Análisis del comportamiento hidrodinámico en tanques sedimentadores con partículas de arcilla evaluados mediante CFD

Angel de Jesús Pérez Méndez[1] e Iván Juárez Sosa[2]

[1] Posgrados CIATEQ A.C., Centro de Tecnología Avanzada, Circuito Aguascalientes Norte No. 135, Parque Industrial del Valle de Aguascalientes C.P. 20358, San Francisco de los Romo, Aguascalientes, México, angeldejesus.perez@ciateq.mx
[2] CIATEQ A.C., Centro de Tecnología Avanzada, Av. Manantiales 23-A, Parque Industrial Bernardo Quintana, El Marqués, Querétaro, 76246, México, ivan.juarez@ciateq.mx

Resumen

El tratamiento de aguas residuales mediante sedimentadores de placas inclinadas (lamelas) permite incrementar la capacidad de clarificación en plantas con restricciones de espacio. Sin embargo, fenómenos como cortocircuitos hidráulicos y aceleraciones locales en la salida comprometen la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos. En este trabajo se evaluó el impacto de la modificación geométrica del paquete lamelar sobre la tasa de sedimentación y retención de partículas de arcilla ($d_p = 208.6\ \mu m, 200\ mg/L$) mediante dinámica de fluidos computacional acoplada al Modelo de Fase Discreta (CFD – DPM). Se comparó la geometría convencional de placas planas a 60° (Modelo A) con un diseño optimizado que integra deflectores superiores curvos (Modelo D). Los resultados revelan que la adición de deflectores curvos redistribuye homogéneamente el flujo interno y disipa la energía cinética en la interfaz de salida. Esta alteración hidrodinámica redujo en un 35 % el pico máximo de emisión de sólidos durante transitorios críticos y mantuvo la eficiencia de remoción por encima del 98.7 %. Tras 7020 s de operación, el Modelo D logró una disminución neta del 8.0 % en la masa total de arcilla fugada al efluente en comparación con el diseño convencional (de 6.60 g a 6.07 g). Se demuestra que la optimización de factores geométricos locales mejora sustancialmente la calidad del agua tratada y reduce la carga contaminante hacia etapas posteriores de filtración, proporcionando un esquema de reingeniería compacto que evita ampliaciones de infraestructura física.

***Palabras clave*— Dinámica de fluidos computacional, Flujo multifásico, Sedimentador de placas inclinadas, Tratamiento de aguas residuales.**

Analysis of hydrodynamic behavior in sedimentation tanks containing clay particles, evaluated using CFD

Abstract

Wastewater treatment using inclined plate (lamella) settlers enhances clarification capacity in space-constrained facilities. However, internal hydraulic short-circuiting and localized outlet acceleration often compromise suspended solid removal efficiency. This study evaluated the impact of lamellar geometric modifications on the settling rate and retention of fine clay particles ($d_p = 208.6\ \mu m, 200\ mg/L$) using Computational Fluid Dynamics coupled with the Discrete Phase Model (CFD-DPM), the conventional 60° flat-plate configuration (Model A) was compared against an optimized design incorporating curved upper deflectors (Model D). Results demonstrate that curved deflectors homogenize internal flow distribution and dissipate kinetic energy at the exit interface. This hydrodynamic alteration attenuated the peak solid emission by 35% during critical operational transients while maintaining minimum removal efficiencies above 98.7%. Over a 7020 s operational window, the geometric optimization achieved an 8.0% net reduction in total clay mass escaped into the effluent compared to the standard model (from 6.60 g to 6.07 g). These findings confirm that targeted geometric modifications directly improve treated water quality and lower the solids burden on downstream treatment units, offering a compact retrofit solution that eliminates the need for physical plant expansions.

***Keywords*— Computational fluid dynamics, Multiphase flow, Inclined-plate sedimentation tank, Wastewater treatment.**

I. INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales, y en particular la gestión y recuperación de aguas grises, representa un pilar fundamental para garantizar la sostenibilidad ambiental, la salud pública y la mitigación del estrés hídrico a nivel global [1]. Entre las operaciones unitarias involucradas en estos procesos, la separación sólido-líquido mediante tanques de sedimentación desempeña un papel crítico. El objetivo principal de estos equipos es facilitar la remoción física de los materiales sólidos suspendidos en el efluente, reduciendo la carga contaminante y optimizando la eficiencia de los tratamientos posteriores [2].

Para maximizar el rendimiento de este proceso en instalaciones con restricciones de espacio, la implementación de paneles lamelares (o paquetes laminares) se ha consolidado como una solución tecnológica altamente eficaz [3].

Estos sistemas, dispuestos bajo configuraciones geométricas específicas y ángulos de inclinación determinados, incrementan significativamente el área de sedimentación efectiva proyectada. Esto favorece la decantación de partículas finas dispersas (como arcillas y otros sólidos en suspensión) al

Recibido: 23 de junio de 2026
Aceptado: 23 de octubre de 2026
Publicado: 6 de noviembre de 2026

reducir la distancia que estas deben recorrer antes de ser separadas del flujo principal [4].

A pesar de sus ventajas operativas, la eficiencia de los sedimentadores lamelares es altamente dependiente de su diseño geométrico. La configuración de las lamelas dicta el comportamiento hidrodinámico del sistema, el cual puede verse mermado por fenómenos no deseados como cortocircuitos hidráulicos, turbulencias excesivas y resuspensión de sólidos, lo que impacta negativamente en la calidad del agua tratada [5].

Para mitigar estas deficiencias hidrodinámicas, el modelado numérico mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) ha permitido cuantificar con precisión el impacto directo de la optimización geométrica sobre la eficiencia operativa. En el ámbito de los tanques de sedimentación lamelar, [6] demostraron mediante CFD que, para mantener una eficiencia de remoción de sólidos suspendidos (SS) del 82 %, un incremento de 1.5 veces en el caudal requiere de un aumento de 6.2 veces en el área de las placas, cuantificando que la efectividad real de las lamelas alcanza solo un 7.9% frente al valor teórico ideal. Sin embargo, al optimizar la geometría del paquete lamelar hacia una configuración de placas inclinadas en V (chevron), lograron elevar la eficiencia de remoción de SS hasta un rango de 73% a 90% para cargas superficiales de 1 a 2 $m^3/m^2 * h$ y reducir los cortocircuitos hidráulicos, incrementando el tiempo normalizado de llegada del trazador de 0.35 a 0.511. Por su parte, [5] aplicó un análisis topológico CFD identificando que la formación de vórtices internos provoca que la carga hidráulica superficial local sea entre 1.5 y 4.5 veces superior a la tasa de diseño nominal (alcanzando hasta 7.14 m/h en picos de flujo), y determinó que la zona de recirculación ocupa entre el 35% y el 78% de volumen total del tanque; mediante la reestructuración de la geometría se logró controlar la expansión de dichos vórtices y predecir eficiencias de separación reales del 56% al 84% según el régimen de carga.

En cuanto a estructuras de separación por placas y deflectores corrugados, [7] emplearon un modelo acoplado DPM-ELFM (validado experimentalmente con un error < 10%) para identificar una velocidad crítica de flujo de 1.2 m/s. Su estudio demostró que simplificar la geometría de 4 a 3 ganchos y de 4 a 3 pliegues preserva una eficiencia de separación superior al 99.9 % mientras reduce drásticamente la caída de presión (de ~310 Pa a ~100-170 Pa a 1.5 m/s, lo que representa una reducción de pérdidas de carga de hasta un 45%) al evitar la ruptura de la película líquida por arrastre secundario. Finalmente, [8] sintetizaron las metodologías CFD en separadores de placas, resaltando que la optimización de la curvatura geométrica (como el uso de alabes curvados horizontales) reduce las pérdidas de presión en un 30% y permite alcanzar una eficiencia de separación del 100% para partículas que superan el diámetro crítico de 40-65 μm, recomendando el acoplamiento Euler-DPM-EWF para describir con exactitud películas líquidas con espesores inferiores a 5 mm.

La aplicación de esta metodología permitirá ejecutar un análisis detallado de los perfiles de flujo interno y evaluar parámetros hidrodinámicos clave, como la distribución de velocidades, la mitigación de zonas de estancamiento y la eficiencia global de sedimentación. Esta última se cuantifica mediante el seguimiento de trayectorias, comparando la fracción de partículas sólidas retenidas frente a las expulsadas en el efluente [7].

El uso de herramientas de simulación CFD ha revolucionado el diseño de sistemas en la ingeniería de fluidos [8].

Estas plataformas permiten la ejecución de experimentación in silico, ofreciendo la capacidad de visualizar y cuantificar fenómenos hidrodinámicos complejos que son imperceptibles o de difícil medición en modelos físicos a escala. La adopción de estas técnicas predictivas elimina la necesidad de iterar continuamente con protocolos físicos durante las fases iniciales de diseño, reduciendo de manera drástica los costos y tiempos asociados al desarrollo tecnológico [9].

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo principal evaluar el impacto de la variación geométrica en módulos de sedimentación lamelar sobre el comportamiento hidrodinámico y la eficiencia de remoción de partículas de arcilla en aguas grises, utilizando dinámica de fluidos computacional (CFD) acoplada con el Modelo de Fase Discreta (DPM). Específicamente, el estudio analiza cuatro configuraciones geométricas basadas en un módulo estándar de placas inclinadas a 60° (Modelo A), modificando las alturas incrementales de las láminas y la adición estratégica de deflectores superiores curvos (Modelos B, C y D). Se evalúa cómo estas intervenciones geométricas alteran los patrones de flujo interno – mitigando cortocircuitos hidráulicos y disipando energía cinética en la interfaz de salida - y cómo influyen directamente en la trayectoria, el tiempo de residencia y la tasa de captura efluente de partículas de arcilla con un diámetro promedio de 208.6 μm.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La geometría del sistema se construyó utilizando el software de diseño asistido por computadora (CAD) Solidworks. Se generó un dominio computacional tridimensional para representar el comportamiento hidrodinámico de un tanque de sedimentación de 4.0 m de largo, 1.0 m de ancho y 2.0 m de alto. Este dominio integra tres zonas principales: la región de entrada del flujo, el módulo lamelar - compuesto por el paquete de placas - y la cámara de salida.

Para evaluar el efecto de la geometría en la eficiencia de sedimentación, se desarrollaron cuatro configuraciones distintas tomando en cuenta el primer modelo como modelo base y en las tres configuraciones restantes se variaron sistemáticamente las alturas entre placas y la adición de deflectores superiores, tomando como referencia los criterios de diseño establecidos en la literatura [5] los cuales consideran un paquete de 8 placas lamelares inclinadas de 60°, separadas entre sí por 0.4 m cada una, la altura del piso de 0.5 m, en un dominio de 4.0 m de largo x 1.0 m de ancho x 2.0 m de alto, y un rango de tasa de carga hidráulica superficial de 0.5 a 4.0 m/h. La configuración considerada como base Fig. 1. Ilustra el modelo desarrollado en CAD, el cual fue empleado para llevar a cabo la calibración y validación del modelo numérico. Los resultados obtenidos de esta configuración base se compararon con los

datos reportados por [10],[5] los cuales se ven a detalle en la sección de resultados, con la finalidad de validar la precisión de las simulaciones antes de evaluar las nuevas configuraciones.

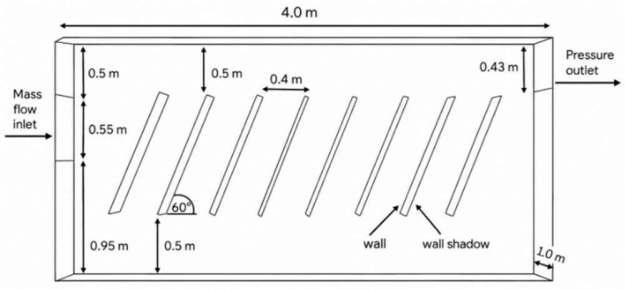


Fig. 1 Modelo base de placas inclinadas (adaptado de [5]).

Durante la etapa de diseño conceptual, se identificó que tres de las variaciones geométricas planteadas inicialmente coincidían con los modelos previamente analizados por [10] como se muestran en la Fig. 2.

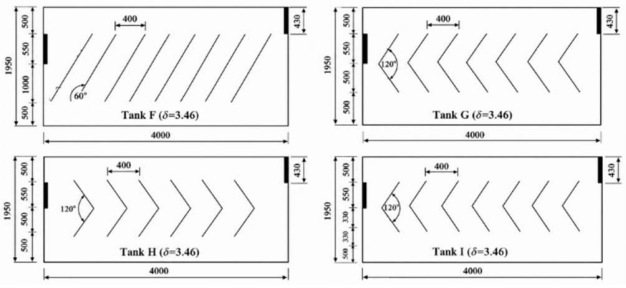


Fig. 2 Configuraciones geométricas de los modelos de tanque con placas inclinadas, adaptadas de [5].

A partir de un análisis crítico de dicho estudio, se determinó emplear estas geometrías, no como modelos definitivos, sino como líneas base para una modificación geométrica incremental. Esta evolución del diseño consistió en la incorporación de deflectores superiores al paquete lamelar, para optimizar las líneas de flujo y mejorar el rendimiento del sistema. La implementación de estas adiciones estructurales dio lugar a tres nuevas configuraciones, las cuales se detallan en las Fig. 3, 4 y 5 respectivamente.

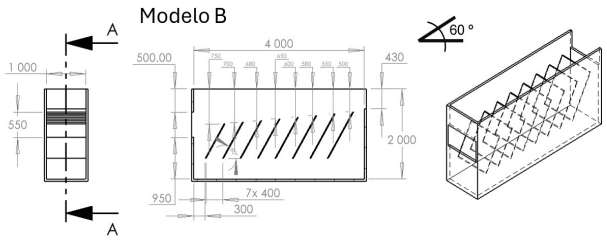


Fig. 3 Modelo B placas incrementales, elaboración propia.

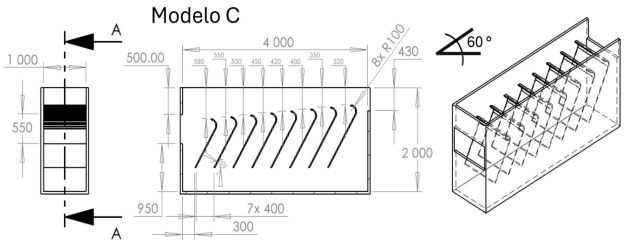


Fig. 4 Modelo C deflectores superiores, elaboración propia.

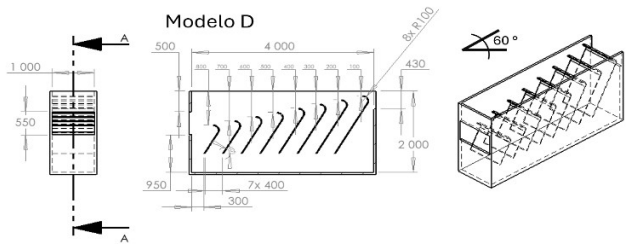


Fig. 5 Modelo D deflectores superiores placas incrementales, elaboración propia.

A. Preparación del Dominio y Mallado

El dominio geométrico tridimensional se discretizó utilizando el módulo ANSYS Meshing, mediante una técnica de mallado no estructurado con elementos predominantemente tetraédricos. Esta aproximación proporcionó la flexibilidad necesaria para adaptarse a la complejidad geométrica de las estructuras lamelares propuestas, permitiendo capturar con precisión los fenómenos de transporte en las zonas de transición hidrodinámica.

Para garantizar la correcta resolución del modelo de turbulencia de transporte de esfuerzo cortante (SST), se implementó un refinamiento local en las regiones con mayores gradientes hidráulicos, tales como las interfases sólido-fluido, los bordes de las láminas y las zonas de entrada y salida del flujo. De acuerdo con la configuración técnica establecida, se aplicaron los siguientes criterios de mallado, los cuales se aprecian en la Fig. 6:

- Tamaño base del dominio: Se evaluaron tamaños de elementos de (40, 50, 60 y 100) mm para el cuerpo principal del fluido, seleccionando la resolución que demostró el mejor balance entre la convergencia de los resultados y el costo computacional.
- Refinamiento en el paquete lamelar: Se garantizó una resolución mínima de 10 celdas en los canales de separación entre placas, asegurando una descripción adecuada de los perfiles de velocidad y la captura de posibles zonas de recirculación.

- Capas de inflación (*inflation layers*): Se introdujeron entre 5 capas prismáticas sobre las paredes de las lamelas y del tanque. Esta configuración resultó indispensable para resolver correctamente la capa límite y asegurar que el tratamiento de la pared fuera compatible con las exigencias del modelo SST garantizando un valor de y^+cercano a la unidad en las superficies críticas.
- Zonas críticas: Los bordes de las lamelas y las regiones de acumulación en el fondo del tanque se discretizaron con un tamaño de elemento reducido (entre 10 y 15 mm) con la finalidad de minimizar los efectos de la difusión numérica.

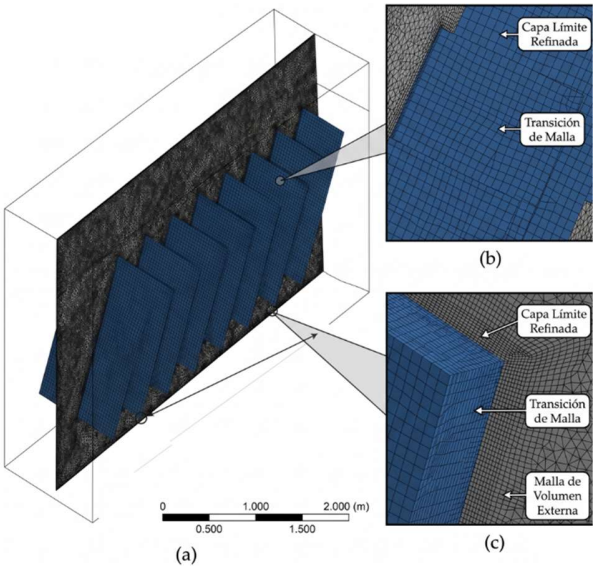


Fig. 6 Detalle de refinamiento en zonas de mallado, (a) Vista general del dominio y planos de muestreo, (b) Detalle del mallado estructurado en sección transversal, (c) Detalle del refinamiento en la capa límite pared-malla

Finalmente, se llevó a cabo un estudio de independencia de malla para asegurar que la solución numérica fuera asintótica y no dependiera de la resolución espacial. Siguiendo las recomendaciones de [11], el refinamiento progresivo se ejecutó hasta que la variación en las variables de control específicamente la eficiencia de sedimentación acumulada (m_{acc}) y el campo de velocidades promedio en el paquete lamelar fue inferior al 3 % entre niveles de malla consecutivos.

B. Configuración Física y Condiciones de Frontera

Las propiedades del fluido y de la fase dispersa se definieron con el objetivo de representar fielmente el comportamiento de las partículas de arcilla presentes en aguas residuales, tomando como base los parámetros físicos reportados en la literatura técnica especializada. En la Tabla I se detallan las propiedades termofísicas y operativas empleadas en la configuración del dominio computacional.

TABLA I
PARÁMETROS BASE DE CONFIGURACIÓN FÍSICA

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Densidad del agua	ρ_ω	998.0	kg/m^3
Viscosidad dinámica	μ_ω	$1.003\ x\ 10^{-3}$	Pa * s
Densidad de la partícula	ρ_p	1 020.0	kg/m^3
Diámetro equivalente	d_p	208.6	μm
Caudal de entrada	Q	$9.75\ x\ 10^{-4}$	m^3/s
Concentración de sólidos	C_{in}	200.0	mg / L

Para asegurar la estabilidad numérica y la adecuada convergencia del modelo multifásico Euleriano en régimen transitorio, se establecieron las siguientes condiciones de contorno para el dominio computacional:

- Entrada (*Velocity inlet*): Se definió una condición de velocidad uniforme normal a la frontera con una magnitud de 0.001 970 m/s. En esta sección de entrada, se especificó la fracción volumétrica de la fase sólida ($\alpha_{s,in} = 1.9608\ x\ 10^{-4}$) correspondiente a la concentración inicial y se estableció una intensidad de turbulencia del 5 %.
- Salida (pressure outlet): Se fijó una presión manométrica de 0 Pa en la zona de descarga del agua clarificada. Para prevenir inestabilidades en el balance de masa global, se configuró un flujo de retorno (*backflow*) compuesto exclusivamente por la fase primaria (agua).
- Superficie superior (*Symmetry*): Dado que se modela un tanque abierto, se optó por omitir la resolución explícita de la superficie libre mediante el modelo de volumen de fluido (VOF) con el fin de optimizar el costo computacional. En su lugar, se aplicó una condición de simetría en la frontera superior del tanque.
- Paredes y lamelas (*wall*): Para la fase líquida se aplicó la condición de no deslizamiento (*no-slip condition*). Para la fase sólida, se definió una condición de pared granular sin penetración, lo que permite que la interacción fluido-estructura esté gobernada predominantemente por los esfuerzos de corte del fluido primario.
- Gravedad: se activó la aceleración gravitatoria de forma constante con un valor de – 9.81 m/s^2 orientado en el eje vertical (Y), motor principal del proceso de sedimentación.

III. RESULTADOS

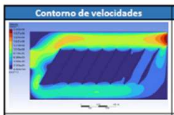
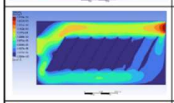
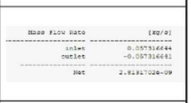
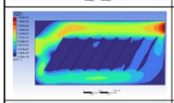
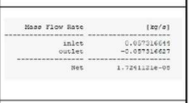
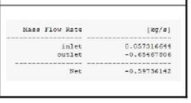
A. Análisis de Independencia de Malla

Previo a la evaluación del modelo multifásico, se garantizó la fiabilidad espacial de las simulaciones mediante un análisis de independencia de malla en régimen estacionario. Se evaluaron cuatro tamaños de elemento base (40, 50, 60, 100) mm. La selección se basó en la resolución cualitativa de los

contornos de velocidad en el paquete lamelar, el cierre del balance de masa global y el costo computacional.

Como se detalla en la Tabla II, la malla gruesa (100 mm) resultó incapaz de capturar el desarrollo del flujo, presentando una divergencia crítica como un error de flujo neto de – 0.597 361. Por el contrario, los refinamientos de 60, 50 y 40 mm lograron estabilizar el sistema con flujos netos residuales en el orden de 1.724 112 1 x 10^{-08} a 4.160 131 9 10^{-10}, lo cual representa un balance de masa idóneo. Para las simulaciones definitivas se seleccionó la malla de 40 mm (252 963 nodos). Aunque requirió un incremento moderado en el tiempo de cómputo, esta densidad nodal fue imperativa para resolver con alta fidelidad los gradientes de velocidad, el desarrollo de las capas límite y las zonas de recirculación, fenómenos fundamentales para el acoplamiento preciso con el modelo de fase discreta.

TABLA II
ANÁLISIS DE INDEPENDENCIA DE MALLA

Contorno de velocidades	Element size	Número de nodos	Tiempo de computo	Balance de masa
	40 mm	252 963	45 min	
	50 mm	140 073	39 min	
	60 mm	86 502	35 min	
	100 mm	18 430	10 min	

B. Validación del Modelo Numérico y Comparación Cuantitativa con la Literatura

Para verificar la fiabilidad de la metodología CFD-DPM implementada, los resultados hidrodinámicos y de sedimentación obtenidos con el modelo base (Modelo A, compuesto por 8 placas inclinadas a 60°) se compararon cuantitativamente con los datos numéricos y experimentales reportados por [5], [6], cuyos dominios y arreglos geométricos sirvieron de referencia.

Como se sintetiza en la Tabla 3, la simulación del Modelo A presenta una elevada consistencia con la literatura. En términos de hidrodinámica, el tiempo normalizado de llegada del trazador (θ_{10}), indicador del grado de cortocircuito hidráulico [5], registró un valor de 0.36 en el modelo A, el cual coincide estrechamente con el valor de 0.35 reportado por [6] y el rango de 0.36 – 0.40 calculado por [5] para tasas de carga hidráulica superficial (HLR) de 1.0 m/h. En cuanto a la eficiencia de separación de sólidos de régimen dinámico, el modelo base predice una eficiencia asintótica elevada (> 98.0 %) para partículas de arcilla con diámetro equivalente d_p = 208.6 µm. Esta tendencia valida el comportamiento del Modelo de Fase Discreta (DPM) cuya desviación respecto al modelo multifásico algebraico de *[6]*. (88.0 %) y al seguimiento Lagrangiano de [5] (84 %) se mantiene por debajo del 8 %, siendo atribuible principalmente a la monodispersión y al mayor tamaño relativo de la partícula de arcilla evaluada frente a las distribuciones granulométricas multisectoriales de los estudios previos.

TABLA III
COMPARACIÓN CUANTITATIVA DE PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS Y DE SEPARACIÓN ENTRE EL MODELO BASE (MODELO A) Y LA LITERATURA DE REFERENCIA

Parámetro evaluado	**Nguyen et al. [6]**	**Karches [5]**	**Estudio (modelo A)**	**Desviación/ concordancia**
Configuración geométrica base	8 placas a 60° (0.4 m espaciamiento)			Identidad geométrica
Modelo Numérico multifásico	Modelo Algebraico de Deslizamiento (ASM)	Modelo de Fase Discreta (DPM Lagrangiano)	Modelo de Fase Discreta (CFD-DPM)	Equivalencia metódica DPM
Índice de cortocircuito hidráulico (θ_{10})	0.35	0.36 – 0.40	0.36	Altamente concordante (≤ 2.7%)
Eficiencia de remoción (HLR = 1.0 m/h)	88.0 % (grupos de partículas)	84.0 % (traking Lagrangiano)	98.0 % (Min transitorio) /99.5 % (Asintótico)	Desviación < 8.0 % explicada por d_p = 208.6 μm
Patrón de flujo/ Recirculación	Vórtices bajo placas y cortocircuito superior	Recirculación en Zona 1 (35–56% del volumen)	Cortocircuito superior y recirculación de entrada	Comportamiento cualitativo idéntico

C. Caracterización Hidrodinámica y Selección Geométrica

Se evaluaron cuatro configuraciones geométricas que se denominaron modelos A, B, C y D bajo el modelo de turbulencia $k-\omega$ SST para diagnosticar los patrones de circulación global. El análisis de convergencia demostró que el modelo A (referencia convencional) y el modelo D (diseño propuesto) alcanzaron una caída logarítmica estable en los residuales y un cierre de balance de masa del orden de $10^{-9}\ kg/s$. Los modelos B y C fueron descartados para el análisis multifásico debido a inestabilidades numéricas y a la generación de patrones de flujo excesivamente turbulentos entre láminas, lo cual incrementaría el riesgo teórico de resuspensión de sedimentos.

El análisis de las líneas de corriente mostradas en la Fig. 7 reveló marcadas diferencias en el aprovechamiento del volumen útil. El modelo A exhibió un severo cortocircuito hidráulico en la zona superior, limitando el área efectiva de trabajo. En contraste, el modelo D demostró una distribución cualitativamente más homogénea del fluido a través de los canales lamelares, condición indispensable para maximizar el tiempo de residencia hidráulica.

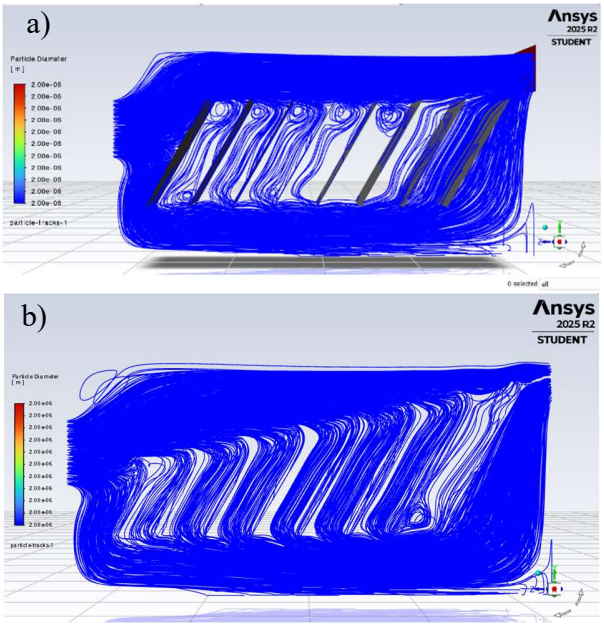


Fig. 8 Comparativa hidrodinámica preliminar. (a) Geometría y trazado de partículas para el modelo A (convencional), evidenciando cortocircuitos superiores. (b) Geometría y trazado de partículas para el modelo D (optimizado), mostrando una distribución de flujo homogeneizada.

La presencia del severo cortocircuito hidráulico y la amplia zona de recirculación inferior observados en el modelo A (Fig. 7a) coinciden plenamente con la topología de flujo descrita por [5], quien identificó que en sedimentadores de placas planas estándar las zonas de recirculación y estancamiento pueden ocupar entre el 35 % y el 78 % del volumen total del tanque, dividiendo el dominio en dos zonas principales de flujo. Asimismo, concuerda con lo reportado por [6], quienes demostraron que las corrientes preferenciales superiores reducen drásticamente la efectividad real de las lamelas convencionales a solo un 7.9 % respecto al valor teórico. En contraste, la homogenización del flujo lograda en el Modelo D (Fig. 7b) mediante la adición de deflectores curvos logra romper el *(bypass)* superior y redistribuir las líneas de corriente hacia los canales inferiores, emulando la mejora hidráulica que [6]. Obtuvieron al modificar la configuración de paneles (modelo chevron), pero con la ventaja de no alterar la inclinación base de 60° ni la huella del tanque.

D. Dinámica de Flujo y Mecanismos de Captura

Para comprender el impacto de la modificación geométrica del modelo D (integrando deflectores curvos en el borde superior de las lamelas), se analizaron los vectores de velocidad en el plano longitudinal central como se presenta en la Fig. 8.
En el modelo A, compuesto por placas planas estándar, el flujo presenta un comportamiento fuertemente canalizado. La inercia del fluido concentra los vectores de velocidad en la región superior, generando una corriente preferencial casi lineal hacia la salida. La implementación de los deflectores curvos en el modelo D actúa como una barrera cinemática eficiente. Esta curvatura redirecciona los vectores hacia el interior de los canales lamelares, rompiendo la corriente preferencial y

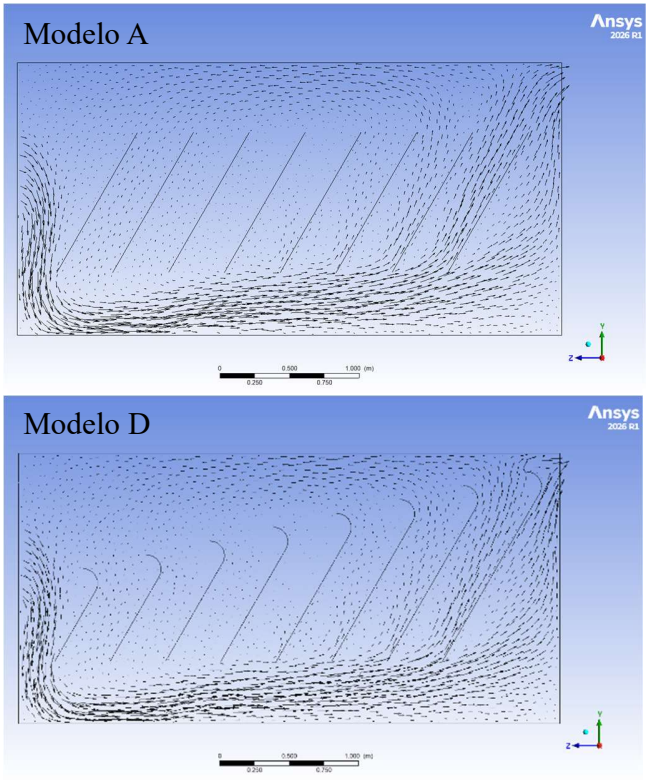


Fig. 7 Multipanel con vectores de velocidad para modelos A y D.

obligando a una mayor fracción del fluido a transitar por las zonas de sedimentación efectiva. Este redireccionamiento tiene un impacto directo en la capacidad de retención del sistema, como se observa en los contornos de fracción volumétrica de arcilla, (Fig. 9). La innovación del modelo D radica en su capacidad para disipar la energía cinemática en la interfaz de salida. Al reducir la velocidad de carga local en el borde superior, se maximiza la probabilidad de colisión y adherencia de las partículas con velocidades de sedimentación críticas, previniendo su arrastre hacia el efluente.

E. Evaluación Cuantitativa de la Eficiencia de Remoción

El desempeño transitorio del modelo optimizado fue evaluado a lo largo de 7 020 s de simulación, inyectando una masa total de 1.317 kg de arcilla floculada. Durante los primeros 1 800 s, ambas geometrías demostraron una retención absoluta. Sin embargo, al alcanzar el frente de avance la cámara de salida, el sistema convencional (Modelo A) experimentó una pérdida abrupta de control hidrodinámico. Se registró un pico máximo de emisión de sólidos cercano a $3.7x10^{-6}\ kg/s$ a los 3 200 s, lo que provocó una caída de la eficiencia de remoción hasta un mínimo del 98 %. Por su parte, el modelo D atenuó drásticamente este fenómeno. La distribución homogénea del flujo, inducida por los deflectores, redujo la magnitud máxima del pico de emisión de un 35 % y mantuvo la eficiencia operativa mínima por encima del 98.7 % en los momentos de mayor criticidad hidrodinámica. Al finalizar el periodo de simulación, la fuga total de masa se redujo de 6.60 g (modelo A) a 6.07 g (Modelo D) como se muestra en la Tabla IV y en la Fig. 10.

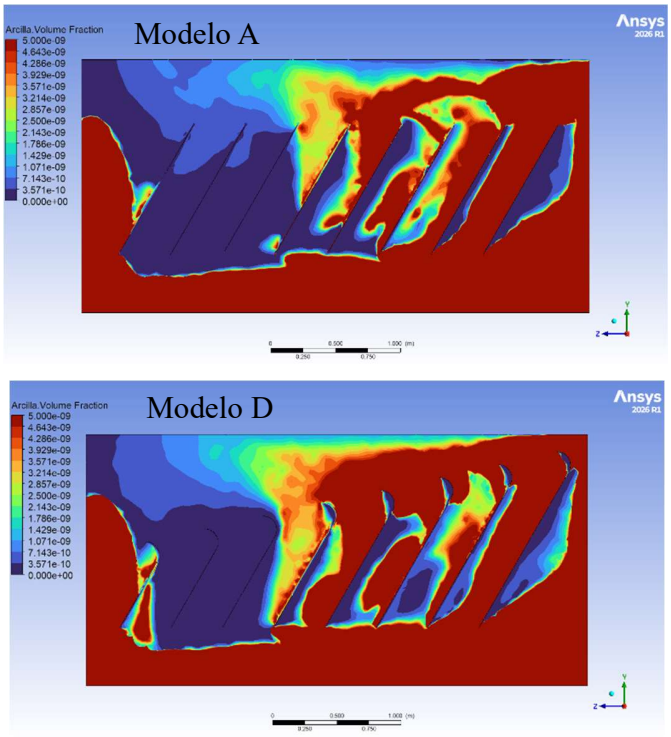


Fig. 9. Contornos logarítmicos de fracción volumétrica de arcilla evidenciando las zonas de retención y captura.

La inestabilidad registrada en el Modelo A tras los primeros 1 800 s, con un pico de emisión de sólidos de $3.7x10^{-6}\ kg/s$ y una caída de eficiencia hasta el 98 % (Fig. 10), refleja la vulnerabilidad de los diseños convencionales ante transitorios de carga identificada tanto por [6] como por [5]. La atenuación del 35% en la magnitud del pico de emisión y la reducción neta del 8.0 % en la masa total de arcilla efluente logradas por el Modelo D sustentan cuantitativamente que la reestructuración de la interfaz superior estabiliza el régimen dinámico del sedimentador. Esto confirma que la optimización geométrica localizada es capaz de contrarrestar el efecto desestabilizador de las fluctuaciones de carga hidráulica sin requerir incrementos en el área proyectada total.

Aunque las eficiencias asintóticas globales de ambos sistemas resultaron excepcionales (> 99.7%), la optimización

TABLA IV
RESULTADOS DE COMPARACIÓN DE EFICIENCIA DEL MODELO BASE VS. MODELO OPTIMIZADO.

Parámetro	Modelo base	Modelo optimizado	Diferencia (Δ)
Condiciones comunes			
Caudal volumétrico Q (tanque real)	3.39 m^3/h	3.39 m^3/h	igual
$\dot{m}$_ in (tanque real)	1.88 $x\ 10^{-4}$	1.88 $x\ 10^{-4}$	igual
Tiempo simulado	7 000 s	7 000 s	igual
Fracción volumétrica de entrada	1.961 $x\ 10^{-4}$	1.961 $x\ 10^{-4}$	igual
Balance de masa (tanque real)			
Masa total de entrada ($\int \dot{m}_{in}\, dt$)	1.317 kg	1.317 kg	-
Masa total de salida ($\int \dot{m}_{out}\, dt$)	6.51 g	5.98 g	- 0.53 g
Masa acumulada en tanque	1.294 kg	1.295 kg	+ 0.001 kg
Reducción de masa fugada (mejora absoluta)			
Masa que escapó en 7 020 s	6.60 g	6.07 g	- 8.0 %
Reducción absoluta	-	-	0.53 g
Reducción relativa de fuga	-	-	- 8.0 %

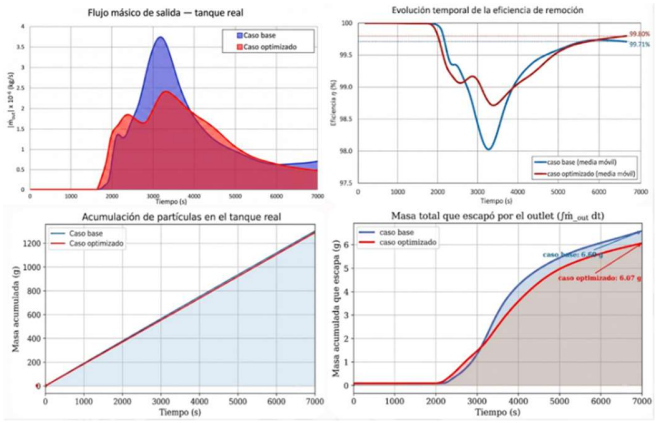


Fig. 10. Dinámica temporal de la sedimentación, evolución del flujo másico en la salida y comportamiento de la eficiencia de remoción porcentual a lo largo del tiempo de operación.

geométrica representó una disminución neta del 8 % en la carga final de sólidos del efluente hasta ese paso de tiempo (7 020 s). Estos resultados confirman que la intervención en la geometría superficial es una estrategia de ingeniería viable para incrementar significativamente la calidad del agua tratada, sin requerir ampliaciones de la huella física de la infraestructura.

IV. CONCLUSIONES

En este estudio se demostró que la optimización geométrica de la región superior en tanques sedimentadores lamelares constituye una estrategia técnica efectiva para mitigar las ineficiencias hidrodinámicas sin necesidad de incrementar la huella física de la infraestructura. Mediante el acoplamiento de un análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD) y un modelo de seguimiento de fase discreta, se llegó a las siguientes conclusiones fundamentales:

- **Mitigación cuantitativa de cortocircuitos hidráulicos:** El diseño convencional de placas planas (Modelo A) es inherentemente susceptible a la formación de corrientes preferenciales en la interfaz de salida, registrando un tiempo normalizado de primera llegada de trazador de $\theta_{10} = 0.36$. La incorporación de deflectores curvos superiores (Modelo D) actúa como una barrera cinemática que redistribuye los vectores de velocidad hacia el interior de los canales, logrando incrementar este parámetro a $\theta_{10} = 0.51$. Esta variación evidencia un retraso significativo en la aparición de flujo preferencial, respaldado por una reducción en el índice de cortocircuito y una distribución de flujo significativamente más homogénea.
- **Estabilidad ante transitorios de carga:** La modificación geométrica propuesta demostró una notable capacidad para amortiguar la resuspensión y el arrastre de partículas de arcilla d_p = 208.6 µm. Durante los periodos de mayor inestabilidad hidrodinámica, el modelo optimizado redujo el pico máximo de emisión de sólidos en un 35 % y mantuvo la eficiencia de remoción mínima por encima del 98.7 %, superando de manera consistente el desempeño del diseño estándar.

- **Mejora en la calidad del efluente:** Al disipar la energía cinética en la zona superior y reducir la velocidad de carga local, el diseño optimizado facilita la captura de partículas con velocidades de sedimentación críticas. Esto se tradujo en una disminución neta del 8.0 % en la masa total de sólidos fugada hacia el efluente (de 6.60 g a 6.07 g tras 7020 s de operación), confirmando su viabilidad para aplicaciones de tratamiento de aguas residuales que exigen altas tasas de clarificación sin recurrir a expansiones físicas de la planta.

En conjunto, estos hallazgos proporcionan un marco de referencia cuantitativo y robusto para el rediseño y la modernización (*retrofitting*) de plantas de tratamiento de agua existentes, demostrando que intervenciones localizadas en la geometría lamelar pueden generar mejoras sustanciales en el rendimiento global del proceso.

REFERENCIAS

[1] Metcalf and Eddy, Wasterwater Engineering: Treatment and Resource Recovery, New york,NY, USA: McGraw-Hill Education, 2014.

[2] Kirpa Hirom., Mk Raeesh. and T. Tamphasana, "CFD Study on Finding Optimum Number of Inclined Plates and Settling Efficiency in a Novel Sedimentation Tank (Lamella Clarifiers) of Wastewater Treatment Unit," *Researchgate,* 2023.

[3] S. N. Fleite, A. R. García, C. De los Santos, L. L. Missoni, R. Torres, M. G. Lagorio and M. Cassanello, "Simulation and optimization of a lamella settler for cattle feedlot wastewater treatment and nutrients recovery. Experimental validation in the field," *Heliyon,* no. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05840, p. 8440, 2020.

[4] M. M. Abbas, M. N. A. Meshref and M. E. H. El Nadi, "Design parameters for implementing inclined plate settlers in sedimentation tanks," *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies,* vol. 8, no. ISSN: 2617-6548, pp. 460-468, 2025.

[5] T. Karches, "Towards a Dynamic Compartmental Model of a Lamellar Settler," *Symmetry,* no. https://doi.org/10.3390/sym15040864, p. 864, 2023.

[6] T.-a. Nguyen, N. Thi-minh Dao, B. Liu, M. Terashima and H. Yasui, "Computational fluid dynamics study on attainable flow rate in a lamella settler by increasing inclined plates," *Journal of Water and Environment Technology,* vol. 17, pp. 76-88, 2019.

[7] Xu, C., Chen, X., Xie, Y. and Y. Chen, "Digital twin-driven advanced manufacturing: A review of recent developments and future perspectives.," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,* 2021.

[8] Y. Li, Q. Jiang, T. Yi and J. Lou, "Numerical simulation method for steam water separator used in PWR," *Nuclear Engineering and Technology,* 2026.

[9] Hang., J.-H. Wu. and Y.-J. Chang, "Optimization Based on Computational Fluid Dynamics and Machine Learning for the Performance of Diffuser-Augmented Wind Turbines with Inlet Shrouds," *Sustainability,* 2024.

[10] ANSYS, "ANSYS Fluent Theory Guide," Release 2023 R1 Documentation. ANSYS Inc., 2023.

[11] X. Yang, T. Xi, Y. Qin, H. Zhang and Y. Wang, "Computational Fluid Dynamics–Discrete Phase Method," *MDPI,* no. https://doi.org/10.3390/app14093856, p. 3856, 2024.

[12] S. Elmisaoui, S. Benjelloun , R. Boukharfane, L. Khamar, S. Elmisaoui and M. Khamar, "In Silico CFD Investigation of the Granulation Hydrodynamics in Rotating Drum: Process Sensitivity to the Operating Parameters and Drag Models," *MDPI,* no. https://doi.org/10.3390/pr10101939, p. 1939, 2022.

[13] J. Ferzinger and M. Periç, Computational Methods for Fluid Dynamics (4th ed.)., Springer, 2019.