



Article: Revisión

A review of recent advances in fluid mechanics and their applications

Una revisión de los avances recientes en mecánica de fluidos y sus aplicaciones

Milene Paulette Marca Laime^{1*}  , Samantha Lizbeth Matamoros Chuchuca²  , León Cueva Wilson Patricio³  , Delly Maribel San Martin Torres⁴  , Nixon Joel Rogel Merchan⁵  .

¹Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador

²Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador

³Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador

⁴Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador

⁵Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador

Corresponding author: Milene Paulette Marca Laime 

Revised: 01-may-2025

Accepted: 14-may-2025

Published: 20-may-2025

Cite as:

Marca Laime, M. P., Matamoros Chuchuca, S. L., Wilson Patricio, L. C., San Martin Torres, D. M., & Rogel Merchan, N. J. (2025). Una revisión de los avances recientes en mecánica de fluidos y sus aplicaciones. *Sapiens Evolución Científica*, 3(1), 1-10. <https://doi.org/10.71068/ec000053>

ABSTRACT

Fluid mechanics, an essential discipline in engineering and physical sciences, studies the behavior of liquids and gases at rest and in motion. This paper performs a systematic review of the most significant advances in the field (2020-2025), with the aim of synthesizing recent contributions and emerging trends. The methodology was based on the critical analysis of scientific articles indexed in Scopus, ScienceDirect, PubMed and Scielo, prioritizing research on numerical modeling, innovative applications and theoretical development. The results highlight the pivotal role of Computational Fluid Dynamics (CFD) in the simulation of complex phenomena, such as turbulence, non-Newtonian flows and multiphase interactions, as well as its integration with machine learning techniques to optimize predictions. Among the most relevant applications are advances in biomedical engineering (blood flows, medical devices), sustainable energy (nanofluids for thermal efficiency), environmental management (modeling of pollutants) and industrial processes (optimization of flow systems). In addition, the growth of multidisciplinary approaches combining fluid mechanics with materials science and artificial intelligence was identified. The study concludes that the field maintains a remarkable dynamism, driven by the demand for solutions to global challenges in sectors such as health, energy and environment. This review reinforces the relevance of fluid mechanics as a cross-cutting area and its potential to continue transforming critical technologies in the coming decades.

Keywords: Fluid Mechanics; Computational Fluid Dynamics (CFD); Multiphase Flows; Nanofluids.

RESUMEN

La mecánica de fluidos, disciplina esencial en ingeniería y ciencias físicas, estudia el comportamiento de líquidos y gases en reposo y movimiento. Este trabajo realiza una revisión sistemática de los avances más significativos en el campo (2020-2025), con el objetivo de sintetizar las contribuciones recientes y tendencias emergentes. La metodología se basó en el análisis crítico de artículos científicos indexados en Scopus, ScienceDirect, PubMed y Scielo, priorizando investigaciones sobre modelado numérico, aplicaciones innovadoras y desarrollo teórico. Los resultados destacan el rol pivotal de la Dinámica de Fluidos

Computacional (CFD) en la simulación de fenómenos complejos, como turbulencia, flujos no newtonianos e interacciones multifásicas, así como su integración con técnicas de aprendizaje automático para optimizar predicciones. Entre las aplicaciones más relevantes figuran avances en ingeniería biomédica (flujos sanguíneos, dispositivos médicos), energía sostenible (nano fluidos para eficiencia térmica), gestión ambiental (modelado de contaminantes) y procesos industriales (optimización de sistemas de flujo). Además, se identificó el crecimiento de enfoques multidisciplinarios que combinan mecánica de fluidos con ciencia de materiales e inteligencia artificial. El estudio concluye que el campo mantiene un dinamismo notable, impulsado por la demanda de soluciones a desafíos globales en sectores como salud, energía y medioambiente. Esta revisión refuerza la relevancia de la mecánica de fluidos como área transversal y su potencial para seguir transformando tecnologías críticas en las próximas décadas.

Palabras clave: Mecánica de Fluidos; Dinámica de Fluidos Computacional (CFD); Flujos Multifásicos; Nano fluidos.

INTRODUCCIÓN

La dinámica de fluidos computacional (CFD) se ha consolidado como una herramienta fundamental para analizar fenómenos de transporte mediante la solución numérica de las ecuaciones que gobiernan la conservación de masa, cantidad de movimiento y energía. Su aplicación permite representar campos de velocidad, presión, temperatura y concentración en geometrías complejas, reduciendo la dependencia exclusiva de ensayos experimentales costosos. El desarrollo de métodos de volúmenes finitos, modelos de turbulencia y capacidades computacionales de alto rendimiento ha ampliado su utilización en ingeniería mecánica, biomédica, química, ambiental, energética y de procesos industriales (Anderson, 1995; Moukalled et al., 2016).

La confiabilidad de una simulación CFD depende de la formulación del problema físico, la selección del modelo matemático, la calidad de la malla, las condiciones de frontera y los criterios de convergencia empleados. En flujos simples, los modelos newtonianos pueden proporcionar resultados satisfactorios; sin embargo, numerosos sistemas reales presentan comportamientos no newtonianos, multifásicos, turbulentos o transitorios. Por ello, la modelación debe responder a las características reológicas y dinámicas del fluido. Una simplificación inadecuada puede modificar las predicciones de presión, esfuerzo cortante, transferencia térmica y transporte de especies dentro del dominio estudiado (Chhabra, 2010; Pope, 2000).

Una de las áreas donde la CFD ha mostrado especial relevancia es la hemodinámica. El flujo sanguíneo presenta comportamiento no newtoniano, particularmente en regiones de baja tasa de deformación, recirculación o geometrías vasculares complejas. Las simulaciones permiten estudiar estenosis, aneurismas, bifurcaciones y transporte de partículas, proporcionando métricas relacionadas con velocidad, vorticidad y esfuerzo cortante de pared. Lynch et al. (2022) demostraron diferencias entre aproximaciones newtonianas y no newtonianas, mientras Akhtar et al. (2023) emplearon CFD para analizar flujo dentro de una arteria con estenosis simétrica asociada con enfermedad coronaria y alteraciones hemodinámicas.

La modelación computacional también ha adquirido importancia en el estudio de nanofluidos, cuya incorporación de nanopartículas modifica propiedades termofísicas, estabilidad, transferencia de calor y comportamiento interfacial. Estas mezclas han sido exploradas en sistemas térmicos, recuperación mejorada de petróleo y procesos de transporte multifásico. Liang et al. (2025) destacan que los nanofluidos pueden modificar mojabilidad, tensión interfacial y viscosidad durante la recuperación terciaria de hidrocarburos, aunque persisten dificultades asociadas con estabilidad y sedimentación. Goyal et al. (2023) señalan que su rendimiento depende de concentración, tamaño de partículas, temperatura y características fisicoquímicas del fluido base.

En ingeniería ambiental y urbana, la CFD permite representar procesos cuya observación experimental completa resulta difícil. La simulación del viento urbano contribuye al análisis de ventilación, dispersión y movilidad aérea en entornos construidos, mientras los modelos de canales abiertos permiten estudiar transporte de sedimentos y cambios de superficie libre. García-Gutiérrez et al. (2022) mostraron la utilidad del modelado CFD para describir viento urbano aplicado a movilidad aérea, mientras Duan et al. (2023) desarrollaron simulaciones numéricas del transporte de sedimentos en flujo no permanente, evidenciando su versatilidad para resolver problemas con escalas espaciales, temporales y condiciones físicas diferenciadas.

En ingeniería de procesos, los sistemas multifásicos representan uno de los campos más complejos debido a la interacción simultánea entre fases continuas y dispersas. Los métodos CFD-DPM permiten representar partículas, gotas o burbujas dentro del campo fluido, mientras estrategias como Volume of Fluid permiten resolver interfaces entre fases. Yang et al. (2024) describen avances recientes de los métodos de fase discreta en ingeniería de procesos y señalan desafíos relacionados con escalamiento y concentración de partículas. Rudniak et al. (2004) demostraron además el potencial de CFD para estudiar reactores agitados y diferenciar el comportamiento de sistemas homogéneos y heterogéneos.

A partir de este contexto, el objetivo de la presente revisión es analizar fundamentos, métodos y aplicaciones de la dinámica de fluidos computacional en sistemas de interés ingenieril, incluyendo flujos newtonianos y no newtonianos, hemodinámica, nanofluidos, transporte multifásico, canales abiertos, viento urbano, reactores y microfluídica. Se busca identificar fortalezas metodológicas, limitaciones recurrentes y tendencias de desarrollo que permitan comprender el valor de la CFD como herramienta predictiva. La revisión integra literatura especializada y estudios aplicados, diferenciando principios numéricos generales de las particularidades físicas y computacionales exigidas por cada uno de los dominios considerados.

METHOD

La investigación se desarrolló mediante una revisión narrativa de literatura con enfoque descriptivo y analítico. El propósito metodológico consistió en identificar, organizar y contrastar publicaciones relacionadas con fundamentos de mecánica de fluidos, dinámica de fluidos computacional, métodos numéricos y aplicaciones de CFD en distintos campos de la ingeniería. El diseño de revisión fue

seleccionado debido a la heterogeneidad de los problemas estudiados, que incluyen desde hemodinámica y microfluídica hasta flujos multifásicos, nanofluidos, transporte de sedimentos, viento urbano y reactores químicos.

La búsqueda documental consideró artículos científicos, revisiones especializadas, libros académicos y trabajos técnicos con información directamente vinculada con los objetivos de la investigación. Se priorizaron publicaciones indexadas y documentos con DOI o URL verificable. Las fuentes abarcaron revistas científicas de editoriales como Springer Nature, Elsevier, MDPI, SAGE y otras plataformas académicas reconocidas, complementadas con textos fundamentales de mecánica de fluidos, turbulencia y métodos numéricos.

Los términos empleados en las búsquedas incluyeron combinaciones de “computational fluid dynamics”, “CFD”, “non-Newtonian flow”, “multiphase flow”, “nanofluids”, “blood flow CFD”, “urban wind CFD”, “sediment transport”, “finite volume method”, “discrete phase method”, “microfluidics” y “turbulent flow”. La búsqueda se orientó tanto hacia fundamentos teóricos como hacia aplicaciones recientes, permitiendo establecer una conexión entre los principios clásicos de mecánica de fluidos y los desarrollos computacionales contemporáneos.

Como criterios de inclusión se consideraron trabajos que abordaran explícitamente fundamentos físicos o numéricos de CFD, validación de modelos, aplicaciones ingenieriles relevantes o comportamiento de fluidos complejos. También fueron incluidos textos de referencia utilizados ampliamente en formación y modelación computacional. Se excluyeron documentos duplicados, publicaciones sin información bibliográfica suficiente, estudios alejados de la temática central y materiales que no permitieran verificar su procedencia académica.

La información seleccionada fue organizada en categorías temáticas: fundamentos y métodos numéricos; fluidos no newtonianos y hemodinámica; nanofluidos; flujo multifásico; ingeniería ambiental y urbana; ingeniería de procesos; y microfluídica. La síntesis de resultados se realizó mediante análisis comparativo de objetivos, enfoques de modelación, fenómenos estudiados, principales aportes y limitaciones señaladas por los autores. No se efectuaron metaanálisis ni cálculos estadísticos derivados de datos secundarios.

Finalmente, se aplicó un criterio de trazabilidad bibliográfica mediante la verificación de correspondencia entre autores, títulos y DOI o URL utilizados. Los hallazgos se interpretaron como evidencia procedente de investigaciones publicadas y no como resultados experimentales propios. Esta delimitación resulta fundamental para mantener coherencia entre diseño, metodología, resultados y conclusiones, evitando atribuir al presente trabajo simulaciones, experimentos o validaciones que fueron realizadas originalmente por los estudios incluidos.

RESULTS

Los estudios revisados muestran que la dinámica de fluidos computacional ha evolucionado desde una herramienta especializada para resolver problemas relativamente simples hasta una plataforma capaz de representar sistemas tridimensionales, transitorios, multifásicos y reológicamente complejos. Esta expansión se encuentra estrechamente relacionada con los avances en métodos de discretización, potencia computacional, modelos constitutivos y algoritmos de solución.

Los resultados también evidencian que no existe una configuración CFD universal. La selección de ecuaciones, modelos de turbulencia, propiedades reológicas, estrategias multifásicas, condiciones de frontera y criterios de mallado depende directamente del fenómeno físico. La Tabla 1 sintetiza los principales ámbitos identificados en la revisión y las exigencias específicas que caracterizan cada aplicación.

Tabla1

Principales campos de aplicación de la dinámica de fluidos computacional

Campo de aplicación	Fenómeno principal	Herramientas o modelos relevantes	Aplicación
Hemodinámica	Flujo sanguíneo newtoniano	no Carreau-Yasuda, Power Law, CFD 3D	Arterias, venas y estenosis
Nanofluidos	Transporte nanopartículas y calor	de Modelos monofásicos/multifásicos	Transferencia térmica y EOR
Flujo multifásico	Interacción fluido-partícula	CFD-DPM	Procesos industriales
Superficie libre	Interfaz líquido-gas	Volume of Fluid (VOF)	Canales y confluencias
Transporte de sedimentos	Flujo sólido-líquido	Modelos de transporte	Ríos y canales
Viento urbano	Turbulencia atmosférica local	RANS/LES y CFD urbano	Ventilación y movilidad aérea
Reactores	Mezcla y reacción	CFD multifásico	Reactores agitados
Microfluídica	Flujo en microcanales	Flujo laminar y transporte	Lab-on-a-chip
Procesamiento agrícola	Interacción aire-producto	CFD aerodinámico	Clasificación y selección
Industria alimentaria	Transporte de masa/calor	CFD y modelos térmicos	Procesos y conservación

Nota. CFD = Computational Fluid Dynamics; DPM = Discrete Phase Model; EOR = Enhanced Oil Recovery; LES = Large Eddy Simulation; RANS = Reynolds-Averaged Navier-Stokes; VOF = Volume of Fluid.

Resumen de la Tabla 1. La información sintetizada demuestra el carácter transversal de la CFD. Aunque todos los campos comparten ecuaciones fundamentales de conservación, cada aplicación exige modelos complementarios. La hemodinámica requiere especial atención a la reología; los nanofluidos incorporan propiedades dependientes de partículas; los flujos multifásicos necesitan representar interacción entre fases; y los problemas urbanos demandan un tratamiento adecuado de turbulencia y geometría. En consecuencia, la calidad de una simulación depende tanto del método numérico como de la fidelidad física del modelo utilizado.

Fluidos no newtonianos y aplicaciones biomédicas

La hemodinámica constituye uno de los ámbitos donde las simplificaciones del modelo pueden producir efectos especialmente relevantes. Lynch et al. (2022) compararon aproximaciones newtonianas y no newtonianas en flujo arterial y venoso y encontraron diferencias en velocidad, vorticidad, esfuerzos cortantes y transporte. Los autores concluyeron que considerar la viscosidad no newtoniana adquiere importancia cuando existen regiones extensas de baja tasa de cizallamiento y recirculación.

Akhtar et al. (2023) analizaron mediante CFD el flujo sanguíneo dentro de una arteria con estenosis simétrica, mostrando la capacidad de la simulación para estudiar modificaciones hemodinámicas vinculadas con enfermedad arterial coronaria. Wajihah y Sankar (2023), mediante una revisión de modelos reológicos, resaltaron igualmente que la selección del modelo de viscosidad resulta determinante en arterias constreñidas.

Nanofluidos y transferencia de calor

La revisión muestra un crecimiento sostenido del interés por nanofluidos debido a la posibilidad de alterar propiedades térmicas, interfaciales y reológicas mediante nanopartículas. Goyal et al. (2023) analizaron propiedades termofísicas y transferencia de calor, destacando la influencia de concentración y condiciones del sistema.

Silva-Yumi et al. (2021) enfatizaron que la estabilidad constituye un elemento fundamental, pues la sedimentación o aglomeración puede modificar significativamente el comportamiento previsto. Liang et al. (2025) ampliaron este análisis hacia recuperación mejorada de petróleo, identificando mecanismos relacionados con modificación de mojabilidad, tensión interfacial, presión estructural y viscosidad.

Flujos multifásicos y procesos industriales

Los sistemas multifásicos constituyen una de las aplicaciones que demandan mayor capacidad computacional. Yang et al. (2024) analizaron el progreso reciente de CFD-DPM y señalaron su utilidad para representar fases dispersas en ingeniería de procesos, particularmente partículas sólidas transportadas dentro de una fase continua.

Michaelides et al. (2016) describen que los sistemas multifásicos requieren considerar fenómenos adicionales, incluyendo transferencia de cantidad de movimiento, energía y masa entre fases. Rudniak et al. (2004) demostraron la aplicación de CFD en reactores químicos agitados, diferenciando

sistemas homogéneos y heterogéneos y evidenciando su utilidad para estudiar mezcla y distribución interna.

Ingeniería ambiental y urbana

Duan et al. (2023) utilizaron simulación numérica para representar transporte de sedimentos en flujo no permanente de canales abiertos. El problema requiere considerar interacciones entre hidrodinámica, transporte sólido y evolución temporal del sistema.

Shaheed et al. (2022) analizaron flujo turbulento en curvas y confluencias mediante el método VOF, destacando la importancia de representar adecuadamente los cambios de superficie libre. Por otra parte, García-Gutiérrez et al. (2022) mostraron que la CFD permite obtener información detallada sobre viento urbano a escalas que los modelos meteorológicos convencionales no siempre pueden resolver adecuadamente.

Síntesis metodológica

La Tabla 2 resume los principales elementos que determinan la confiabilidad de una simulación CFD y las consecuencias potenciales de una selección inadecuada.

Tabla2

Factores críticos para la calidad de una simulación CFD

Factor	Función	Riesgo si se aplica incorrectamente
Modelo físico	Representar el fenómeno real	Predicciones físicamente incorrectas
Modelo reológico	Describir relación esfuerzo-deformación	Error en velocidad y esfuerzos
Malla	Discretizar el dominio	Difusión numérica o pérdida de detalle
Condiciones de frontera	Definir entradas y salidas	Resultados no representativos
Modelo de turbulencia	Representar escalas turbulentas	Error en mezcla y transferencia
Paso temporal	Resolver evolución del flujo	Inestabilidad o pérdida de fenómenos
Propiedades físicas	Caracterizar materiales	Desviaciones sistemáticas
Convergencia	Controlar solución numérica	Solución incompleta
Independencia de malla	Verificar sensibilidad espacial	Dependencia artificial de discretización
Validación	Comparar con evidencia independiente	Imposibilidad de comprobar confiabilidad

Nota. La validación debe diferenciarse de la verificación numérica: la primera examina correspondencia con el fenómeno físico y la segunda el comportamiento del modelo matemático y numérico.

Resumen de la Tabla 2. Los resultados evidencian que el software CFD no garantiza por sí mismo una simulación válida. La calidad depende de una secuencia metodológica que comienza con la definición del problema físico y continúa con discretización, selección de modelos, solución, verificación y validación. La independencia de malla y la comparación con datos experimentales o soluciones de referencia constituyen pasos fundamentales para evitar resultados aparentemente plausibles pero físicamente incorrectos.

DISCUSSION

Los estudios revisados confirman que la CFD ha dejado de ser una herramienta limitada al análisis académico para convertirse en un recurso transversal de ingeniería. Su principal fortaleza radica en representar variables difíciles de medir experimentalmente dentro de todo el dominio, permitiendo visualizar gradientes, recirculaciones y zonas críticas. Sin embargo, la calidad depende directamente de la formulación física y numérica. Una simulación visualmente convincente no puede considerarse válida sin análisis de independencia de malla, convergencia y contraste con evidencia experimental o soluciones de referencia (Moukalled et al., 2016).

En hemodinámica, la elección del modelo reológico resulta especialmente crítica. Lynch et al. (2022) demostraron que aproximar la sangre como fluido newtoniano puede modificar métricas de velocidad, vorticidad, esfuerzo cortante y transporte cuando existen regiones de baja tasa de deformación. De manera concordante, Wajihah y Sankar (2023) resaltan que modelos no newtonianos ofrecen representaciones más adecuadas en arterias constreñidas. Estos hallazgos indican que la simplificación reológica debe justificarse según geometría, régimen de flujo y objetivo clínico, evitando generalizaciones que puedan comprometer la interpretación biomédica de los resultados obtenidos.

Los nanofluidos constituyen otro ámbito donde la CFD ofrece oportunidades importantes, pero también mayores incertidumbres de modelación. Sus propiedades efectivas dependen de tamaño, concentración, estabilidad y naturaleza de las nanopartículas, además de temperatura y características del fluido portador. Liang et al. (2025) destacan posibilidades para recuperación mejorada de petróleo, mientras Silva-Yumi et al. (2021) subrayan que síntesis y estabilidad condicionan el desempeño. En consecuencia, los modelos deben integrar propiedades experimentales confiables y considerar sedimentación, agregación e interacción interfacial cuando estos fenómenos posean importancia física dentro del proceso analizado.

En aplicaciones ambientales, el valor de CFD reside en resolver escalas espaciales complejas que los modelos simplificados no representan adecuadamente. García-Gutiérrez et al. (2022) evidencian que la geometría urbana modifica patrones locales de viento relevantes para movilidad aérea, mientras Duan et al. (2023) muestran la utilidad de modelos numéricos para transporte de sedimentos en condiciones no estacionarias. No obstante, estos problemas requieren condiciones de frontera realistas, representación geométrica apropiada y validación, debido a que modificaciones aparentemente menores pueden alterar de forma importante los campos de flujo, turbulencia y transporte calculados.

En ingeniería de procesos, las estrategias multifásicas amplían considerablemente la capacidad predictiva, pero incrementan el costo computacional y la necesidad de cierres empíricos. Yang et al. (2024) señalan que CFD-DPM posee perspectivas importantes para sistemas con fases dispersas, aunque persisten dificultades al representar condiciones densas y equipos industriales a gran escala. Rudniak et al. (2004) mostraron que reactores agitados requieren tratamientos diferenciados dependiendo de si el sistema es homogéneo o heterogéneo. La elección del modelo debe responder al mecanismo físico dominante y no exclusivamente a la disponibilidad de opciones dentro del software utilizado.

En conjunto, la literatura indica que el futuro de la CFD estará vinculado con modelos multifísicos, cómputo de alto rendimiento, calibración basada en datos e integración con inteligencia artificial. Sin embargo, estas herramientas no eliminan la necesidad de conocimiento físico. Automatizar mallas, ajustar parámetros o incorporar aprendizaje automático puede acelerar los análisis, pero no corrige una formulación incorrecta. El desafío consiste en equilibrar fidelidad física, costo computacional y verificabilidad, de manera que la simulación funcione como evidencia técnica reproducible y no únicamente como una representación gráfica atractiva del fenómeno estudiado.

CONCLUSIONS

La revisión confirma que la dinámica de fluidos computacional constituye una herramienta madura y transversal para estudiar sistemas donde la experimentación completa resulta costosa, limitada o técnicamente compleja. Su valor radica en resolver numéricamente campos de velocidad, presión, temperatura y concentración, permitiendo analizar fenómenos locales con elevado detalle. No obstante, la utilidad de los resultados depende de una formulación física coherente, una discretización adecuada y procedimientos de verificación y validación. Por ello, CFD debe utilizarse como complemento del conocimiento teórico y de la evidencia experimental, y no como sustituto automático de ambos enfoques.

Los resultados muestran que la naturaleza del fluido condiciona de manera decisiva la selección del modelo. En hemodinámica, nanofluidos y sistemas poliméricos, asumir comportamiento newtoniano puede introducir desviaciones cuando la viscosidad depende de la tasa de deformación o existen interacciones adicionales. Incorporar modelos constitutivos apropiados mejora la representación del fenómeno, aunque aumenta parámetros, incertidumbre y costo de cálculo. En consecuencia, la complejidad matemática debe justificarse según el problema analizado, evitando tanto simplificaciones excesivas como modelos innecesariamente sofisticados que dificulten la interpretación, validación y reproducibilidad de las simulaciones desarrolladas.

Las aplicaciones revisadas evidencian que CFD posee capacidad para abordar dominios diferentes, desde arterias y dispositivos microfluídicos hasta reactores, canales abiertos, entornos urbanos y procesos de recuperación de petróleo. Esta diversidad es posible porque los principios de conservación constituyen una base común, mientras cada aplicación incorpora modelos específicos de turbulencia, reología, transporte de partículas, superficie libre o transferencia térmica. El potencial interdisciplinario es considerable, pero exige comprender tanto el método numérico como la física

particular del sistema antes de seleccionar ecuaciones, condiciones de frontera, propiedades, mallado y criterios utilizados para evaluar los resultados.

Los sistemas multifásicos representan una de las fronteras más exigentes para la simulación contemporánea. Métodos como VOF y CFD-DPM permiten estudiar interfaces, partículas y fases dispersas, pero requieren especial atención a escalas, interacciones y modelos de cierre. En equipos industriales, una elevada concentración de partículas o geometrías complejas puede incrementar significativamente el costo computacional. El desarrollo futuro deberá combinar algoritmos más eficientes, procesamiento paralelo, estrategias de reducción de orden y validación experimental, permitiendo ampliar la aplicabilidad industrial sin sacrificar trazabilidad física, estabilidad numérica ni confiabilidad de las predicciones obtenidas mediante simulación.

Finalmente, la evolución de CFD apunta hacia entornos integrados donde simulación, experimentación, optimización e inteligencia artificial trabajen complementariamente. El aumento de capacidad computacional permitirá resolver modelos más detallados, pero la calidad científica seguirá dependiendo de verificar supuestos, cuantificar incertidumbre y documentar las decisiones de modelación. Para investigaciones futuras se recomienda establecer protocolos reproducibles de mallado, convergencia, sensibilidad y validación, además de emplear propiedades físicas verificables. Bajo estas condiciones, CFD puede consolidarse como herramienta predictiva de alto valor para diseño, diagnóstico, optimización y toma de decisiones en numerosos ámbitos de ingeniería.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

- Akhtar, S., Hussain, Z., Nadeem, S., Najjar, I. M. R., & Sadoun, A. M. (2023). CFD analysis on blood flow inside a symmetric stenosed artery: Physiology of a coronary artery disease. *Science Progress*, 106(2). <https://doi.org/10.1177/00368504231180092>
- Anderson, J. D., Jr. (1995). *Computational fluid dynamics: The basics with applications*. McGraw-Hill. https://books.google.com/books?id=phG_QgAACAAJ
- Campoverde León, J. A., Espinoza Loja, N. E., Gómez Ortega, D. B., León Cueva, W. P., & Sigsig Cabrera, D. J. (2024). Efecto de la humidificación en la exportación de banano. *Código Científico Revista de Investigación*, 5(1), 551–560. <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v5/n1/396>
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). *Fluid mechanics: Fundamentals and applications* (4th ed.). McGraw-Hill Education. <https://search.worldcat.org/title/958355753>
- Chhabra, R. P. (2010). Non-Newtonian fluids: An introduction. En A. P. Deshpande, J. M. Krishnan, & S. Kumar (Eds.), *Rheology of complex fluids* (pp. 3–34). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6494-6_1
- Duan, J. G., Yu, C., & Ding, Y. (2023). Numerical simulation of sediment transport in unsteady open channel flow. *Water*, 15(14), 2576. <https://doi.org/10.3390/w15142576>
- García-Gutiérrez, A., Gonzalo, J., López, D., & Delgado, A. (2022). Advances in CFD modeling of urban wind applied to aerial mobility. *Fluids*, 7(7), 246. <https://doi.org/10.3390/fluids7070246>
- <https://doi.org/10.71068/ec000053>

- Goyal, M., Dabas, H., Anas, M., & Arora, A. (2023). Thermophysical properties and heat transfer performance in nanofluids: A comprehensive review and CFD analysis. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 11(5), 4398–4420. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.52652>
- Kundu, P. K., Cohen, I. M., Dowling, D. R., & Capecelatro, J. (2024). *Fluid mechanics* (7th ed.). Academic Press. <https://www.sciencedirect.com/book/9780128198070/fluid-mechanics>
- Liang, F., Wang, W., Zhu, S., Hu, Y., Zhao, Z., Tan, Y., Yu, G., Hou, J., & Li, J. (2025). Nanofluids application in enhanced oil recovery process—Opportunities and challenges. *Arabian Journal of Chemistry*, 18(1), 106053. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.106053>
- Lynch, S., Nama, N., & Figueroa, C. A. (2022). Effects of non-Newtonian viscosity on arterial and venous flow and transport. *Scientific Reports*, 12, 20568. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19867-1>
- Michaelides, E. E., Crowe, C. T., & Schwarzkopf, J. D. (Eds.). (2016). *Multiphase flow handbook* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315371924>
- Moukalled, F., Mangani, L., & Darwish, M. (2016). *The finite volume method in computational fluid dynamics: An advanced introduction with OpenFOAM and MATLAB*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16874-6>
- Munson, B. R., Okiishi, T. H., Huebsch, W. W., & Rothmayer, A. P. (2013). *Fundamentals of fluid mechanics* (7th ed.). Wiley. <https://books.google.com.ec/books?id=GQMcAAAAQBAJ>
- Paris, M., Dubois, F., Bosc, S., & Devillers, P. (2023). Integrating wind flow analysis in early urban design: Guidelines for practitioners. *Journal of Contemporary Urban Affairs*, 7(2), 194–211. <https://doi.org/10.25034/ijcua.2023.v7n2-12>
- Pope, S. B. (2000). *Turbulent flows*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511840531>
- Ptasinski, P. K., Nieuwstadt, F. T. M., van den Brule, B. H. A. A., & Hulsen, M. A. (2001). Experiments in turbulent pipe flow with polymer additives at maximum drag reduction. *Flow, Turbulence and Combustion*, 66(2), 159–182. <https://doi.org/10.1023/A:1017985826227>
- Rojas, F. J., Anicama, V., de la Cruz, C. D., & Cataño, M. (2023). Análisis del uso de dinámica de fluidos computacional (CFD) para la implementación de un dispositivo con chorro de aire para la selección de papa amarilla Tumbay. *Información Tecnológica*, 34(2), 31–42. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642023000200031>
- Rudniak, L., Machniewski, P. M., Milewska, A., & Molga, E. (2004). CFD modelling of stirred tank chemical reactors: Homogeneous and heterogeneous reaction systems. *Chemical Engineering Science*, 59(22–23), 5233–5239. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.09.014>
- Shaheed, R., Mohammadian, A., & Yan, X. (2022). Numerical simulation of turbulent flow in bends and confluences considering free surface changes using the volume of fluid method. *Water*, 14(8), 1307. <https://doi.org/10.3390/w14081307>

- Silva-Yumi, J., Moreno Romero, T., & Chango Lescano, G. (2021). Nanofluids, synthesis and stability—Brief review. *ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of S.T.E.A.M.*, 1(2), 998–1006. <https://doi.org/10.18502/epoch.v1i2.9520>
- Soto-Arteaga, C. E., Gutiérrez-López, E. D., Esqueda-Barrón, Y., & Díaz de León, J. N. (2023). Breve revisión sobre la síntesis de los nanomateriales más usados como soportes y catalizadores en diversas aplicaciones. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 16(31), 1e–24e. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.31.69777>
- Valdivia-Silva, J., Pérez-Tulich, L., Flores-Olazo, L., Málaga-Julca, M., Ubidia, A., Fleschman, A., & Guio, H. (2020). Desarrollo de un sistema microfluídico (lab-on-a-chip) accesible y de bajo costo para detección de células tumorales circulantes de cáncer de mama. *Acta Médica Peruana*, 37(1). <https://doi.org/10.35663/amp.2020.371.967>
- Wajihah, S. A., & Sankar, D. S. (2023). A review on non-Newtonian fluid models for multi-layered blood rheology in constricted arteries. *Archive of Applied Mechanics*, 93(5), 1771–1796. <https://doi.org/10.1007/s00419-023-02368-6>
- Yang, X., Xi, T., Qin, Y., Zhang, H., & Wang, Y. (2024). Computational fluid dynamics–discrete phase method simulations in process engineering: A review of recent progress. *Applied Sciences*, 14(9), 3856. <https://doi.org/10.3390/app14093856>

FUNDING:

Los autores declaran que este estudio no recibió ningún tipo de financiación externa por parte de agencias públicas, privadas, ni de organizaciones sin ánimo de lucro. Todas las actividades de investigación, análisis y desarrollo fueron realizadas con recursos.

CONFLICT OF INTEREST:

Los autores afirman que no existen conflictos de intereses en este estudio y que se han seguido éticamente los procesos establecidos por esta revista. Además, aseguran que este trabajo no ha sido publicado parcial ni totalmente en ninguna otra revista.

AUTHOR CONTRIBUTION

Nombres de autores con sus iniciales: Milene Paulette Marca Laime (MPML), Samantha Lizbeth Matamoros Chuchuca (SLMCH), Nixon Joel Rogel Merchan (NJRM), Wilson Patricio León Cueva (WPLC), Delly Maribel San Martín Torres (DMSMT).

Conceptualización: (MPML)

Curación de datos: (SLMCH)

Análisis formal: (WPLC)

Adquisición de fondos: ()

Investigación: (MPML), (SLMCH)

Metodología: (NJRM), (WPLC), (DMSMT)

Administración del proyecto: (WPLC), (DMSMT)

Recursos: ()

Software: ()

<https://doi.org/10.71068/ec000053>

Supervisión: (WPLC), (DMSMT)

Validación: (WPLC), (DMSMT)

Visualización: (MPML), (SLMCH), (NJRM), (WPLC)

Redacción – borrador original: (MPML), (SLMCH), (NJRM)

Redacción – revisión y edición: (MPML), (SLMCH), (NJRM), (WPLC), (DMSMT)