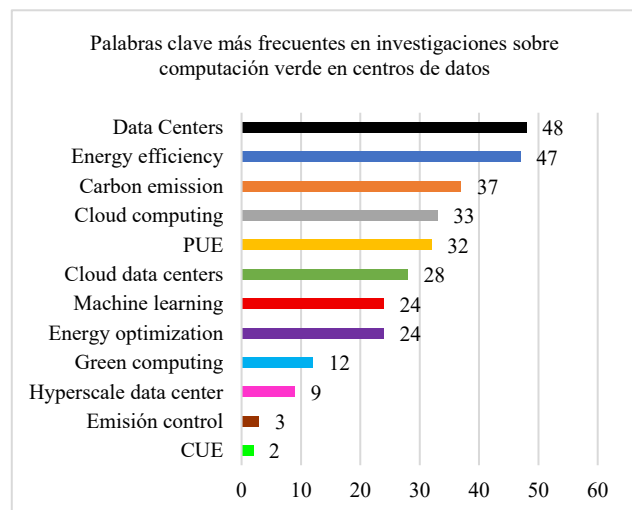


Fig. 6 Ocurrencias de palabras claves
Fuente: Elaboración propia

La siguiente tabla 5, nos muestra el aporte de cada artículo en la propuesta de investigación.

TABLA V
EFECTOS RESULTANTES DE LAS ESTRATEGIAS DE COMPUTACIÓN VERDE

Impacto	%	Art.	Aporte
Optimización Lógica y Gestión de Carga (Cloud/VM)	26.92%	[6], [7], [8], [9], [18], [31], [32], [35], [38], [40], [44], [45], [49], [50]	Desarrollo de Algoritmos Inteligentes
Conciencia Energética y Huella de Carbono	26.92%	[1], [2], [4], [5], [17], [19], [27], [33], [34], [36], [37], [46], [48], [52]	Modelos de Sostenibilidad Multimétrica
Enfriamiento Avanzado y Gestión Térmica (PUE)	23.08%	[10], [11], [12], [21], [22], [23], [28], [29], [30], [41], [42], [43]	Innovación en Infraestructura Física
Revisión, Visión y Políticas (Green Cloud Contexto)	15.39%	[3], [20], [24], [25], [26], [39], [47], [51]	Marco Conceptual y Estratégico
Recuperación de Calor Residual y Economía Circular	7.69%	[13], [14], [15], [16]	Valorización Energética del Subproducto Térmico

La revisión sistemática muestra cinco áreas de gran impacto en las estrategias de la computación verde, detallándose los hallazgos más relevantes, donde el impacto de la Optimización Lógica y Gestión de Carga (Cloud/VM) resalta con 26.92% mostrando un alto enfoque con 14 artículos ([6], [7], [8], [9], [18], [31], [32], [35], [38], [40], [44], [45], [49], [50]) que abordan el desarrollo de algoritmos inteligentes con una asignación de recursos en entornos virtualizados en la nube. Dentro de estos estudios se proponen soluciones que ayudan el rendimiento energético mediante el uso de técnicas de programación lógica, del mismo modo, el impacto sobre la Conciencia Energética y Huella de Carbono también muestra un 26.92% con 14 artículos ([1], [2], [4], [5], [17], [19], [27], [33], [34], [36], [37], [46], [48], [52]) reflejando un gran crecimiento sobre la sostenibilidad ambiental. Los artículos analizan grandes modelos de sostenibilidad multinivel, con métricas de huella de carbono, destacando el uso de simulaciones y el impacto ecológico de los sistemas computacionales. El impacto sobre el Enfriamiento Avanzado y Gestión Térmica (PUE) se encuentra en el tercer lugar con un 23.08%, mostrando un respaldo de 12 artículos ([10], [11], [12], [21], [22], [23], [28], [29], [30], [41], [42], [43]) cuyo enfoque es la innovación en infraestructura física de los centros de datos, incluyendo propuesta de sistemas de enfriamiento líquido y mejoras en el Power Usage Effectiveness (PUE), con la finalidad de reducir el consumo energético enfocado al mantenimiento térmico. En el cuarto lugar con un 15.39% está el impacto sobre la Revisión, Visión y Políticas (Green Cloud Contexto) con 8 artículos ([3], [20], [24], [25], [26], [39], [47], [51]) brindando un marco conceptual y estratégico, donde se abordan políticas públicas y normativas internacionales, destacando la necesidad de una gobernanza energética en la nube. Por último, el impacto sobre la Recuperación de Calor Residual y Economía Circular cuenta con un 7.69% con un respaldo de 4 artículos ([13], [14], [15], [16]) donde se exploran la valorización energética del subproceso térmico, donde se proponen reutilizar el calor

residual la cual es generado por los centros de datos para aplicaciones industriales, integrando principios de economía circular.

TABLA VI
HERRAMIENTAS APLICADAS

Herramientas	%	Autores
Conceptuales / RSL (No Aplica Herramienta Específica)	34.62%	[3], [4], [13], [17], [20], [24], [25], [30], [31], [33], [36], [39], [43], [47], [48], [49], [51], [52]
CloudSim y Derivados	23.08%	[6], [7], [8], [9], [32], [35], [37], [38], [40], [44], [45], [50]
Modelado de Sistemas Energéticos/Simulación de Edificios	21.15%	[1], [5], [14], [15], [16], [19], [21], [23], [26], [27], [28]
Simulación CFD/Térmica y Experimental	13.46%	[10], [11], [12], [22], [29], [41], [42]
Simulación Basada en Trazas (Trace-Based Simulation)	7.69%	[2], [18], [34], [46]

En la tabla 6 se puede apreciar la distribución de herramientas tecnológicas identificadas en los diferentes artículos revisados. Se ve que la categoría más representativa con un 34.62% corresponde a enfoques conceptuales y revisiones sistemáticas, esto siendo evidencia de la diversidad metodológica en la investigación sobre la computación verde en los Data Centers. En segundo lugar, con un 23.08%, se encuentra las herramientas de CloudSim y sus derivados son las herramientas más destacadas para evaluación de algoritmos, simulación de entornos cloud, migración de máquinas virtuales. Por otra parte, con un 21.15% el modelado de sistemas energéticos y la simulación de edificios evidencian lo fundamental que es la gestión térmica y eléctrica en la operación de centros de datos, a través de herramientas enfocadas a la eficiencia energética y la reducción de emisiones. Además, con un 13.46%, se muestra que la simulación CDF/térmica y experimental es prueba de aplicaciones de modelos físicos y experimentos para mejorar sistemas HVAC, flujos de aire y tecnologías de enfriamiento optimizado. Por último, representando con un 7.69%, se encuentran las herramientas de simulación basada en trazas, la cual se utiliza en investigaciones que buscan validar estrategias mediante datos reales de tráfico y cargas de trabajo. Aunque las simulaciones basadas en CloudSim dominan los estudios prácticos, se conoce una tendencia creciente hacia enfoques híbridos que mezclan modelos energéticos, análisis térmico y validación con datos reales.

TABLA VII
LIMITACIÓN DE LA REVISIÓN SISTEMÁTICA

Limitación	%	Artículos
Dependencia de simulación (CloudSim/benchmarks)	38.46%	[2], [5], [6], [7], [8], [9], [19], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [40], [44], [45], [49], [50]
Conceptual/Visión/Revisión (sin validación empírica directa)	28.85%	[3], [4], [13], [17], [20], [24], [25], [26], [30], [39], [46], [47], [48], [51], [52]
Alcance geográfico/climático restringido	17.31%	[1], [14], [15], [16], [23], [27], [29], [42], [43]

Escala reducida / prototipo (single rack/piloto/horizonte corto)	13.46%	[10], [11], [12], [21], [22], [28], [41]
Datos/trazas limitadas / no representativas	1.92%	[18]

La tabla 7 nos muestra las principales limitaciones que han sido identificadas en los estudios analizados, agrupadas según patrones comunes. Se puede visualizar que la dependencia de simulaciones, principalmente a través de herramientas como *CloudSim* o indicadores sintéticos, representa la mayor limitación con 38.46%, lo que muestra una fuerte inclinación hacia entornos simulados que, si bien facilitan experimentos controlados, también restringen la validez externa y la aplicabilidad de estos resultados en contextos reales. En segundo lugar, con 28.85% corresponde a investigaciones de tipo abstracto, conceptual o de revisión, sin una confirmación empírica directa, indicando que una parte significativa de la literatura se centra más en el desarrollo teórico que en la verificación práctica. La limitación geográfica o climática restringida representa un 17.31% de los trabajos, lo que sugiere que varios estudios se limitan a entornos específicos dificultando la generalización de sus resultados. Asimismo, el 13.46% de los artículos muestra una escala reducida o prototípica, con implementaciones en fases piloto o de corto plazo, lo que permite explorar la viabilidad técnica, pero esto no garantiza un desempeño sostenido o escalable. Por último, en menor medida, con el 1.92% estudios muestra datos o trazas limitados o no representativos, lo cual refleja deficiencias en la disponibilidad o calidad de la información utilizada. Finalmente, la presente revisión está basada únicamente en Scopus, lo que podría haber limitado la inclusión de estudios con mayor relevancia en otras fuentes. Además, hay un posible sesgo de selección por los criterios aplicados y su disponibilidad de acceso.

La mayoría de estudios se basa en simulaciones, evidenciando una necesidad de validaciones empíricas. La diversidad de diversas métricas y metodologías dificultan la comparativa, justificando un uso de síntesis narrativo en lugar de un metaanálisis cuantitativo.

IV. Discusión

Los resultados de esta RSL muestran que la descarbonización y la optimización energética en los centros de datos se basan en un conjunto de estrategias que operan en diferentes capas (software, infraestructura física y sistema energético) con niveles de madurez y validación variables. Sin embargo, la mayor frecuencia no implica una mayor efectividad, sino un mejor y mayor enfoque investigativo. En frecuencia, la gestión de cargas y recursos es la línea más explotada (30.77%), seguida de la gestión térmica y tecnologías de enfriamiento (19.23%), lo que sugiere una priorización de soluciones de software por su menor costo de implementación a cambios físicos. En un tercer lugar se encuentran el suministro energético y operación carbon-aware (15.38%) y las políticas, gobernanza y hojas de ruta (15.38%). Finalmente, la reutilización de calor residual (WHR) (7.69%) y la medición/modelización con métricas (PUE/CUE/CO₂) (7.69%) son las menos representadas, pero

esenciales para permitir la comparabilidad y escalabilidad de las soluciones (Tabla 3).

En la capa de infraestructura física, los resultados confirman que la eficiencia energética se ve fuertemente condicionada por el desempeño térmico. La contención de pasillos reduce la recirculación y mezcla de aire, limita la aparición de puntos calientes y contribuye a disminuir la carga de climatización, reflejándose en mejoras de PUE bajo configuraciones de pasillo frío confinado [10]. Más recientemente, se reportan enfoques de control dinámico que ajustan consignas térmicas en función de la carga real de TI (IT power-aware), con mejoras energéticas sin comprometer la confiabilidad operativa, lo que sugiere que el control avanzado se perfila como una “palanca” de eficiencia aplicable incluso en infraestructuras existentes [28]. En paralelo, la literatura de refrigeración líquida e inmersiva destaca su relevancia para densidades crecientes, al incrementar la capacidad de remoción de calor y habilitar, en algunos casos, condiciones más favorables para valorización térmica; sin embargo, su adopción depende de compatibilidad de hardware, complejidad operativa y consideraciones económicas [11], [12], [30]. No obstante, su adopción sigue siendo limitada en entornos reales debido a barreras económicas y operativas.

En la capa lógica y de orquestación, predomina el uso de algoritmos para consolidación, balanceo y asignación “consciente del estado térmico” y/o energético. Los marcos de balanceo eficiente buscan incrementar utilización de recursos y reducir consumo por sobreaprovisionamiento [31], mientras que la asignación térmicamente consciente reduce riesgo de hotspots y el costo energético asociado al control térmico [32]. En la dimensión de descarbonización, los enfoques carbon-aware proponen migración espacial y temporal de cargas a regiones o ventanas con menor intensidad de carbono, reportando reducciones significativas de emisiones en escenarios evaluados por los autores, aunque altamente dependientes del mix eléctrico, la conectividad y los supuestos de modelado [33]. Aunque prometedores, estos enfoques presentan mayor variabilidad según un contexto energético regional. Asimismo, la combinación de recursos de red con renovables y almacenamiento se plantea como mecanismo para mejorar flexibilidad operativa y disminuir impacto ambiental, particularmente en arquitecturas con heterogeneidad energética [34].

Un hallazgo transversal es que la recuperación de calor residual (WHR) se consolida como una estrategia con alto potencial de descarbonización sistémica, pero con barreras de integración. A diferencia de otras estrategias, el WHR ofrece buenos beneficios sistémicos más allá de los centros de datos. Revisiones y estudios aplicados describen que tecnologías como bombas de calor, absorción y ciclos orgánicos pueden convertir el calor residual en un activo energético, con ventanas de retorno económico reportadas en el orden de años en ciertos contextos y reducciones relevantes de CO₂ cuando existe demanda térmica utilizable [13]. A escala de campus, la integración con almacenamiento térmico (p. ej., ATES) puede mejorar indicadores operativos y reducir emisiones anuales, aunque su replicabilidad depende del clima, infraestructura térmica disponible y perfil de demanda [15]. A escala de sistema energético, se observa que la combinación de enfriamiento flexible + WHR puede disminuir costos y desplazar combustibles en calefacción,

especialmente cuando existen redes de calor de baja temperatura y alta penetración renovable, resaltando que la “eficiencia del centro de datos” no debe evaluarse de forma aislada sino como parte de un sistema energético más amplio [16].

Sin embargo, el debate debe leerse en el contexto de las limitaciones metodológicas encontradas en la misma RSL (Tabla 7). La evidencia muestra una alta dependencia de simulación (38.46%) y una gran cantidad de estudios conceptuales o de revisión sin validación empírica directa, lo que limita la validez externa de algunos resultados y los hace susceptibles a supuestos (cargas, precios, factores de emisión, modelos de refrigeración). Además, el sesgo geográfico/climático (17.31%) y la abundancia de prototipos o pilotos (13.46%) indican que la generalización a climas cálidos, infraestructuras heredadas o hyperscale reales sigue siendo una pregunta abierta. Por lo tanto, aunque las reducciones informadas (especialmente en estrategias carbon-aware) son prometedoras, su traducción a implementaciones industriales necesita estudios longitudinales, datos operativos representativos y validaciones a escala. En última instancia, la revisión destaca que avanzar hacia centros de datos de bajas emisiones exige convergencia en métricas y trazabilidad; la coexistencia de enfoques centrados en PUE versus aquellos ajustados por carbono (CUE/CO₂) dificulta la comparación y puede llevar a decisiones subóptimas si se optimiza la eficiencia energética sin tener en cuenta el mix eléctrico o el desplazamiento de emisiones [17], [20], [52]. En estos sentidos, las diversas estrategias más efectivas serán las que integren múltiples capas de optimización. Por eso, una consecuencia práctica es priorizar arquitecturas y operaciones que incorporen (i) optimización de cargas, (ii) control térmico avanzado, (iii) renovable/almacenamiento y (iv) WHR cuando haya demanda térmica, bajo esquemas de medición consistentes y reportables, para movernos de mejoras localizadas (PUE) a reducciones verificables de huella de carbono en todo el ciclo de vida. Por ello, futuras investigaciones deben enfocarse empíricamente en validaciones a gran escala y entornos reales.

V. Conclusión

Los hallazgos de esta revisión sistemática de la literatura muestran que la transformación hacia centros de datos sostenibles implica un enfoque holístico que integre eficiencia operativa, innovación tecnológica y marcos sólidos de gobernanza ambiental, y que las estrategias analizadas gestión térmica avanzada, virtualización y orquestación de cargas, integración de energías renovables, recuperación de calor residual tienen un potencial significativo para reducir el consumo energético y la huella de carbono, con mejoras consistentes en métricas como PUE y CUE sin afectar la confiabilidad ni la continuidad del servicio.

En concreto, la optimización térmica por confinamiento de pasillos y control dinámico según carga TI se erige como una de las soluciones más maduras y rentables, disminuyendo la demanda de refrigeración y creando las condiciones para la posterior recuperación y valorización del calor residual, mientras que los algoritmos carbon-aware y los modelos de orquestación geodistribuida aprovechan la variabilidad

temporal y espacial del mix eléctrico, logrando reducciones de emisiones superiores al 70% en escenarios simulados, especialmente cuando se combinan con renovables y almacenamiento energético.

Sin embargo, la revisión también encuentra importantes lagunas que restringen la generalización de estos hallazgos, como la falta de métricas estandarizadas de impacto ambiental, la prevalencia de estudios de simulación sobre validaciones empíricas a gran escala, la escasez de evidencia en climas cálidos y países en vías de desarrollo, y la limitada implementación de políticas regulatorias y mecanismos de trazabilidad de carbono en las operaciones de TI. Estas limitaciones destacan la necesidad de enfoques más uniformes y comparables para medir el impacto real de las estrategias planteadas en diferentes contextos operativos.

En este camino, es preciso avanzar hacia arquitecturas híbridas que combinen infraestructura energéticamente eficiente, control térmico y operativo basado en datos, modelos predictivos sensibles al carbono y marcos regulatorios transparentes con métricas como PUE, CUE y WUE. La implementación conjunta de estas medidas transformará el rendimiento energético de los centros de datos y contribuirá a descarbonizar el ecosistema digital, poniéndolo en línea con los objetivos globales de sostenibilidad y transición energética.

REFERENCIAS

- [1] M. A. B. Siddik, A. Shehabi, y L. Marston, "The environmental footprint of data centers in the United States," *Environmental Research Letters*, vol. 16, art. no. 064017, mayo 2021. doi: 10.1088/1748-9326/abfba1.
- [2] Y. Liu, X. Wei, J. Xiao, Z. Liu, Y. Xu, and Y. Tian, "Energy consumption and emission mitigation prediction based on data center traffic and PUE for global data centers," *Global Energy Interconnection*, vol. 3, no. 3, pp. 272–282, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.gloi.2020.07.008.
- [3] R. Buyya, S. Ilager, and P. Arroba, "Energy-efficiency and sustainability in new generation cloud computing: A vision and directions for integrated management of data centre resources and workloads," *Software: Practice and Experience*, vol. 54, no. 1, pp. 24–38, Jan. 2024, doi: 10.1002/spe.3248.
- [4] S. Mondal, F. B. Faruk, D. Rajbongshi, M. M. K. Efaz, and M. M. Islam, "GEECO: Green Data Centers for Energy Optimization and Carbon Footprint Reduction," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 21, art. 15249, Nov. 2023, doi: 10.3390/su152115249.
- [5] W. Chang, C. Liu, G. Ren, and J. Wan, "Energy Management for Distributed Carbon-Neutral Data Centers," *Energies*, vol. 18, no. 11, p. 2861, May 2025. doi: 10.3390/en18112861.
- [6] M. Sharma and R. Garg, "HIGA: Harmony-inspired genetic algorithm for energy-efficient task scheduling with rack awareness in cloud data centers," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 23, no. 1, pp. 211–224, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.jestch.2019.03.009.
- [7] T. Thein, M. M. Mio, S. Parvin, and A. Gawanmeh, "Reinforcement learning-based methodology for energy-efficient resource allocation in cloud data centers," *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 32, no. 10, pp. 1127–1139, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.jksuci.2018.11.005.
- [8] B. Gomathi, B. Saravana Balaji, V. Krishna Kumar, M. Abouhawwash, S. Aljahdali, M. Masud, and N. Kuchuk, "Multi-Objective Optimization of Energy Aware Virtual Machine Placement in Cloud Data Center," *Intelligent Automation & Soft Computing*, vol. 33, no. 3, pp. 1771–1785, 2022, doi: 10.32604/iasc.2022.024052.
- [9] N. Gupta, K. Gupta, A. M. Qahtani, D. Gupta, F. S. Alharithi, A. Singh, and N. Goyal, "Energy-Aware Live VM Migration Using Ballooning in Cloud Data Center," *Electronics (Switzerland)*, vol. 11, no. 23, art. no. 3932, Dec. 2022, doi: 10.3390/electronics11233932.
- [10] Y.-T. Lee, C.-Y. Wen, Y.-C. Shih, Z. Li, and A.-S. Yang, "Numerical and experimental investigations on thermal management for data center with cold aisle containment configuration," *Applied Energy*, vol. 307, Art. no. 118213, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.118213.
- [11] M. Hnayno, A. A. Chehade, H. Klabi, H. Bauduin, G. Polidori, and C. Maalouf, "Performance analysis of new liquid cooling topology and its impact on data centres," *Applied Thermal Engineering*, vol. 213, art. no. 118733, 2022, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118733.
- [12] C. Liu and H. Yu, "Evaluation and optimization of a two-phase liquid-immersion cooling system for data centers," *Energies*, vol. 14, no. 5, art. no. 1395, 2021, doi: 10.3390/en14051395.
- [13] X. Yuan, Y. Liang, X. Hu, Y. Xu, Y. Chen, and R. Kosonen, "Waste heat recovery in data centers: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 188, Art. no. 113777, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113777.
- [14] C. Montagud-Montalvá, E. Navarro-Peris, T. Gómez-Navarro, X. Masip-Sanchis, and C. Prades-Gil, "Recovery of waste heat from data centres for decarbonisation of university campuses in a Mediterranean climate," *Energy Conversion and Management*, vol. 290, art. no. 117212, 2023, doi: 10.1016/j.enconman.2023.117212.
- [15] V. Dvorak, V. Zavrel, J. I. Torrens Galdiz, and J. L. M. Hensen, "Simulation-based assessment of data center waste heat utilization using aquifer thermal energy storage of a university campus," *Building Simulation*, vol. 13, no. 4, pp. 823–836, 2020, doi: 10.1007/s12273-020-0629-y.
- [16] J. Jerez Monsalves, C. Bergaentzle, and D. Keles, "Impacts of flexible-cooling and waste-heat recovery from data centres on energy systems: A Danish case study," *Energy*, vol. 281, art. no. 128112, 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.128112.
- [17] F. Wang et al., "Do 'green' data centres really have zero CO₂ emissions?," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 53, Art. no. 102769, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102769.
- [18] J. Zheng, A. A. Chien, and S. Suh, "Mitigating Curtailment and Carbon Emissions through Load Migration between Data Centers," *Joule*, vol. 4, no. 10, pp. 2208–2222, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.joule.2020.08.001.
- [19] X. Hao, P. Liu, and Y. Deng, "Joint optimization of operational cost and carbon emission in multiple data center micro-grids," *Frontiers in Energy Research*, vol. 12, art. 1344837, 2024, doi: 10.3389/fenrg.2024.1344837.
- [20] A. Safari, H. Sorouri, A. Rahimi, and A. Oshnoei, "A Systematic Review of Energy Efficiency Metrics for Optimizing Cloud Data Center Operations and Management," *Electronics (Switzerland)*, vol. 14, no. 11, art. 2214, Jun. 2025, doi: 10.3390/electronics14112214.
- [21] R. Kumar, S. K. Khatri, and M. J. Diván, "Power Usage Efficiency (PUE) Optimization with Counterpointing Machine Learning Techniques for Data Center Temperatures," *Int. J. Math. Eng. Manag. Sci.*, vol. 6, no. 6, pp. 1594–1611, 2021, doi: 10.33889/IJMEMS.2021.6.6.095.
- [22] R. Gupta et al., "Workload management for air-cooled data centers: An energy and exergy based approach," *Energy*, vol. 209, Art. no. 118485, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118485.
- [23] B. Coyne, E. Denny, and D. Z. Fitiwi, "The benefits of low-carbon energy efficiency technology adoption for data centres," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 20, art. no. 100447, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.ecmx.2023.100447.

- [24] G. Li et al., "China's green data center development: Policies and carbon reduction technology path," *Environmental Research*, vol. 231, Art. no. 116248, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.envres.2023.116248.
- [25] J. Luo, H. Li, and J. Liu, "How Green Data Center Establishment Drives Carbon Emission Reduction: Double-Edged Sword or Equilibrium Effect?," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 17, no. 14, art. 6598, Jul. 2025, doi: 10.3390/su17146598.
- [26] G. Yu et al., "From energy to ecology: decarbonization pathways for sustainable high-performance computing through global carbon-energy nexus analysis," *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics*, vol. 11, art. 1595365, 2025, doi: 10.3389/fams.2025.1595365.
- [27] B. Du et al., "Estimating the carbon emission reduction potential of using carbon-oriented demand response for data centers: A case study in China," *iEnergy*, vol. 4, no. 1, pp. 54–64, 2025, doi: 10.23919/IEN.2025.0007.
- [28] J. D. Van Zetten, M. E. Cholette, and K. Bamdad, "Data centre building energy optimization with differential temperature control utilizing I.T. power measurement," *Journal of Building Engineering*, vol. 100, Art. no. 111722, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.jobe.2024.111722.
- [29] F. Micali et al., "Reducing CO₂ emissions by improving HVAC system efficiency of data centers through nanofluids: a case study," *Applied Thermal Engineering*, vol. 275, art. 126889, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2025.126889.
- [30] K. Haghsheenas et al., "Enough hot air: the role of immersion cooling," *Energy Informatics*, vol. 6, art. no. 14, 2023, doi: 10.1186/s42162-023-00269-0.
- [31] J. Kumar, A. K. Singh, and A. Mohan, "Resource-efficient load-balancing framework for cloud data center networks," *ETRI Journal*, vol. 43, no. 1, pp. 53–63, 2021, doi: 10.4218/etrij.2019-0294.
- [32] A. Akbari, A. Khonsari, and S. M. Ghoreyshi, "Thermal-Aware Virtual Machine Allocation for Heterogeneous Cloud Data Centers," *Energies*, vol. 13, no. 11, art. no. 2880, 2020, doi: 10.3390/en13112880.
- [33] M. Aldossary and H. A. Alharbi, "Towards a green approach for minimizing carbon emissions in fog-cloud architecture," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 131720–131732, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3114514.
- [34] X. Hu, P. Li, and Y. Sun, "Minimizing energy cost for green data center by exploring heterogeneous energy resource," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 9, no. 1, pp. 148–159, Jan. 2021, Art. no. 9319812, doi: 10.35833/MPCE.2019.000052.
- [35] A. Alarifi et al., "Energy-efficient hybrid framework for green cloud computing," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 115356–115369, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3002184.
- [36] D. Zhao and J. Zhou, "An energy and carbon-aware algorithm for renewable energy usage maximization in distributed cloud data centers," *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 165, pp. 156–166, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.jpdc.2022.04.001.
- [37] T. Renugadevi et al., "Optimized energy cost and carbon emission-aware virtual machine allocation in sustainable data centers," *Sustainability*, vol. 12, no. 16, Art. no. 6383, Aug. 2020, doi: 10.3390/su12166383.
- [38] H. A. Alharbi and M. Aldossary, "Energy-Efficient Edge-Fog-Cloud Architecture for IoT-Based Smart Agriculture Environment," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 110480–110492, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3101397.
- [39] D. Al Kez et al., "Exploring the sustainability challenges facing digitalization and internet data centers," *Journal of Cleaner Production*, vol. 371, art. 133633, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133633.
- [40] Y. Zhang, "A method to manage the energy consumption of cloud centers for predictability in neuro-fuzzy networks," *Journal of Engineering and Applied Science*, vol. 72, no. 1, art. 85, Dec. 2025, doi: 10.1186/s44147-025-00646-4.
- [41] H. Yuan et al., "An Intelligent Thermal Management Strategy for a Data Center Prototype Based on Digital Twin Technology," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 15, no. 14, art. 7675, Jul. 2025, doi: 10.3390/app15147675.
- [42] X. Wu, S. Shao, and N. Akkurt, "Investigation on application of plate-tube evaporative condensating technology for data centres in the northwest of China," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 4713–4720, 2023, doi: 10.1016/j.egy.2023.03.108.
- [43] S. Özataş, "Harnessing High-Altitude Advantages: Sustainable Data Center Site Selection in Ski Resort Regions for Optimized Energy Efficiency," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 17, no. 8, art. 3494, Apr. 2025, doi: 10.3390/su17083494.
- [44] U. C. De et al., "Green computing for improving the sustainability of data centers: Optimized VM allocation with decentralized peer-to-peer nodes," *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*, vol. 8, no. 3, pp. 4752–4763, 2025, doi: 10.53894/ijirss.v8i3.7607.
- [45] Z. Miao et al., "Energy and carbon-aware distributed machine learning tasks scheduling scheme for the multi-renewable energy-based edge-cloud continuum," *Science and Technology for Energy Transition (STET)*, vol. 79, art. no. 82, 2024, doi: 10.2516/stet/2024076.
- [46] A. Fernández-Montes, D. Fernández-Cerero, and A. Jakobik, "Limiting global warming by improving data-centre software," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 44048–44062, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2978306.
- [47] M. Ganesan et al., "Green Cloud Software Engineering for Big Data Processing," *Sustainability*, vol. 12, no. 21, art. no. 9255, 2020, doi: 10.3390/su12219255.
- [48] G. Fridgen et al., "Not All Doom and Gloom: How Energy-Intensive and Temporally Flexible Data Center Applications May Actually Promote Renewable Energy Sources," *Business & Information Systems Engineering*, vol. 63, pp. 243–256, 2021, doi: 10.1007/s12599-021-00686-z.
- [49] R. Karthikeyan et al., "Preserving Resource Handiness and Exigency-Based Migration Algorithm (PRH-EM) for Energy Efficient Federated Cloud Management Systems," *Mobile Information Systems*, vol. 2023, Article ID 7754765, 2023, doi: 10.1155/2023/7754765.
- [50] M. Ibrahim, M. Imran, F. Jamil, Y.-J. Lee, and D.-H. Kim, "EAMA: Efficient adaptive migration algorithm for cloud data centers (CDCs)," *Symmetry*, vol. 13, no. 4, art. no. 690, 2021, doi: 10.3390/sym13040690.
- [51] S. S. Panwar, M. M. S. Rauthan, and V. Barthwal, "A systematic review on effective energy utilization management strategies in cloud data centers," *Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications*, vol. 11, art. no. 95, 2022, doi: 10.1186/s13677-022-00368-5.
- [52] A. Shaikh, M. Uddin, M. A. Elmagzoub, and A. Alghamdi, "PEMC: Power Efficiency Measurement Calculator to Compute Power Efficiency and CO₂ Emissions in Cloud Data Centers," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 195216–195228, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3033791.