

Capítulo I:

GENERALIDADES

Capítulo I: GENERALIDADES

1.1. Introducción.

En el campo de la ingeniería hidráulica-sanitaria, las plantas potabilizadoras juegan un papel fundamental para garantizar el suministro de agua potable de calidad, segura y sostenible. Uno de los procesos clave dentro de estas plantas es la sedimentación, cuya función es eliminar los sólidos suspendidos mediante la acción de la gravedad, facilitando la clarificación del agua para etapas posteriores de tratamiento (NB 689, 2004).

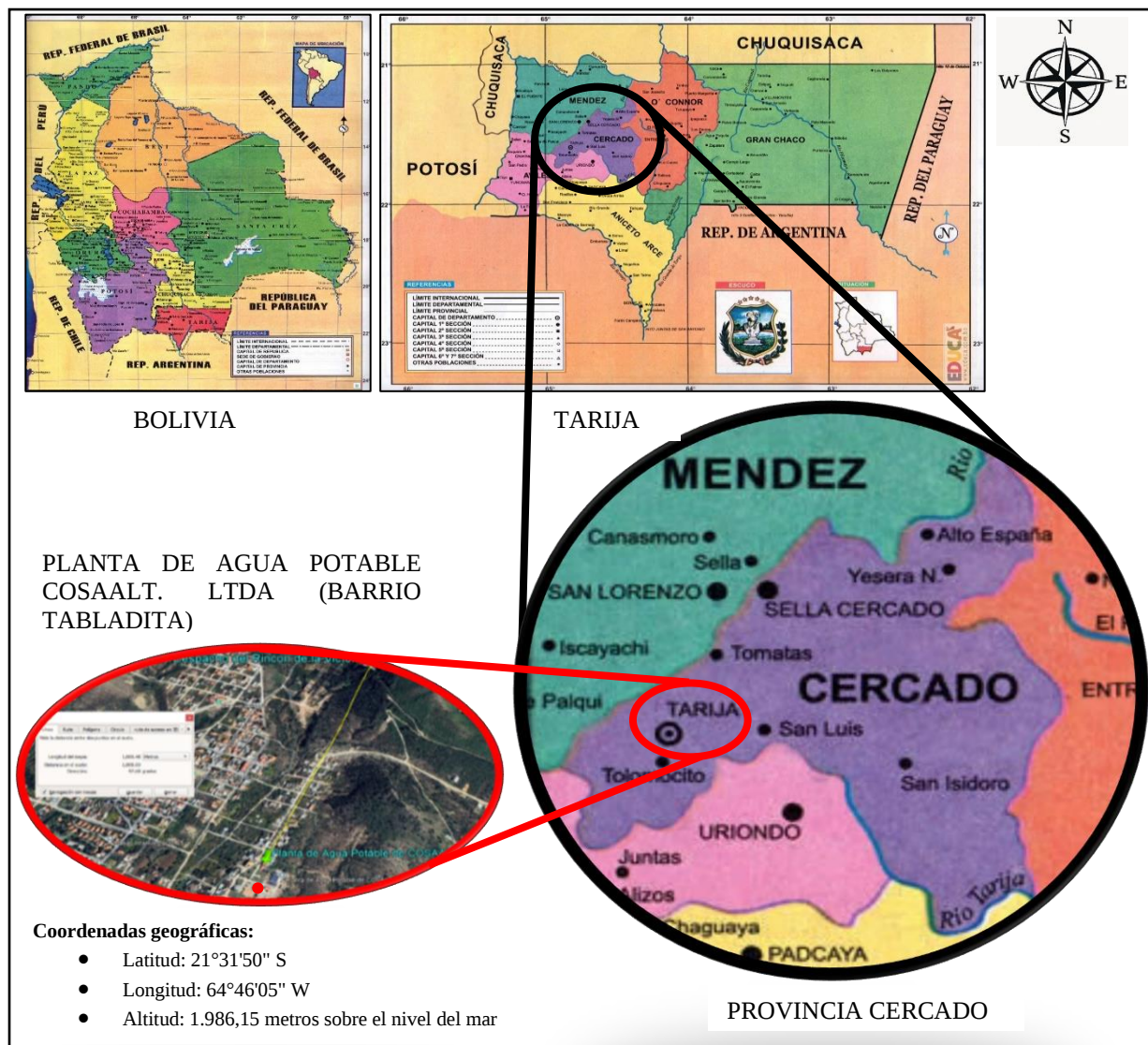


Figura 1. Mapa de Ubicación

Fuente: Elaboración propia con apoyo del Google Earth

La correcta operación de los sedimentadores depende de parámetros hidráulicos fundamentales como la carga superficial, el tiempo de retención hidráulica y la velocidad de sedimentación, que influyen directamente en la eficiencia del proceso y la calidad del agua resultante (Chávez y Maldonado, 2004, p. 35–60).

El presente estudio se centra en el sedimentador de la planta potabilizadora de Tabladita, ubicada en la ciudad de Tarija, donde se ha detectado que en ciertas circunstancias el caudal operativo excede los valores diseñados originalmente, lo que genera incertidumbre respecto al desempeño hidráulico del sedimentador y su capacidad para mantener la calidad requerida del agua potable. Debido a la imposibilidad de realizar mediciones directas sin afectar la operación, se recurre a la simulación mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) para analizar y obtener parámetros hidráulicos precisos (Fernández Oro, 2012, p. 23.).

La dinámica de fluidos computacional ha emergido como una herramienta esencial para el modelado tridimensional del flujo en estructuras hidráulicas complejas, permitiendo evaluar condiciones reales y optimizar el diseño y operación sin intervención física directa (Bombardelli et al., 2010, p. 23.). Este enfoque ha sido aplicado exitosamente en proyectos similares, como el análisis de desarenadores y sedimentadores en plantas de tratamiento, mejorando su rendimiento y contribuyendo a la salud pública al garantizar agua potable de calidad (Molina Céspedes, 2016; Proaño Procél, 2013, p. 24.).

Por tanto, la investigación busca obtener, a través de simulaciones CFD, los parámetros hidráulicos de operación del sedimentador de Tabladita, compararlos con estándares nacionales e internacionales, e identificar posibles mejoras en su diseño hidráulico. Este trabajo aporta conocimiento relevante para la optimización de infraestructuras de tratamiento de agua potable en la región y fortalece la gestión eficiente de los recursos hídricos.

1.2. Antecedentes.

El sedimentador es una unidad fundamental en las plantas potabilizadoras de agua, donde su función principal es eliminar los sólidos suspendidos mediante la acción de la gravedad para facilitar la clarificación del agua antes de su filtración y desinfección (Tratamiento de agua para consumo humano, CEPIS/OPS, 2004). La eficiencia de este proceso depende de parámetros hidráulicos claves como la carga superficial, el tiempo de retención hidráulica y la velocidad de

sedimentación, que influyen directamente en la calidad del agua tratada y en el rendimiento de la planta (IBNORCA, 2004).

La planta potabilizadora de Tabladita, ubicada en la ciudad de Tarija, enfrenta retos relacionados con la variabilidad del caudal que en ocasiones excede los valores de diseño originales, lo que puede afectar negativamente el desempeño hidráulico del sedimentador y la calidad del agua suministrada. La ausencia de mediciones directas y la complejidad hidráulica interna dificultan la evaluación precisa de estos parámetros y limitan la posibilidad de optimizar el diseño y operación (Molina Céspedes, 2016, p. 24.).

En los últimos años, la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) ha emergido como una herramienta poderosa para modelar y simular el comportamiento del flujo dentro de sedimentadores. Mogollón (2018) resaltó la importancia de resolver numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes para analizar flujos turbulentos y multifásicos dentro de estas estructuras, utilizando modelos como el Volumen de Fluido (VOF). Estas simulaciones permiten visualizar y cuantificar patrones de flujo complejos, identificar zonas de recirculación y evaluar el impacto de modificaciones en el diseño sin la necesidad de intervenciones físicas costosas.

El software SOLIDWORKS Flow Simulation (2017) se ha consolidado como una herramienta accesible y eficiente para realizar estos estudios, aplicando el método de Volumen Finito (FVM) para optimizar la configuración hidráulica y mejorar el rendimiento del sedimentador. Además, investigaciones como las de Romero Rojas (2006) y Arboleda Valencia (2000) han descrito las zonas fundamentales del sedimentador y sus componentes, proporcionando un marco teórico sólido para el análisis y diseño de estas estructuras. El presente trabajo aplicó estas metodologías y conocimientos para obtener los parámetros hidráulicos del sedimentador de la planta potabilizadora de Tabladita, con el fin de identificar oportunidades de mejora que contribuyan a la eficiencia del proceso y a la calidad del agua potable suministrada.

1.2.1. Planteamiento del problema.

La planta potabilizadora de agua potable del barrio Tabladita, en Tarija, enfrenta desafíos debido a que en ocasiones opera con caudales superiores a los diseñados inicialmente. Esta situación afecta directamente los parámetros hidráulicos críticos del sedimentador, tales como la velocidad, el tiempo de retención hidráulica y la carga superficial, los cuales no son monitoreados ni

controlados adecuadamente. El aumento del caudal por encima de los valores recomendados puede ocasionar un desempeño ineficiente del sedimentador, comprometiendo la calidad del agua tratada.

Además, la falta de información técnica precisa sobre el comportamiento hidráulico interno del sedimentador dificulta su evaluación y optimización. La imposibilidad de realizar mediciones directas sin interrumpir el servicio limita la obtención de datos confiables para identificar posibles fallas, como zonas de turbulencia, cortocircuitos o acumulación irregular de sólidos.

Esta situación refleja un desconocimiento del comportamiento hidrodinámico interno y una baja aplicación de tecnologías modernas, como la simulación computacional mediante dinámica de fluidos computacional (CFD), que permitirían analizar el flujo en detalle y proponer mejoras en el diseño y operación.

Por tanto, es necesario un análisis exhaustivo basado en simulación CFD para obtener parámetros hidráulicos actualizados que permitan optimizar el sedimentador, mejorar la eficiencia del proceso y garantizar la calidad del agua potable suministrada.

1.2.2. Formulación del problema.

¿Es posible, mediante simulación fluidodinámica computacional (CFD), determinar los parámetros hidráulicos de operación del sedimentador de la planta potabilizadora de Tabladita, evaluando su forma y tamaño, y verificar si cumplen con la normativa boliviana para un funcionamiento eficiente?

1.3. Objetivos.

1.3.1. Objetivo general.

Obtener y analizar los parámetros hidráulicos de operación del sedimentador de la planta potabilizadora de Tabladita mediante simulación fluidodinámica computacional, considerando su forma, dimensiones y condiciones operativas, para identificar oportunidades de mejora en su diseño y funcionamiento.

1.3.2. Objetivos específicos.

- Analizar la información técnica disponible y describir el funcionamiento actual del sedimentador.
- Desarrollar un modelo digital tridimensional del sedimentador utilizando simulación

fluidodinámica computacional (CFD) para replicar los fenómenos hidráulicos internos.

- Simular el comportamiento del flujo en el sedimentador bajo diferentes condiciones de caudal para obtener parámetros hidráulicos clave: carga superficial, tiempo de retención hidráulica y velocidad de sedimentación.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos con los valores recomendados por la normativa y bibliografía especializada.
- Identificar áreas críticas y proponer ajustes en la forma y dimensiones del sedimentador que permitan optimizar su funcionamiento hidráulico.
- Evaluar y validar una propuesta de diseño optimizado, basada en resultados de simulación CFD, para mejorar la eficiencia y la calidad del agua tratada.

1.4. Hipótesis.

La aplicación de la simulación fluidodinámica computacional (CFD) en el sedimentador de la planta potabilizadora de Tabladita permitirá identificar desviaciones en los parámetros hidráulicos de operación, como el tiempo de retención hidráulica (TRH), la velocidad del flujo (V_s) y la carga superficial (CS), respecto a los valores recomendados por la normativa vigente, facilitando la formulación de propuestas de ajuste que optimicen el rendimiento y aseguren un funcionamiento eficiente y seguro, evitando la necesidad de intervenciones físicas costosas.

1.5. Justificación de la investigación.

1.5.1. Justificación técnica.

Este estudio profundiza en el conocimiento de la ingeniería sanitaria e hidráulica aplicando simulación fluidodinámica computacional (CFD) para analizar y optimizar el sedimentador de la planta potabilizadora de Tabladita. La modelación detallada permitirá evaluar parámetros hidráulicos fundamentales como la carga superficial, tiempo de retención hidráulica y velocidad de sedimentación. Esto facilitará ajustes precisos en la forma, tamaño, orientación y configuración hidráulica del sedimentador, previniendo problemas comunes como erosión, sedimentación excesiva y turbulencias que afectan la eficiencia y el mantenimiento del sistema.

1.5.2. Justificación económica.

La optimización del diseño y operación del sedimentador contribuirá a la reducción de costos

asociados con mantenimientos frecuentes, reparaciones estructurales y uso excesivo de productos químicos. Mejorar la eficiencia hidráulica disminuirá gastos operativos y prolongará la vida útil de la infraestructura, generando un ahorro significativo para las entidades responsables de la gestión del agua potable, tanto en el sector público como privado.

1.5.3. Justificación social.

Mejorar el sedimentador impacta positivamente en la salud pública de la población de Tarija al reducir la turbidez y la presencia de microorganismos patógenos en el agua potable. Esto disminuye los riesgos de enfermedades transmitidas por el agua y promueve el acceso equitativo a servicios sanitarios de calidad. Además, contribuye al cumplimiento de normativas nacionales e internacionales, fortaleciendo la confianza de la comunidad en el sistema de abastecimiento y promoviendo la sostenibilidad ambiental.

1.6. Límites y alcances.

1.6.1. Límites.

Esta investigación se centrará en la modelación hidráulica del sedimentador de la planta potabilizadora de Tabladita, utilizando software especializado en dinámica de fluidos computacional (CFD), entre otros. El estudio se limitará a analizar la distribución de velocidades dentro del sedimentador, sin considerar otras variables hidráulicas o químicas. La recolección de datos estará sujeta a limitaciones de tiempo y recursos, que podrían afectar la profundidad del análisis. Además, durante la fase de modelación no se tomarán en cuenta factores externos como la disponibilidad de materiales, recursos económicos o viabilidad administrativa.

1.6.2. Alcances.

El estudio diagnosticará la situación actual del sedimentador, incluyendo caudales operativos, dimensiones y condiciones de mantenimiento. Se construirá un modelo digital tridimensional del sedimentador utilizando simulación CFD. Se realizaron simulaciones hidráulicas para generar gráficos de líneas de flujo y distribución de velocidades, así como mediciones comparativas. Se compararon las velocidades simuladas con las recomendadas por la normativa vigente y se propusieron modificaciones en la forma y dimensiones para optimizar el rendimiento hidráulico. El objetivo final es la mejora del diseño y funcionamiento del sedimentador para asegurar la eficiencia del proceso y la calidad del agua potable suministrada.

Capítulo II:

MARCO

METODOLÓGICO

Capítulo II: MARCO METODOLÓGICO

2.1. Tipo De Investigación.

Esta investigación es un estudio de caso con enfoque mixto, combinando métodos cuantitativos y cualitativos, de carácter descriptivo y aplicado. El componente cuantitativo se basa en la recolección y análisis de datos numéricos, como caudales y velocidades, utilizando simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) para evaluar parámetros hidráulicos. El componente cualitativo se centra en la observación y análisis del comportamiento hidráulico interno del sedimentador. Esta combinación permite una comprensión integral, generando resultados objetivos y replicables que facilitan la formulación de propuestas para mejorar el diseño y operación del sedimentador.

2.2. Procedimientos.

La investigación se desarrolló en siete etapas principales, como se muestra en la figura 2:

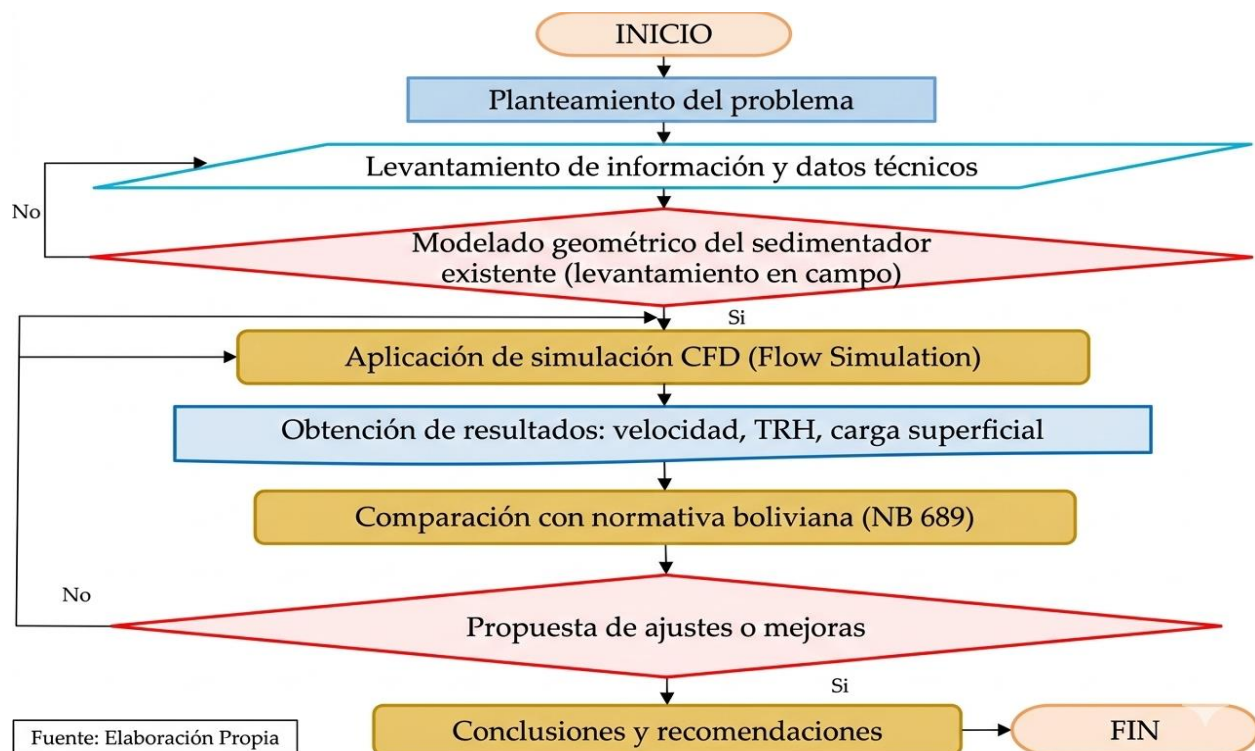


Figura 2. Representación secuencial de los pasos que conforman el desarrollo del proyecto

Fuente: Elaboración propia

2.2.1. Levantamiento de información y datos técnicos.

Se obtuvo datos técnicos precisos y actualizados del sedimentador y la planta para fundamentar el modelado y simulación.

- Se solicitó formalmente a COSAALT:
 - Planos de la planta potabilizadora tal como fue construida.
 - Mediciones de caudal del año 2024.
 - Mediciones de turbiedad en la entrada y salida de la planta durante 2024.
 - Cantidad o dosis de coagulante utilizado en 2024.
- Se recolectó datos en campo mediante visitas técnicas.
- Se realizó entrevistas con operadores y personal técnico.
- Se obtuvo documentación técnica adicional disponible.

2.2.2. Modelado geométrico del sedimentador existente (levantamiento en campo).

Se construyó un modelo 3D fiel al sedimentador existente, garantizando su precisión mediante calibración y validación indirecta.

- Se elaboró el modelo tridimensional del sedimentador usando software CAD.
- Se incorporó detalles estructurales obtenidos en campo.
- Se validó el modelo comparando con datos de turbiedad proporcionados por COSAALT, Se debido a la imposibilidad de mediciones físicas internas.

2.2.3. Aplicación de simulación CFD (Flow Simulation).

Se simuló el comportamiento hidráulico interno del sedimentador bajo diferentes condiciones operativas para evaluar su rendimiento.

- Se configuró el modelo numérico en software especializado.
- Se definió condiciones de frontera y parámetros clave: velocidad, tiempo de retención hidráulica, carga superficial.
- Se ejecutó simulaciones y se relacionó resultados con datos de turbiedad para evaluar

eficiencia.

2.2.4. Obtención de resultados.

Se analizó y se procesó los resultados de las simulaciones para identificar el comportamiento hidráulico del sedimentador.

- Se evaluó distribución de velocidades, tiempo de retención hidráulica y carga superficial.
- Se identificó zonas críticas y patrones de flujo.

2.2.5. Comparación con normativa boliviana (NB 689).

Se determinó la conformidad de los parámetros hidráulicos obtenidos con la normativa vigente para garantizar un funcionamiento adecuado.

- Se comparó resultados simulados con los valores normativos recomendados.
- Se detectó desviaciones y áreas de mejora.

2.2.6. Propuesta de ajustes o mejoras.

Se formuló recomendaciones técnicas basadas en el análisis de resultados para optimizar el diseño y operación del sedimentador.

- Se propuso modificaciones geométricas y operativas que mejoren el rendimiento hidráulico.
- Se preparó documentación para futuras intervenciones.

2.2.7. Conclusiones y recomendaciones.

Se sistematizó los hallazgos y establecer criterios claros para la mejora continua del sedimentador.

- Se resumió resultados relevantes.
- Se presentó conclusiones prácticas y sugerencias para mantenimiento y diseño.

2.2.8. Instrumentos de recolección de datos.

- **Wincha y flexómetro**
 - Uso: Mediciones estructurales y dimensiones accesibles del sedimentador.
 - Precisión: ± 1 mm.

- **Simulación fluidodinámica computacional (CFD) mediante software SolidWorks 2024**
 - Uso: Se obtuvo velocidades y parámetros hidráulicos dentro del sedimentador, dada la imposibilidad de realizar mediciones directas con instrumentos físicos debido a la presencia de placas inclinadas que impiden el uso de molinetes.
 - Aplicación: Modelado geométrico 3D y simulación del comportamiento hidráulico para obtener velocidad, tiempo de retención hidráulica y carga superficial.

Capítulo III:

MARCO TEÓRICO

Capítulo III: MARCO TEÓRICO

3.1. Agua Potable.

El agua potable es aquella que, tras someterse a procesos de tratamiento físico, químico y biológico, cumple con las condiciones de calidad que garantizan su inocuidad para el consumo humano. De acuerdo con la Norma Boliviana NB 512 y la NB 689, el agua potable debe estar libre de microorganismos patógenos, sustancias tóxicas, olores y sabores objetables, presentando características físico-químicas dentro de los límites establecidos por la legislación vigente (NB 689, 2004, p. 30). La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2017) define el agua potable como aquella que no representa ningún riesgo significativo para la salud a lo largo de toda una vida de consumo, incluyendo consideraciones de vulnerabilidad en grupos sensibles de la población. En el contexto boliviano, la provisión de agua potable constituye un componente esencial del derecho humano al agua, reconocido en la Constitución Política del Estado y regulado mediante la aplicación de normas técnicas y sanitarias que aseguren la calidad, continuidad y sostenibilidad del servicio

3.2. Planta Potabilizadora de Agua.

Una planta potabilizadora de agua es un conjunto de estructuras hidráulicas y equipos diseñados para transformar el agua cruda, proveniente de fuentes superficiales o subterráneas, en agua apta para el consumo humano. Según la NB 689, estas instalaciones deben garantizar la eliminación de sólidos suspendidos, microorganismos patógenos y sustancias químicas indeseables, mediante la aplicación de procesos unitarios secuenciales que aseguren el cumplimiento de los parámetros establecidos para el agua potable (NB 689, 2004, p. 80).

Las plantas potabilizadoras se componen de una línea de tratamiento principal, en la que se realizan operaciones físicas, químicas y biológicas orientadas a la clarificación y desinfección del agua. Estas instalaciones incluyen también unidades complementarias de control, almacenamiento, dosificación y monitoreo, las cuales permiten mantener una operación continua y eficiente (OPS, 2004, p. 40). En Bolivia, las plantas potabilizadoras son consideradas infraestructuras estratégicas dentro de los sistemas de abastecimiento urbano y rural, sujetas a las disposiciones técnicas de diseño, operación y mantenimiento descritas en la NB 689.

3.3. Componentes de una Planta Potabilizadora de Agua (según NB 689 y caso Tabladita – COSAALT).

De acuerdo con la NB 689 (2004, p. 84) y las observaciones realizadas en la planta potabilizadora de Tabladita, administrada por COSAALT, los componentes principales de una planta de tratamiento se organizan siguiendo una secuencia hidráulica desde la captación del agua cruda hasta su desinfección final y almacenamiento. A continuación, se describen las unidades más relevantes observadas en la planta.

3.3.1. Desarenador.

El desarenador es la primera unidad de tratamiento, ubicada aguas arriba de la planta potabilizadora, encargada de remover materiales gruesos y partículas sedimentables como arena, grava y limos, que pueden afectar la eficiencia de los procesos posteriores. En la planta potabilizadora de Tabladita, el desarenador se encuentra a varios metros antes del ingreso principal a la planta, funcionando como un canal de baja velocidad que permite la decantación de sólidos gruesos (NB 689, 2004, p. 85). Este proceso protege los equipos y estructuras siguientes, minimizando la abrasión y acumulación de sedimentos en las unidades de floculación y sedimentación.

3.3.2. Cámara de coagulación y mezcla rápida.

La coagulación consiste en la desestabilización de las partículas coloidales presentes en el agua mediante la adición de un coagulante químico, generalmente sulfato de aluminio o cloruro férrico. Según la NB 689 (2004, p. 107), este proceso debe garantizar una mezcla rápida y homogénea del coagulante, para formar microflóculos susceptibles de agregarse en la etapa posterior. En la planta de Tabladita, la cámara de coagulación se ubica inmediatamente después del salto hidráulico que facilita la dispersión del coagulante, permitiendo un contacto efectivo con las partículas suspendidas.

3.3.3. Floculación.

La floculación es el proceso mediante el cual los microflóculos generados en la coagulación se agrupan formando flóculos de mayor tamaño y peso, mediante una agitación lenta y controlada. Este proceso incrementa la eficiencia de la sedimentación posterior (OPS, 2004, p. 46). En la planta potabilizadora de Tabladita, la floculación se realiza mediante canales con deflectores que generan

cambios de dirección en el flujo, asegurando un gradiente de velocidad adecuado para la formación de flóculos estables (NB 689, 2004, p. 110).

3.3.4. Sedimentación.

La sedimentación es el proceso físico mediante el cual las partículas suspendidas y los flóculos formados en la floculación se separan del agua por acción de la gravedad. En esta etapa, el agua clarificada se conduce a las unidades de filtración. La eficiencia de la sedimentación depende del tiempo de retención hidráulico, la carga superficial y la velocidad de sedimentación (NB 689, 2004, p. 371). En la planta potabilizadora de Tabladita, el sedimentador constituye la unidad de estudio principal, donde se aplican análisis hidráulicos y simulaciones CFD para determinar parámetros de operación óptimos.

3.3.5. Filtración.

La filtración consiste en hacer pasar el agua clarificada a través de medios porosos, generalmente conformados por capas de arena y grava, que retienen las partículas más finas no eliminadas en la sedimentación. Según la NB 689 (2004, p. 103), los filtros deben diseñarse considerando tasas de filtración, granulometría y profundidad del medio filtrante para asegurar una remoción eficiente. En la planta de Tabladita, el agua procedente del sedimentador se conduce hacia filtros rápidos descendentes, operados de forma periódica con ciclos de retrolavado para mantener su eficiencia.

3.3.6. Desinfección con cloro y conducción al almacenamiento.

La desinfección es la etapa final del tratamiento, cuyo propósito es eliminar microorganismos patógenos remanentes mediante la aplicación de agentes desinfectantes, principalmente cloro gaseoso o hipoclorito. De acuerdo con la NB 689 (2004, p. 120), la concentración de cloro residual libre en el agua tratada debe mantenerse entre 0,3 y 0,5 mg/L para garantizar su efectividad y prevenir la recontaminación durante la distribución. En la planta potabilizadora de Tabladita, la desinfección se realiza mediante un sistema de dosificación de gas cloro, posterior a la filtración, asegurando una mezcla completa antes de la conducción hacia los tanques de almacenamiento y la red de distribución.

3.3.7. Unidades auxiliares y sistemas de apoyo en la planta potabilizadora de Tabladita.

La planta potabilizadora de Tabladita cuenta además con unidades y sistemas complementarios

que garantizan la operación continua, segura y eficiente de los procesos principales de tratamiento. Estas instalaciones de apoyo cumplen funciones de control, mantenimiento y gestión de residuos, conforme a lo establecido en la NB 689 (2004, p. 121).

a) Medición de caudal y control hidráulico.

El sistema de medición de caudal se realiza mediante canales y vertederos calibrados que permiten controlar el ingreso de agua cruda y la distribución hacia los sedimentadores. Este control hidráulico asegura una operación equilibrada en todas las unidades, evitando sobrecargas y pérdidas de eficiencia (NB 689, 2004, p. 85).

b) Preparación, almacenamiento y dosificación de productos químicos.

La planta dispone de una sala destinada al almacenamiento seguro y la preparación de soluciones de coagulante (sulfato de aluminio), floculante y cloro gaseoso. Las soluciones son dosificadas mediante bombas de caudal controlado, según la calidad del agua de entrada y los criterios de operación definidos por COSAALT (NB 689, 2004, p. 108).

c) Manejo de lodos y aguas de lavado.

Los lodos acumulados en el fondo de los sedimentadores se extraen periódicamente a través de purgas controladas y se conducen hacia una fosa o sistema de espesamiento. De manera similar, las aguas provenientes del retrolavado de filtros son dirigidas hacia estructuras de sedimentación secundaria o disposición controlada (OPS, 2004, p. 47).

d) Sistema de retrolavado de filtros.

El retrolavado se realiza mediante bombeo inverso de agua limpia, permitiendo remover los sólidos retenidos en los medios filtrantes y mantener la eficiencia de los filtros rápidos descendentes. Este proceso se ejecuta de manera programada para cada unidad (NB 689, 2004, p. 114).

e) Monitoreo, control de calidad e instrumentación.

El laboratorio de planta realiza ensayos básicos de turbiedad, pH, cloro residual y alcalinidad, lo que permite ajustar la dosificación de reactivos y verificar la calidad del agua tratada conforme a la NB 512 (2014). Además, se cuenta con equipos de medición de presión y caudal en puntos estratégicos del sistema.

f) Seguridad y operación.

En la sala de cloración se aplican medidas de seguridad ocupacional, tales como ventilación forzada, sistemas de detección de fugas, iluminación de emergencia y uso obligatorio de elementos de protección personal. Estas acciones garantizan condiciones seguras para el personal operativo (NB 689, 2004, p. 122). A continuación, se desarrolla en detalle el proceso de sedimentación, considerado una de las etapas críticas en la potabilización del agua, por su influencia directa en la eficiencia global del sistema y la calidad final del agua tratada

3.4. Sedimentadores.

3.4.1. Características de los Sedimentadores.

Los sedimentadores son estructuras hidráulicas esenciales en las plantas potabilizadoras de agua, diseñadas para la remoción eficiente de partículas sólidas suspendidas mediante sedimentación gravitacional. Su función principal es reducir la turbidez del agua y facilitar su clarificación, preparándola para las etapas siguientes de filtración y desinfección (Chávez y Maldonado, 2004, p. 35). La operación adecuada de los sedimentadores es fundamental para garantizar la calidad del agua potable y optimizar el funcionamiento de todo el sistema de tratamiento, asegurando la salud pública y el bienestar de la población.

Los componentes básicos de un sedimentador incluyen una zona de entrada que distribuye el flujo uniformemente, una cámara de sedimentación donde la velocidad del agua se reduce permitiendo la deposición de partículas, una zona de salida para el agua clarificada y un sistema para la remoción periódica de los sedimentos acumulados (Romero Rojas, 2006, p. 47). Existen diversos tipos de sedimentadores, que varían en diseño y capacidad, adaptados a diferentes condiciones de operación y requerimientos normativos.

El mantenimiento y monitoreo continuo de los sedimentadores son críticos para preservar su eficiencia a lo largo del tiempo. Factores como la variabilidad en los caudales de entrada, las características del agua bruta y el diseño hidráulico influyen en el rendimiento del proceso de sedimentación (IBNORCA, 2004, p. 55). En particular, la distribución de velocidades dentro del sedimentador afecta la eliminación efectiva de sólidos y debe ser cuidadosamente controlada.

La aplicación de herramientas modernas, como la dinámica de fluidos computacional (CFD), ha permitido avances significativos en el análisis y diseño de sedimentadores. Esta tecnología facilita

la simulación tridimensional del flujo hidráulico interno, permitiendo identificar zonas de baja eficiencia, cortocircuitos y acumulaciones irregulares (Mogollón, 2018, p. 14). El uso de software especializado como SOLIDWORKS Flow Simulation contribuye a optimizar la geometría y operación, mejorando la eficiencia y sostenibilidad del proceso (SolidWorks, 2017).

En conclusión, el diseño y operación eficiente de sedimentadores es clave para el éxito de las plantas potabilizadoras, impactando directamente en la calidad del agua suministrada y la salud pública en las comunidades beneficiadas.

3.4.2. Zonas y componentes del sedimentador.

Los **sedimentadores** están conformados por varias zonas específicas, cada una con funciones particulares que facilitan la remoción eficiente de sólidos suspendidos en las plantas potabilizadoras de agua. La correcta comprensión de estas zonas es fundamental para el diseño, operación y mantenimiento adecuado de estos sistemas hidráulicos (Chávez y Maldonado, 2004, p. 45).

La **zona de entrada** es una estructura diseñada para distribuir uniformemente el flujo de agua que ingresa al sedimentador. Su función principal es reducir la velocidad y la turbulencia inicial para favorecer un flujo laminar dentro de la cámara de sedimentación (Romero Rojas, 2006, p. 53). Esta zona puede incluir dispositivos como deflectores o vertederos que ayudan a controlar el flujo y evitar la re-suspensión de partículas.

La **zona de sedimentación** constituye el cuerpo principal del sedimentador, donde ocurre la deposición de las partículas sólidas por acción de la gravedad. Aquí, la velocidad del agua se reduce al mínimo necesario para permitir que las partículas sedimenten sin ser arrastradas, asegurando una alta eficiencia en la clarificación (IBNORCA, 2004, p. 63). El diseño hidráulico de esta zona debe garantizar condiciones óptimas para evitar turbulencias y garantizar un tiempo de retención suficiente.

La **zona de salida** recoge el agua clarificada y la conduce hacia las etapas siguientes del tratamiento, evitando la re-suspensión de sedimentos. Normalmente incluye un vertedero que mantiene un nivel constante y uniforme en el sedimentador (Arboleda Valencia, 2000, p. 77).

Finalmente, la **zona de almacenamiento de lodos** se encarga de acumular los sedimentos removidos del agua. Su capacidad debe ser suficiente para permitir operaciones de limpieza

periódicas sin afectar el funcionamiento continuo del sistema (Romero Rojas, 2006, p. 59).

3.4.3. Clasificación de sedimentadores.

Los sedimentadores se clasifican según diversos criterios, adaptándose a las necesidades específicas de diseño y operación en plantas potabilizadoras. Por el número de unidades, se distinguen: sedimentadores simples, que consisten en una sola unidad; sedimentadores dobles, que operan con dos unidades en paralelo para permitir continuidad durante mantenimientos; y sedimentadores múltiples, que incluyen más de dos unidades para mayor flexibilidad operativa (Romero Rojas, 2006, p. 51).

Por la velocidad de escurrimiento, se clasifican en sedimentadores de baja velocidad (menor a 1 m/s), comúnmente usados en plantas de agua potable, y de alta velocidad (mayor a 1 m/s), empleados en sistemas de riego o centrales hidroeléctricas (IBNORCA, 2004, p. 60).

Según la forma de evacuación de sedimentos, existen sedimentadores de lavado intermitente, donde se remueven los sedimentos periódicamente interrumpiendo el flujo, y de lavado continuo, que permiten la eliminación sin interrupciones (Chávez y Maldonado, 2004, p. 55).

Finalmente, por disposición, pueden ser en serie o en paralelo, dependiendo de si las unidades operan secuencialmente o simultáneamente (Arboleda Valencia, 2000, p. 70).

3.4.4. Criterios generales.

Los sedimentadores se diseñan siguiendo criterios técnicos específicos que aseguran su eficacia en la remoción de partículas suspendidas en el agua potable. Según la Organización Panamericana de la Salud (OPS, 2005), estos dispositivos deben ser capaces de remover partículas con tamaño superior a 0,2 mm y densidad relativa mayor a 2,65; porque partículas más pequeñas generalmente no afectan significativamente los procesos de distribución o tratamiento del agua (Tratamiento de agua para consumo humano, CEPIS/OPS, 2004).

El principio fundamental para el diseño de sedimentadores es la reducción adecuada de la velocidad del flujo, permitiendo que las partículas más pesadas se asienten por acción de la gravedad (Romero Rojas, 2006, p. 50).

3.4.4.1 Velocidad Horizontal.

La velocidad horizontal del flujo debe mantenerse suficientemente baja para favorecer la

sedimentación, pero lo bastante alta para evitar la acumulación de material orgánico que podría deteriorar el proceso.

3.4.4.2 Tiempo de retención hidráulico.

Los criterios de diseño también consideran el tiempo de retención hidráulico, que depende del tamaño y características de las partículas, así como la relación entre longitud y ancho de la cámara, que influye en la eficiencia y distribución del flujo. La profundidad y el volumen de almacenamiento de sedimentos son igualmente importantes para garantizar la capacidad operativa y la facilidad de mantenimiento (IBNORCA, 2004, p. 60).

Además, es esencial incorporar sistemas de limpieza periódica para la remoción eficiente de los sedimentos acumulados, evitando interrupciones en la operación y manteniendo la eficiencia a lo largo del tiempo (Arboleda Valencia, 2000, p. 75).

Estos criterios permiten diseñar sedimentadores que alcanzan eficiencias superiores al 90% en la remoción de partículas mayores a 0,2 mm, asegurando la calidad del agua potable y la sostenibilidad del sistema de tratamiento.

3.4.5. Consideraciones para el diseño.

El diseño efectivo de un sedimentador requiere la consideración de múltiples factores hidráulicos y operativos para garantizar su eficiencia y durabilidad. Entre los aspectos fundamentales se incluye la característica del agua cruda, que abarca el caudal de diseño, la distribución y tamaño de las partículas a sedimentar, así como la variación estacional de estos parámetros (Tratamiento de agua para consumo humano, CEPIS/OPS, 2004).

La velocidad de sedimentación depende del tamaño y densidad de las partículas, calculada mediante fórmulas como las de Stokes o Allen, que permiten estimar el tiempo necesario para que las partículas se asienten correctamente (Romero Rojas, 2006, p. 55). Es crucial que el tiempo de retención hidráulica sea suficiente para completar el proceso de sedimentación, típicamente entre 20 segundos y 3 minutos, variando según las características del agua y la aplicación específica.

La velocidad horizontal del flujo debe mantenerse por debajo del rango crítico (entre 0,1 y 0,4 m/s) para evitar la re-suspensión de partículas sedimentadas y favorecer una deposición uniforme (IBNORCA, 2004, p. 62). La relación longitud/anchura del sedimentador también influye en la

eficiencia, con valores típicos entre 4:1 y 20:1. Otros factores incluyen el diseño de dispositivos de entrada y salida para minimizar turbulencias, la pendiente del fondo para facilitar la limpieza (entre 2% y 6%), y la capacidad de almacenamiento de lodos suficiente para evitar interferencias entre ciclos de limpieza (Arboleda Valencia, 2000, p. 80).

3.4.6. Diseño del sedimentador.

Los sedimentadores son componentes clave en las plantas potabilizadoras, cuya función es eliminar partículas sólidas suspendidas mediante sedimentación gravitacional, garantizando la reducción de la turbidez y la calidad del agua potable (NB 689, 2004, p. 371). Su diseño debe asegurar un flujo uniforme y tiempo de retención adecuado para optimizar la remoción de sólidos, respetando criterios normativos nacionales.

Según el Reglamento Técnico NB 689, el diseño hidráulico de sedimentadores debe considerar parámetros como el tiempo de retención hidráulico (TRH), la carga superficial y la distribución del flujo, para evitar cortocircuitos y zonas muertas que afecten la eficiencia del proceso (NB 689, 2004, p. 424-425). Se recomienda aplicar herramientas computacionales como la dinámica de fluidos computacional (CFD) para validar y mejorar el diseño, facilitando la simulación tridimensional de velocidades y patrones de flujo internos, lo que permite detectar problemas de operación y proponer ajustes geométricos (NB 689, 2004, p. 361).

Además, el diseño debe considerar aspectos técnicos, económicos y sociales para garantizar la sostenibilidad y operatividad del sistema. Esto incluye la capacidad nominal acorde al caudal máximo diario estimado, considerando un período de diseño que normalmente varía entre 15 y 30 años, ajustado a las condiciones locales y demandas futuras (NB 689, 2004, p. 377).

Para mantener la eficiencia del sedimentador, es imprescindible un programa continuo de operación, mantenimiento y monitoreo, que permita evaluar la sedimentabilidad del agua y ajustar parámetros operativos (NB 689, 2004, p. 375). La correcta selección de procesos unitarios, como coagulación y floculación previas al sedimentador, también impacta directamente en su desempeño (NB 689, 2004, p. 372). En conclusión, el diseño y operación eficiente del sedimentador, alineados con la normativa boliviana NB 689 y soportados en análisis técnicos y simulaciones CFD, son fundamentales para garantizar un tratamiento adecuado, asegurando la calidad del agua potable y protección de la salud pública.

3.4.7. Parámetros Hidráulicos Críticos en Sedimentadores de Alta Tasa (Lamelares): Criterios de Diseño y Comparativa Teórica.

El diseño y la evaluación de la eficiencia de los sedimentadores de alta tasa, como los lamelares, se fundamentan en la correcta aplicación de parámetros hidráulicos que aseguren un régimen de flujo laminar y una uniformidad de distribución de caudal. La modelación fluidodinámica computacional (CFD) se utiliza precisamente para contrastar el comportamiento del flujo real con los valores teóricos adoptados, identificando desviaciones que comprometen la clarificación.

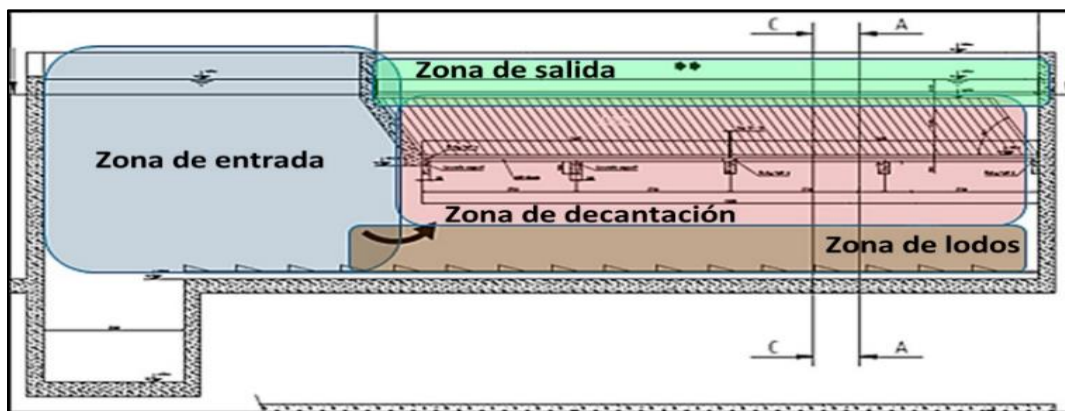


Figura 3. Zonas operativas típicas de un sedimentador

Fuente: Instituto del Agua, sitio web, institutodelagua.es, dedicado a brindar información y análisis exhaustivos sobre una variedad de temas críticos relacionados con el agua.

3.4.7.1 Carga Superficial (CS o V_o): El Parámetro Fundamental.

La Carga Superficial (CS), también conocida como Velocidad de Desborde o Velocidad de Sedimentación Teórica (V_o), es el parámetro determinante en el dimensionamiento de un sedimentador. Representa la velocidad mínima que debe tener una partícula para ser completamente removida en la unidad. Se define como la relación entre el caudal de diseño (Q) y el área superficial efectiva de sedimentación (A): La ecuación general se expresa mediante la Ec. (1).

$$CS = V_o = \frac{Q}{A} \dots \dots \dots Ec. (1)$$

Donde:

- A = área superficial efectiva del sedimentador (m^2)

- Q = caudal de operación (m³/s)

La principal ventaja de los sedimentadores lamelares es que, mediante la colocación de placas o módulos inclinados, se aumenta drásticamente el área superficial efectiva de asentamiento sin incrementar la huella de la estructura, permitiendo operar con Cargas Superficiales mucho más elevadas que las unidades convencionales (CEPIS/OPS, 1973; Arboleda, 1987, p. 2).

La siguiente tabla presenta una comparativa de los rangos de Carga Superficial adoptados por la normativa boliviana (NB 689) y otras guías técnicas internacionales de referencia, crucial para establecer el marco teórico de la presente investigación:

Tabla 1. Valores recomendados de Carga Superficial (CS o Vo) según el tipo de tratamiento

Tipo de Sedimentador	Flujo	Criterio (Fuente)	Rango Recomendado	Unidades	Observación
Lamelares de Alta Tasa	Vertical / Oblicuo	NB 689 (Norma Boliviana)	60 a 120	m ³ / (m ² x d)	Rango normativo boliviano para diseño de alta tasa, reconociendo la eficiencia de las lamelas.
Decantadores de Placas	Vertical / Oblicuo	OPS/CEPIS (Decantadores Laminares)	50 a 120	m ³ / (m ² x d)	Confirma la viabilidad de altas tasas en el contexto latinoamericano
Convencional	Horizontal	Criterio General	30 a 60	m ³ / (m ² x d)	Usado como referencia para unidades de flujo lento.
Tecnología Simplificada	Horizontal	CONAGUA (Libro 24)	40 a 60	m ³ / (m ² x d)	Rango conservador, útil para establecer el límite ideal de baja velocidad.

Fuente: Elaboración propia, con base en CEPIS/OPS (2005), CEPIS (1981), Fair et al. (1968) y Rivas Mijares (1978).

Implicación Teórica: La adopción de una Carga Superficial de diseño debe estar dentro del rango recomendado por la NB 689 (60 a 120 m³/ (m² x d)). No obstante, al comparar el diseño con referencias más conservadoras (CS ≤ 60 m³/ (m² x d)), se tiene una base sólida para proponer mejoras que conduzcan a una mayor eficiencia y estabilidad, aún si el valor actual cumple con la norma local.

3.4.7.2 Tiempo de Retención Hidráulico (TRH).

El Tiempo de Retención Hidráulico (TRH), definido como el cociente entre el volumen de la unidad (V) y el caudal de diseño (Q), representa el tiempo teórico que tarda una masa de agua en atravesar el sedimentador. La ecuación general se expresa mediante la Ec. (2).

$$TRH = \frac{V}{Q} \dots \dots \dots Ec. (2)$$

Donde:

- V = volumen útil del sedimentador (m³)
- Q = caudal de operación (m³/s)

En los sedimentadores de alta tasa, el TRH se reduce significativamente en comparación con las unidades convencionales (donde es típicamente de 2 a 4 horas). Los valores referenciales se encuentran entre 0,5 a 2,0 horas para unidades lamelares (OPS, 2005, p. 46). La NB 689, en sus criterios de diseño general de unidades de alta tasa, enfatiza que el control se realiza primariamente por la Carga Superficial (NB 689, 2004, p. 372).

- **Principio de Análisis:** El TRH teórico es constante para un caudal de diseño y un volumen fijo. No obstante, en la realidad, la velocidad de flujo horizontal observada en el modelo CFD es la que, al variar drásticamente debido a las ineficiencias hidráulicas, demuestra la existencia de cortocircuitos (donde el tiempo real de retención es menor que el TRH teórico) y zonas muertas (donde el tiempo de retención es excesivamente largo).

3.4.7.3 Velocidad de Flujo Horizontal y Vertical: Criterios de Estabilidad.

La velocidad de flujo es el parámetro más crítico y detallado en la modelación, pues describe el comportamiento dinámico del fluido.

A. Velocidad de Flujo Horizontal (V_h)

La velocidad de flujo horizontal (V_h) es la velocidad promedio con que el agua se desplaza a lo largo de la unidad. Su control es vital, ya que velocidades elevadas inducen turbulencia que interfiere con la sedimentación (Fair et al., 1968, p. 251).

- **Principio de Flujo Pistón:** El criterio teórico ideal establece que la velocidad de flujo horizontal debe ser constante y mínima en toda el área (longitudinal, transversal y vertical) para asegurar un régimen de flujo pistón (o desplazamiento ideal), que garantiza la máxima eficiencia.
- **Régimen Laminar Requerido:** El diseño de la zona de clarificación dentro de las lamelas debe asegurar un flujo laminar para permitir que la partícula se asiente. La velocidad horizontal (V_h) debe ser extremadamente baja, comparable a la velocidad de desborde (V_o).
 - **Límite Crítico de Arrastre:** La velocidad en la zona de lodos y en la entrada a la zona de sedimentación no debe superar la velocidad crítica de arrastre (V_a), que típicamente se encuentra alrededor de 0,3 a 0,4 m/min (equivalente a 0,005 a 0,007 m/s) (Rivas-Mijares, 1978; OPS, 2005, p. 48). Velocidades superiores a este rango, especialmente en la capa inferior de las lamelas, provocan la resuspensión de las partículas ya sedimentadas.

B. Velocidad de Flujo Vertical (V_v) y Sedimentación

- **Rol de V_v :** La velocidad vertical se refiere al componente del flujo perpendicular al plano de la lámina (ascendente o descendente). En los sedimentadores lamelares, el flujo es prevalentemente ascendente a través de los canales.
- **Velocidad de Sedimentación (V_s):** Esta es la velocidad de asentamiento de la partícula sólida. El éxito del sedimentador se logra cuando la Velocidad de Sedimentación (V_s) es mayor que la velocidad de flujo vertical ascendente (V_v) del agua en el canal lamelar (OPS, 2005, p. 47).
- **Análisis CFD:** Aunque el software no analiza la velocidad de la partícula (V_s), el análisis del CFD se enfoca en que los vectores de velocidad (líneas de corriente) en la zona de lamelas sean uniformes y estables con un bajo componente horizontal,

asegurando que no se generen fuerzas de arrastre o turbulencia que impidan el asentamiento.

Tabla 2. Parámetros de referencia para diseño de sedimentación

Tipo de sedimentador	Carga Superficial (m³/m²/d)	Tiempo de retención hidráulico (h)	Velocidad de flujo (cm/s)
Flujo horizontal	15 – 30	2 – 4	< 1
Flujo vertical	20 – 30 (máx 60)	2 – 4	< 1
Manto de lodos	30 – 120	1,0 – 1,5	2,15 – 5

Fuente: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, RAS 2017

3.5. Dinámica de fluido computacional.

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es una disciplina que utiliza ordenadores y métodos numéricos para resolver problemas relacionados con el movimiento de fluidos y fenómenos asociados, tales como transferencia de calor o reacciones químicas. Esta área integra matemáticas, programación, física e ingeniería con el objetivo de desarrollar software capaz de resolver ecuaciones complejas que describen las leyes fundamentales del flujo (Fernández Oro, 2012 p. 23.). Para modelar matemáticamente el movimiento de los fluidos, se utilizan ecuaciones diferenciales parciales que representan las leyes físicas, las cuales son complejas y requieren discretización para obtener soluciones aplicables. Entre las técnicas más comunes para esta discretización se encuentran los métodos de diferencias finitas (FDM), elementos finitos (FEM) y volúmenes finitos (FVM). La precisión de los resultados depende en gran medida de la sofisticación de las herramientas computacionales y del método de discretización elegido.

En el presente estudio, la CFD se aplica específicamente para modelar el comportamiento hidráulico dentro del sedimentador de la planta potabilizadora de Tabladita. A través de la simulación tridimensional con software especializado, se analizan variables como la velocidad del flujo, el tiempo de retención hidráulico y la carga superficial. Estos resultados permiten evaluar la eficiencia del sedimentador bajo diferentes condiciones operativas, identificar zonas problemáticas

y proponer mejoras en su diseño hidráulico. De esta manera, se combina la teoría general de la CFD con un enfoque práctico y original adaptado al contexto local.

3.5.1. Ecuaciones de la dinámica de fluidos computacional.

La dinámica de fluidos computacional se enfoca en la resolución de ecuaciones matemáticas que describen el comportamiento de los fluidos y otros fenómenos físicos asociados. Entre estas, las ecuaciones de Navier-Stokes son fundamentales para modelar el movimiento de fluidos. Aulestia Alarcón (2017) señala que estas ecuaciones son particularmente útiles para flujos incompresibles, donde se considera la densidad constante. En tales casos, si las propiedades del fluido no varían, la ecuación de la energía puede tratarse de forma independiente a las ecuaciones de continuidad y momento (p. 24).

La Dinámica de Fluidos Computacional o CFD (del inglés *Computational Fluid Dynamics*) es el área de conocimiento que trata sobre la simulación numérica de flujos fluidos, transferencia de calor y fenómenos relacionados tales como reacciones químicas, combustión, aeroacústica etc. El CFD tuvo origen a partir de la combinación de dos disciplinas: mecánica de los fluidos y cálculo numérico. Las ecuaciones que rigen el flujo fluido tienen origen en la mecánica de los fluidos y pueden ser resueltas por medio de diferentes métodos numéricos.

La principal ecuación resuelta vía Fluidodinámica Computacional es la ecuación de transporte de la variable de interés, representada por el símbolo Φ (ver Ec. 3).

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV}_{\text{Tiempo}} + \underbrace{\oint_A \rho \phi \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A}}_{\text{Advección}} = \underbrace{\oint_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\mathbf{A}}_{\text{Difusión}} + \underbrace{\int_V S_\phi dV}_{\text{Fuente}} \dots \dots \dots \text{Ec. (3)}$$

Todas las ecuaciones de conservación resueltas en Dinámica de Fluidos Computacional poseen la forma anterior, con cuatro términos: el término de tiempo, el término advectivo, el término difusivo y el término fuente. Para representar diferentes ecuaciones de conservación se alteran sólo tres componentes de la ecuación: la variable Φ , el coeficiente de difusión Γ , y la fuente S .

Por ejemplo, para la **ecuación de conservación de masa** (o continuidad), la variable Φ es igual a 1, el coeficiente de difusión y la fuente son nulos. A pesar de la fórmula ser ampliamente utilizada para aplicaciones CFD, se puede afirmar que hasta el momento no existe solución analítica de la

ecuación arriba. De esa forma, es necesario resolverla por medio de algún método de discretización. (ESSS, 2016).

3.5.1.1 Ecuación de Navier – Stokes.

La ecuación de Navier-Stokes, un componente fundamental en la mecánica de fluidos, se define como una ecuación diferencial parcial que modeliza el comportamiento de fluidos incompresibles. Esta ecuación representa una evolución significativa de la ecuación desarrollada inicialmente por Leonhard Euler en el siglo XVIII para describir el movimiento de fluidos sin fricción.

En 1821, el ingeniero francés Claude-Louis Navier dio un paso adelante al introducir el concepto de viscosidad en la ecuación, lo que permitió una representación más precisa de los fluidos viscosos. Posteriormente, a mediados del siglo XIX, el físico y matemático británico Sir George Gabriel Stokes refinó este trabajo, aunque las soluciones completas solo se lograron para casos simples de flujos bidimensionales (Hosch, 2009).

La ecuación de Navier-Stokes, en su notación contemporánea, se expresa mediante la Ec. (4).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = -\frac{\nabla P}{\rho} \dots \dots \dots Ec. (4)$$

Donde:

- u = velocidad del fluido (vector) ($\frac{m}{s}$)
- P = presión del fluido ($\frac{N}{m^2}$)
- ρ = densidad del fluido ($\frac{kg}{m^3}$)
- ν = viscosidad cinemática ($\frac{m^2}{s}$)
- ∇ = operador laplaciano ($\frac{1}{s \times m}$)

Esta ecuación ha demostrado ser particularmente desafiante en su aplicación a flujos complejos y turbulentos, especialmente en sistemas tridimensionales. A pesar de los avances en métodos de análisis numérico, la obtención de soluciones precisas para flujos con altas velocidades sigue siendo un reto significativo (Hosch, 2009).

La relevancia y complejidad de la ecuación de Navier-Stokes se evidencia en su designación como uno de los Problemas del Milenio por el Clay Mathematics Institute de Cambridge, Massachusetts, en el año 2000. Este reconocimiento subraya la importancia continua de esta ecuación en el campo de la mecánica de fluidos y las matemáticas aplicadas (Hosch, 2009).

3.5.2. Discretización.

Los métodos de discretización más difundidos son el método de las diferencias finitas, el método de los elementos finitos y el método de los volúmenes finitos, siendo este último el más utilizado en Dinámica de Fluidos Computacional. Con esos métodos, se intercambia el dominio continuo por un dominio discreto, donde un conjunto de volúmenes de control es utilizado para representar el dominio original, como puede ser observado en la figura 4.

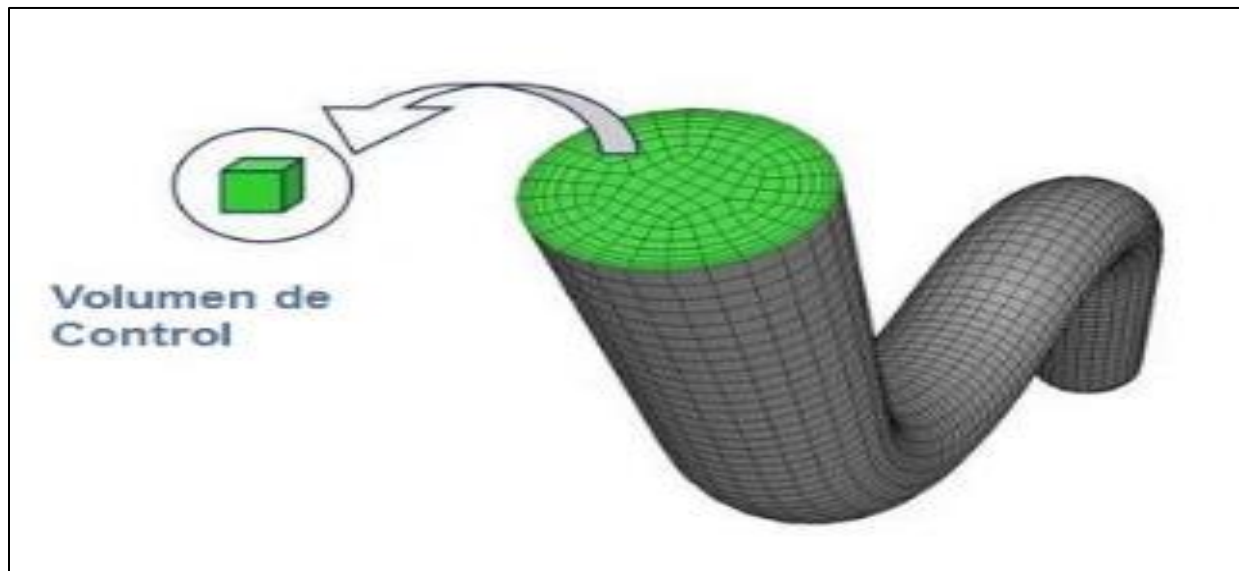


Figura 4. Discretización del dominio en pequeños volúmenes donde se resuelven las ecuaciones algebraicas

Fuente: ESSS, 2016

La forma algebraica de la ecuación presentada anteriormente es resuelta en cada uno de los volúmenes de control, generando un sistema de ecuaciones que debe ser resuelto numéricamente. Esas ecuaciones son resueltas con el apoyo de softwares de Fluidodinámica Computacional, los cuales poseen capacidad para solucionar rápidamente y con precisión los más diversos problemas de CFD. Al final del texto abordamos los principales solvers de Mecánica de Fluidos Computacional presentes en el mercado en la actualidad. (ESSS, 2016)

3.5.2.1 Método de volúmenes finitos.

Osses (2016) señala que las ecuaciones de Navier-Stokes solo han podido resolverse analíticamente para flujos en geometrías simples bajo condiciones ideales. Por esta razón, el uso de métodos numéricos se ha vuelto esencial para abordar flujos reales en geometrías complejas. El autor destaca que el método de volúmenes finitos (FVM, por sus siglas en inglés), introducido en los años 70 por McDonald, MacCormack y Paullay, ha sido tradicionalmente preferido por expertos en mecánica de fluidos. Aunque el método de elementos finitos (FEM) ha experimentado avances significativos en la última década para resolver problemas de mecánica de fluidos, Osses argumenta que el FVM sigue siendo la única opción práctica para problemas complejos que involucran flujos multifásicos, reactivos o altamente turbulentos.

Osses (2016) destaca una característica fundamental del método de volúmenes finitos (FVM): su capacidad para respetar intrínsecamente los principios de conservación (masa, momento y energía) en las ecuaciones discretas que se derivan. Estos principios son esenciales en la modelación matemática de la mecánica del continuo. El autor señala que la aplicabilidad del FVM va más allá de la mecánica de fluidos y describe el proceso general en cinco pasos:

1. Dividir el dominio en volúmenes de control.
2. Formular ecuaciones integrales de conservación para cada volumen.
3. Realizar aproximaciones numéricas de las integrales.
4. Aproximar los valores de las variables en las caras y sus derivadas utilizando la información de las variables nodales.
5. Construir y resolver el sistema algebraico resultante.

Esta descripción detallada proporciona una visión general del método, subrayando su versatilidad y enfoque sistemático para abordar problemas complejos en diversas áreas de la física y la ingeniería.

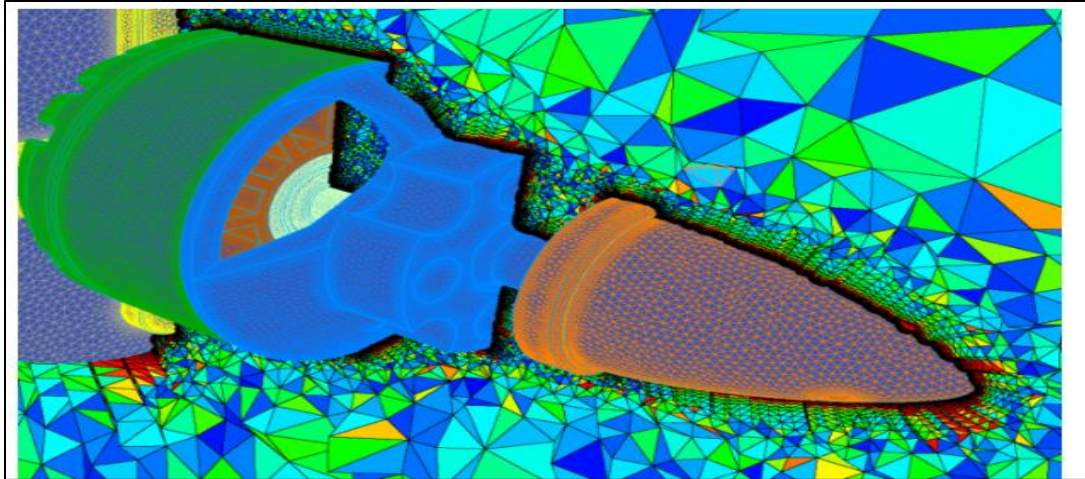


Figura 5. Mallas superficiales coloreada por la razón de aspecto de la celda

Fuente: Osses, 2016.

Osses (2016) proporciona una descripción detallada del método de volúmenes finitos (FVM), destacando su importancia en la resolución de problemas complejos de mecánica de fluidos y otras áreas de la física e ingeniería. El autor explica que el FVM se basa en la división del dominio en pequeños volúmenes de control (VCs), donde las variables se almacenan en nodos definidos por una malla numérica. Estos nodos, según ilustra, pueden ubicarse en los vértices de la malla o en los centros de los volúmenes. Este método, introducido en la década de 1970, se distingue por respetar los principios de conservación (masa, momento y energía) en las ecuaciones discretas derivadas. Osses detalla el proceso del FVM en cinco pasos fundamentales: descomposición del dominio, formulación de ecuaciones integrales de conservación, aproximación numérica de integrales, aproximación de valores en las caras y derivadas, y resolución del sistema algebraico resultante. El proceso implica la aplicación del teorema de la divergencia de Gauss para transformar integrales de volumen en integrales de superficie, seguido de aproximaciones de las integrales volumétricas y superficiales. El autor subraya la importancia de los algoritmos de solución, particularmente en los procesos de inversión de matrices, donde se han desarrollado técnicas para optimizar el uso de recursos computacionales y acelerar la obtención de resultados. Aunque reconoce los avances del método de elementos finitos (FEM) en la última década, Osses sostiene que el FVM sigue siendo la opción preferida para problemas que involucran flujos multifásicos, reactivos o altamente turbulentos.

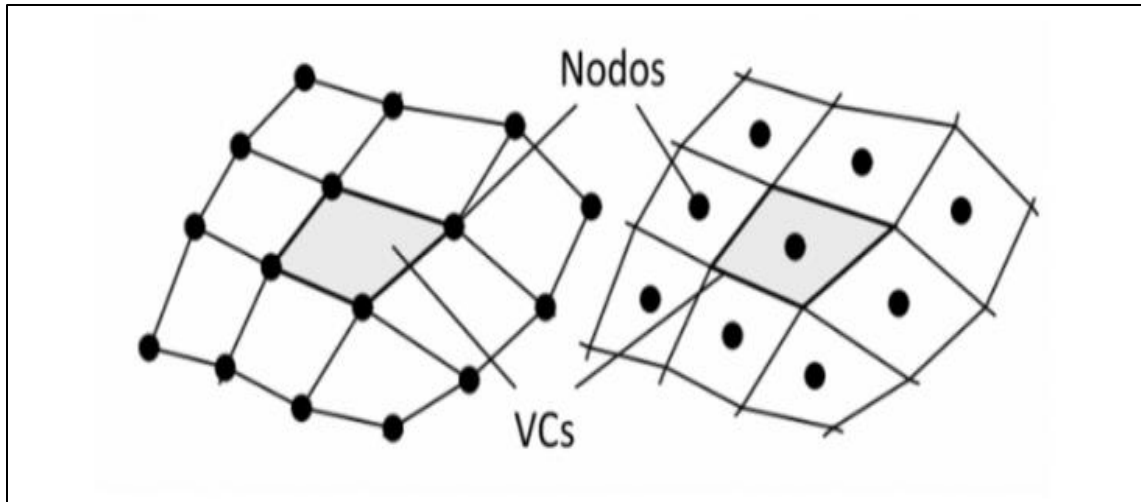


Figura 6. Nodos en los vértices de los VCs (izquierda) y nodos en los centros VCs (derecha) para una grilla cuadrilátera

Fuente: Osses, 2016.

3.5.2.2 Método de elementos finitos.

Mirlisenna (2016) explica que, en el Método de Elementos Finitos, la geometría de la pieza, sujeta a cargas y restricciones, se divide en partes más pequeñas llamadas "elementos", que representan el dominio continuo del problema. Esta subdivisión permite resolver problemas complejos al descomponerlos en problemas más simples, facilitando el procesamiento eficiente por parte de la computadora. El autor señala que el método propone sustituir un número infinito de variables desconocidas por un número limitado de elementos con comportamiento bien definido. Estas divisiones pueden tener diversas formas, como triangular o cuadrangular, dependiendo del tipo y tamaño del problema.

Según Mirlisenna (2016), los elementos finitos están interconectados por puntos denominados nodos o puntos nodales. El conjunto de estos elementos y nodos se conoce como malla. El autor destaca que, debido a esta subdivisión de la geometría, las ecuaciones matemáticas que rigen el comportamiento físico se resuelven de manera aproximada mediante este método numérico. La precisión del Método de Elementos Finitos depende de la cantidad de nodos y elementos, así como del tamaño y tipos de elementos en la malla. Mirlisenna (2016) concluye que cuanto menor sea el tamaño y mayor el número de elementos en una malla, más precisos serán los resultados de los análisis.

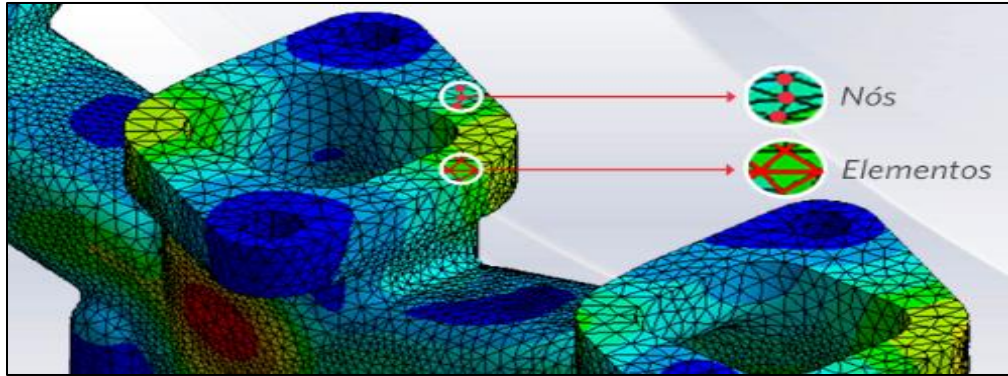


Figura 7. Nodos y elementos de una malla

Fuente: Giuseppe Mirlisenna, 2016.

3.6. Modelación FCD.

La (CFD) es una rama de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para analizar y resolver problemas que involucran flujos de fluidos. Esta técnica ha ganado gran importancia en las últimas décadas debido al aumento en la capacidad de cómputo, permitiendo simulaciones cada vez más complejas y precisas (Fernández de Oro, 2009). El proceso de modelación en CFD típicamente involucra varias etapas:

- **Formulación matemática:** Se parte de las ecuaciones fundamentales que gobiernan el flujo de fluidos, principalmente las ecuaciones de Navier-Stokes, que describen la conservación de masa, momento y energía.
- **Discretización:** El dominio de análisis se divide en pequeñas celdas o elementos, formando una malla. Las ecuaciones diferenciales se transforman en un sistema de ecuaciones algebraicas que pueden ser resueltas numéricamente.
- **Método numérico:** Se aplican técnicas como el Método de Volúmenes Finitos (FVM), que es particularmente adecuado para CFD debido a su capacidad para conservar propiedades físicas importantes.
- **Condiciones de contorno:** Se especifican las condiciones en los límites del dominio, como velocidades, presiones o temperaturas en las fronteras.
- **Solución iterativa:** Se emplean algoritmos iterativos para resolver el sistema de ecuaciones, refinando la solución hasta alcanzar un nivel de convergencia aceptable.
- **Post-procesamiento:** Los resultados se analizan y visualizan para interpretar el

comportamiento del fluido y extraer información relevante.

La CFD permite abordar una amplia gama de fenómenos, incluyendo flujos laminares y turbulentos, transferencia de calor, interacciones fluido-estructura, y reacciones químicas, entre otros. Su aplicación abarca diversos campos como la aerodinámica, hidrodinámica, diseño de turbo maquinaria, ingeniería ambiental y biomédica (Fernández de Oro, 2009).

3.7. CFD aplicada en obras hidráulicas.

La (CFD) ha emergido como una herramienta fundamental en el campo de la ingeniería hidráulica, transformando significativamente el enfoque para el diseño, análisis y optimización de obras hidráulicas. Su capacidad para simular flujos complejos en tres dimensiones ha permitido a los ingenieros obtener una comprensión más profunda de los fenómenos hidráulicos, superando las limitaciones de los métodos tradicionales unidimensionales o bidimensionales (Bombardelli et al., 2011). Algunas de las principales aplicaciones de CFD en obras hidráulicas incluyen:

- **Diseño de presas y vertederos:** La CFD permite evaluar la eficiencia hidráulica de diferentes configuraciones de vertederos, analizar la disipación de energía en cuencos amortiguadores y estudiar los patrones de flujo aguas abajo de la estructura.
- **Análisis de canales y compuertas:** Se utiliza para optimizar el diseño de canales, evaluar la capacidad de descarga de compuertas y analizar fenómenos como la cavitación y la aireación del flujo.
- **Estudio de erosión y sedimentación:** La CFD ayuda a predecir patrones de erosión alrededor de pilares de puentes, en curvas de ríos y en estructuras hidráulicas, así como a analizar el transporte y deposición de sedimentos.
- **Diseño de sistemas de bombeo:** Permite optimizar la geometría de estaciones de bombeo, reducir pérdidas de carga y mejorar la eficiencia energética.
- **Análisis de flujo en tuberías y redes de distribución:** La CFD se utiliza para estudiar fenómenos transitorios, como el golpe de ariete, y para optimizar el diseño de redes de distribución de agua.
- **Modelado de plantas de tratamiento de agua:** Ayuda a optimizar el diseño de tanques de sedimentación, reactores y otros componentes de plantas de tratamiento de agua potable y aguas residuales.

Bombardelli et al. (2011) destacan que la CFD ha demostrado ser particularmente valiosa en el análisis de flujos altamente tridimensionales y turbulentos, como los que se encuentran en estructuras de disipación de energía, donde los métodos tradicionales tienen limitaciones significativas. Además, la CFD permite estudiar escenarios difíciles de reproducir en modelos físicos, como eventos extremos o configuraciones geométricas complejas.

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) ha revolucionado el diseño y análisis de obras hidráulicas en las últimas décadas. Esta herramienta numérica permite simular el comportamiento del flujo de agua en estructuras complejas, proporcionando información detallada sobre patrones de flujo, distribución de velocidades, presiones y otros parámetros hidráulicos críticos (Bombardelli et al., 2011).

3.8. Aplicación de CFD en la ingeniería.

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) ha emergido como una herramienta invaluable en el campo de la ingeniería sanitaria-hidráulica, ofreciendo nuevas perspectivas y soluciones a problemas complejos de flujo de fluidos. Anderson (1995) destaca la versatilidad de la CFD en diversas aplicaciones de ingeniería, y sus principios son particularmente relevantes en el análisis y diseño de sistemas hidráulicos y sanitarios.

En el ámbito del tratamiento de aguas, la CFD permite a los ingenieros sanitarios modelar con precisión los procesos de mezclado y sedimentación en tanques de clarificación. Anderson (1995) enfatiza la capacidad de la CFD para proporcionar una visión detallada de los patrones de flujo dentro de estas estructuras, lo que facilita la optimización de su diseño para mejorar la eficiencia de separación y reducir los costos operativos. Los ingenieros pueden simular diferentes configuraciones de baffles y entradas, evaluando su impacto en la distribución del flujo y la eficiencia del proceso de sedimentación.

En el ámbito de la hidráulica, Chaudhry (2008) señala que los ingenieros emplean CFD para modelar el flujo de agua en canales, tuberías y otros sistemas hídricos. Esta aplicación es crucial para predecir y analizar fenómenos como la erosión y la sedimentación, aspectos fundamentales en el diseño y mantenimiento de infraestructuras hidráulicas. Por ejemplo, en el diseño de canales abiertos, la CFD permite a los ingenieros optimizar la geometría del canal para minimizar la erosión y maximizar la eficiencia del flujo. (Gutierrez Chavarria, D. (2024)

Capítulo IV:

APLICACIÓN PRÁCTICA Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Capítulo IV: APLICACIÓN PRÁCTICA Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN

4.1. Descripción del área de estudio.

4.1.1. Ubicación de la planta potabilizadora de Tabladita.

El sedimentador objeto de este estudio se encuentra ubicado dentro del perímetro de la planta potabilizadora de agua de COSAALT LTDA, situada en el barrio Tabladita, zona urbana de la provincia Cercado, departamento de Tarija. Esta infraestructura forma parte de la línea de tratamiento posterior a las unidades de coagulación y floculación, destinada a la remoción de sólidos suspendidos mediante sedimentación gravitacional, desempeñando un papel fundamental en la clarificación del agua cruda. Su localización geográfica exacta, obtenida mediante la herramienta Google Earth, es la siguiente:

Coordenadas geográficas:

- Latitud: 21°31'50" S
- Longitud: 64°46'05" W
- Altitud: 1.986,15 metros sobre el nivel del mar.



Figura 8. Instalación de la planta de tratamiento Tabladita COSAALT

Fuente: Google Earth

El acceso al sedimentador se realiza a través de las vías internas de la planta, lo que permite un fácil desplazamiento del personal operativo para actividades de control, mantenimiento y monitoreo. La estructura está diseñada para garantizar un flujo controlado, permitiendo la sedimentación eficiente de partículas y facilitando la posterior etapa de filtración.



Figura 9. Acceso al sedimentador

Fuente: Google Earth

4.1.2. Descripción de la Planta Potabilizadora.

La planta potabilizadora de Tabladita, administrada por COSAALT LTDA, fue construida en el año 1990 y constituye la principal instalación de tratamiento de agua potable de la ciudad de Tarija. Su función es transformar el agua captada desde el río La Victoria, perteneciente a la subcuenca del Guadalquivir, en agua apta para el consumo humano, garantizando el cumplimiento de los parámetros establecidos por la Norma Boliviana NB 689 (2004) y la NB 512 (2014).

El proceso de potabilización se desarrolla de manera continua bajo un esquema de flujo horizontal, con una capacidad de diseño de 160 L/s y un caudal promedio operativo que puede alcanzar entre 300 y 340 L/s durante épocas de alta demanda. El tratamiento incluye las etapas de coagulación, floculación, sedimentación, filtración rápida y desinfección con gas cloro.

La disposición general de la planta presenta una secuencia lineal de unidades hidráulicas

interconectadas. El agua ingresa a través de la cámara de mezcla rápida, pasa a los canales de floculación, luego a los sedimentadores y posteriormente a los filtros rápidos descendentes. La cloración se efectúa al final del proceso, antes del almacenamiento y distribución hacia la red urbana. El sedimentador, que constituye la unidad de análisis en este trabajo, se localiza en la parte central de la planta, entre las cámaras de floculación y los filtros. Su diseño corresponde a un sedimentador convencional de flujo horizontal, operando en paralelo con unidades gemelas para asegurar la continuidad del servicio. En la Figura 10 se presenta una vista aérea de la planta donde se identifica la ubicación del sedimentador dentro del conjunto

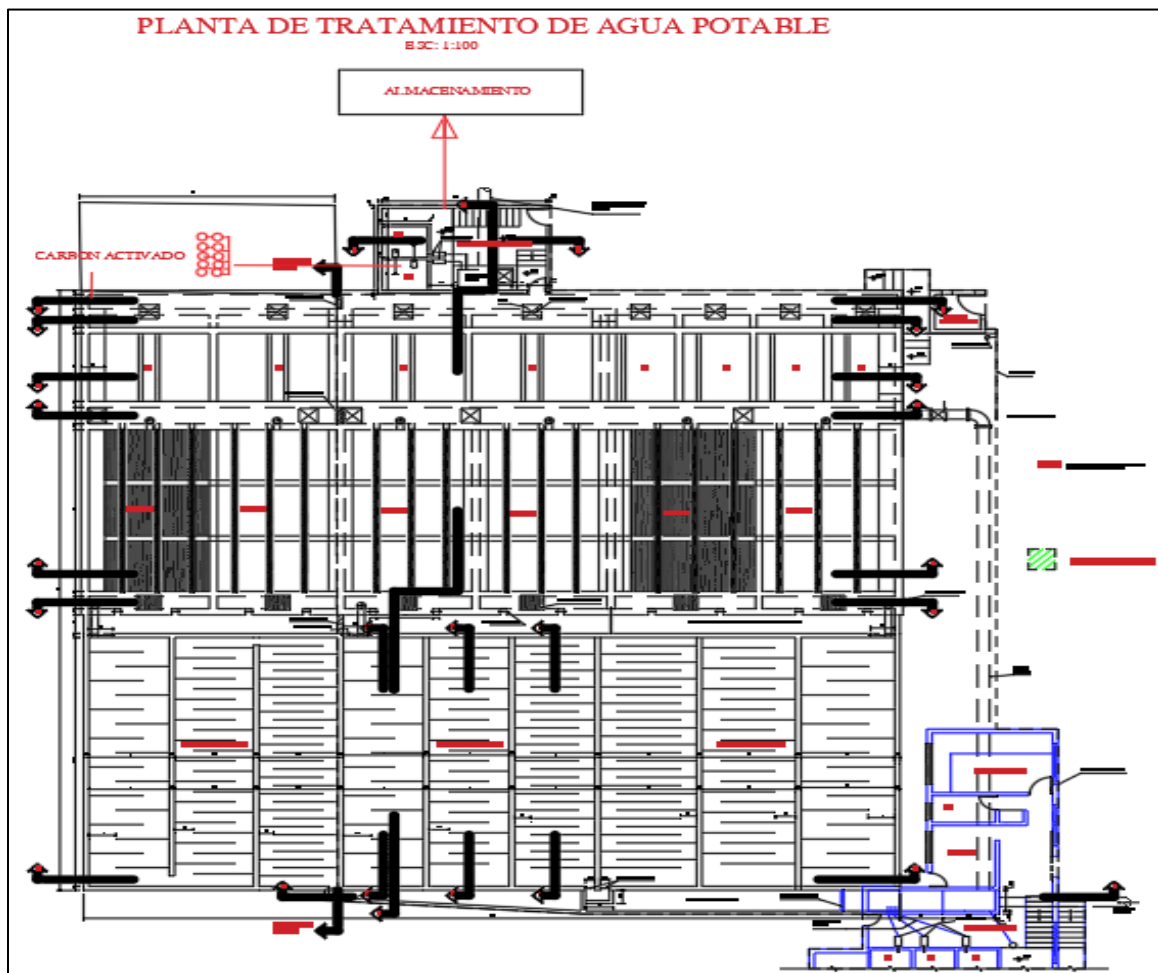


Figura 10. Vista aérea de la planta potabilizadora de Tabladita y localización del sedimentador

Fuente: COSAALT RL. Plano “Detalles Planta de Tratamiento de Agua Potable”. Archivo técnico en formato .dwg, 2025

La Figura 11 muestra el plano general de la planta, en el que se aprecia la disposición y secuencia de las unidades principales del proceso de tratamiento. Dicho plano servirá de referencia para la interpretación de los resultados de la simulación hidráulica en el capítulo siguiente.

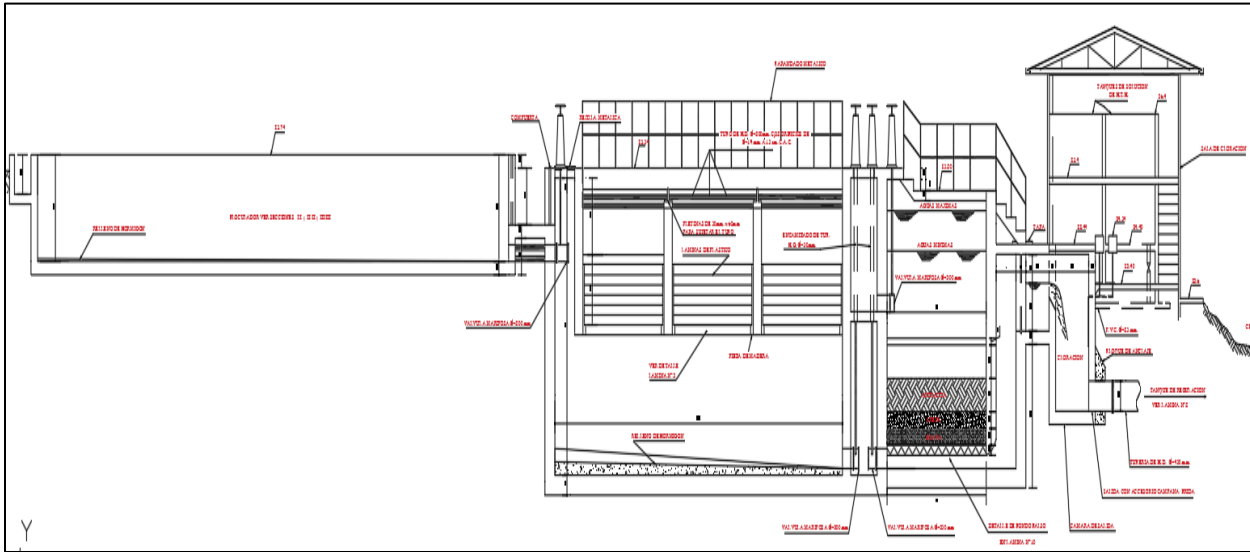


Figura 11. Corte longitudinal de la planta potabilizadora de Tabladita
Fuente: COSAALT RL. Plano “Detalles Planta de Tratamiento de Agua Potable”. Archivo técnico en formato .dwg, 2025

La operación de la planta se apoya en rutinas de mantenimiento programado, que incluyen la purga de lodos en los sedimentadores, el retrolavado periódico de los filtros y el control diario de turbiedad, pH y cloro residual. Estas actividades garantizan la calidad del agua tratada y la sostenibilidad del sistema (NB 689, 2004, p. 120).

Tabla 3. Datos generales de la planta potabilizadora de Tabladita

Parámetro	Descripción
Año de construcción	1990
Administrador	Cooperativa de Servicios de Agua y Alcantarillado de Tarija (COSAALT LTDA)
Fuente de captación	Río La Victoria – Subcuenca del Guadalquivir

Caudal de diseño	160 L/s
Caudal máximo registrado	340 L/s
Tipo de flujo	Horizontal
Tipo de sedimentador	Convencional de flujo horizontal
Tipo de filtración	Filtros rápidos descendentes
Sistema de desinfección	Gas cloro
Ubicación	Zona norte de la ciudad de Tarija

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2.1 Fuentes De Captación Y Naturaleza Del Agua Cruda.

La Planta Potabilizadora de Tabladita, gestionada por COSAALT R.L., opera bajo un esquema de captación que se nutre de múltiples fuentes de agua cruda. Es fundamental destacar esta condición de operación, ya que la naturaleza variable de las fuentes impacta directamente en la calidad del agua de ingreso, siendo el factor principal detrás de la alta fluctuación de turbiedad que la planta debe procesar.

Las principales fuentes de suministro de agua cruda a la planta son:

- El Río La Victoria (o Canal Vitoria/Rincón). Esta fuente es considerada el suministro base de la planta. El caudal de esta fuente es monitoreado de manera constante por el personal operativo.
- La Quebrada de Tipas. Esta fuente opera principalmente de forma estacional o como respaldo en ciertos períodos del año. Las aguas provenientes de Tipas suelen presentar características fisicoquímicas y niveles de turbiedad considerablemente distintos a los del Canal Vitoria/Rincón, especialmente durante épocas de precipitación, donde la turbiedad puede incrementarse de forma abrupta.

Según los registros operativos y la información proporcionada por COSAALT R.L., la capacidad de la Planta de Tabladita para manejar las condiciones hidráulicas y de calidad se ve altamente desafiada por esta dualidad de fuentes. La siguiente tabla resume las características operacionales

y los desafíos asociados a cada fuente, según lo observado en los registros de control (COSAALT R.L., 2024):

Tabla 4. Fuentes de Agua Cruda y su Impacto Operacional en la Planta Potabilizadora Tabladita.

Fuente de Agua Cruda	Condición de Suministro	Impacto Operacional
Río La Victoria (Canal Vitoria / Rincón)	Suministro principal / base.	Proporciona la mayor parte del caudal. Su turbiedad es relativamente más estable, pero varía con las estaciones.
Quebrada de Tipas	Suministro estacional o de respaldo.	Introduce una alta variabilidad. Responsable de los picos extremos de turbiedad (superiores a 1000 NTU) que comprometen la eficiencia de la sedimentación.

Fuente: Elaboración propia en base a registros de control de parámetros de COSAALT R.L. (2024) y referencias operacionales de la planta.

4.1.2.2 Variación Anual De La Turbiedad Del Agua Cruda.

La variación de la turbiedad es crucial, ya que esta condición ambiental es la justificación fundamental para la necesidad de optimizar los parámetros hidráulicos del sedimentador. El diseño y operación de una unidad de sedimentación deben ser capaces de responder eficientemente a las fluctuaciones de calidad del agua cruda.

El análisis de los registros de control de parámetros promedio diarios de la Planta de Tabladita para el año 2024, proporcionados por COSAALT R.L., confirma la existencia de una variación de turbiedad extrema, que oscila desde niveles bajos, característicos de aguas claras de estiaje, hasta picos de turbiedad extremadamente altos asociados a las aguas de la Quebrada de Tipas en periodos de lluvia intensa. Esta variación demanda un proceso de coagulación-floculación altamente flexible y, por extensión, un sedimentador que minimice los cortocircuitos y las zonas muertas, asegurando que las partículas puedan sedimentar incluso en las condiciones más adversas.

La Tabla 5, a continuación, resume los valores extremos de turbiedad cruda registrados durante el periodo de estudio.

Tabla 5. Valores Extremos de la Turbiedad del Agua Cruda en la Planta Potabilizadora Tabladita (2024)

Condición	Fecha	Valor Registrado (NTU)	Fuente de Agua Predominante	Impacto en la Planta
Mínimo Extremo	19 de agosto	0,01	Río La Victoria / Rincón	Operación en condiciones de baja carga de sólidos.
Máximo Extremo	5 de noviembre	6750	Quebrada de Tipas	Alto riesgo de arrastre de flóculo y sobrecarga hidráulica.

Fuente: Elaboración propia en base a registros de control de parámetros de COSAALT R.L. (2024).

La amplitud de esta variación (casi 5000 NTU) constituye el principal desafío de operación de la planta. Para visualizar esta realidad operativa de manera más clara, se presenta la variación mensual de la turbiedad del agua cruda en la Tabla 6, donde se evidencia la estacionalidad y el impacto de las precipitaciones en los picos de concentración de sólidos.

Tabla 6. Variación de la Turbiedad Promedio Mensual del Agua Cruda en la Planta Potabilizadora Tabladita (2024)

Meses	Turbiedad Cruda (NTU)	
	Rincón La Vitoria	Tipas
Enero	0,9	
Febrero	22,25	
Marzo	4,14	
Abril	0,92	
Mayo	0,94	
Junio	0,75	
Julio	0,73	14,1
Agosto	0,58	12,51
Septiembre	0,56	32,47
Octubre	3,24	72,98
Noviembre	26,89	1004,15
Diciembre	5,06	

Fuente: Elaboración propia en base a registros de control de parámetros de COSAALT R.L. (2024).

4.1.2.3 Procedimiento De Medición Y Registro De Caudales De Operación.

Sobre el procedimiento exacto utilizado para la medición de los caudales operativos que ingresan a la Planta Potabilizadora Tabladita, dado que estos valores son cruciales para el análisis hidráulico. Los caudales registrados por COSAALT R.L. (ejemplo 160 L/s, 342 L/s) se determinan a través de un procedimiento que combina la medición directa en estructuras de aforo y el monitoreo de bombeo, diferenciándose de las mediciones empíricas de riego.

El sistema de medición se articula de la siguiente manera, según la fuente de agua:

1. Fuente Río La Victoria (Canal Vitoria/Rincón):

- La medición se realiza en la estructura de aducción (en el desarenador o en el Rincón) mediante una regla graduada instalada en un vertedero o canal de aforo.
- Los operadores leen la altura del tirante de agua (en centímetros) y luego utilizan una tabla de conversión (previamente calibrada) que correlaciona la altura medida con el caudal en L/s. Por ejemplo, una altura de 80 cm puede equivaler a 240 L/s.
- Este método es sistemático, pero requiere calibración periódica para asegurar la precisión.

Figura 12. Regla Graduada para la Medición del Tirante de Agua



Fuente: Proporcionada por la Ing. María Maraz (Operadora de la Planta Tabladita, 2025).

Figura 13. Determinación del Caudal en el Sistema de Aducción (Río La Victoria / Rincón)

CALCULO DE CAUDALES RINCON DE LA VICTORIA

S.T.C.V. = $2.25 b^* (H)^{3/2}$

VIT = $(2.09 + 0.343 * H) * b^* (H)^{3/2}$ SED = $(2.771 - 1.303 * H) * b^* H^{3/2}$

BAZIN = $(1.794 + 0.0133/H) * (1 + 0.55 * (H/(H+Z))^2) * b^* H^{3/2}$

RICON DE LA VICTORIA

Anch.b 0.478 m

Alt. Vert. 0.38 m

SEDIMENTADOR

Anch.b 0.442 m

Alt. Vert 0.40 m

Altura	COSAALT	S.T.C.V	BAZIN	Altura	COSAALT	S.T.C.V.	BAZIN
(cm)	(lt/seg)	(lt/seg)	(lt/seg)	(cm)	(lt/seg)	(lt/seg)	(lt/seg)
50	42.35	44.71	39.05	40	44.62	38.28	33.96
51	47.83	50.41	44.00	41	50.36	43.42	38.54
52	53.53	56.34	49.18	42	56.29	48.78	43.35
53	59.47	62.48	54.58	43	62.40	54.34	48.37
54	65.62	68.83	60.20	44	68.66	60.10	53.61
55	71.98	75.38	66.02	45	75.07	66.05	59.07
56	78.55	82.13	72.06	46	81.62	72.18	64.73
57	85.32	89.07	78.30	47	88.30	78.49	70.59
58	92.29	96.20	84.75	48	95.11	84.98	76.67
59	99.45	103.50	91.39	49	102.03	91.63	82.93
60	106.81	110.98	98.23	50	109.05	98.45	89.40
61	114.36	118.3	105.27	51	116.17	105.43	96.06
62	122.09	126.45	112.51	52	123.38	112.57	102.91
63	130.90	134.44	119.93	53	130.68	119.86	109.95
64	138.00	142.58	127.54	54	138.06	127.31	117.18
65	146.07	150.80	135.34	55	147.51	134.90	124.59
66	154.82	159.35	143.33	56	155.03	142.64	132.19
67	163.44	167.96	151.50	57	160.61	150.52	139.96
68	172.24	176.72	159.85	58	168.25	158.54	147.91
69	181.20	185.63	168.37	59	179.94	166.69	156.03
70	190.34	194.69	177.08	60	183.68	174.98	164.33
71	199.64	203.88	185.96	61	191.47	183.41	172.80
72	209.11	213.22	195.02	62	199.29	191.97	181.43
73	218.74	222.70	204.25	63	207.14	200.65	190.23
74	228.54	232.31	213.65	64	215.03	209.46	199.20
75	238.49	242.05	223.22	65	222.94	218.40	208.33
76	248.61	251.93	232.95	66	230.87	227.46	217.63
77	258.59	261.94	242.85	67	238.82	236.65	227.08
78	269.33	272.08	252.92	68	246.78	245.95	236.69
79	279.92	282.35	263.15	69	254.76	255.37	246.45
80	290.67	292.74	273.51	70	262.74	264.91	256.37
81	301.57	303.26	284.09	71	270.73	274.57	266.44
82	312.63	313.90	294.80	72	278.72	284.34	276.67
83	323.85	324.66	305.67	73	286.70	294.22	287.04
84	335.21	335.54	316.69	74	294.68	304.22	297.56
85	346.73	346.54	327.87	75	302.65	314.33	308.23
86	358.40	357.66	339.20	76	310.61	324.54	319.04
87	370.22	368.90	350.68	77	318.55	334.87	330.00
88	382.19	380.25	362.31	78	326.47	345.30	341.10
89	394.31	391.71	374.09	79	334.37	355.84	352.34
90	406.58	403.29	386.02	80	342.25	366.48	363.72

Fuente: Proporcionada por la Ing. María Maraz (Operadora de la Planta Tabladita, 2025).

2. Fuente Quebrada de Tipas (Bombeo):

- Dado que el agua de Tipas ingresa a la planta mediante bombeo, el caudal se determina con mayor precisión a través de la instrumentación instalada en el equipo de bombeo (un caudalímetro).
- El valor que ingresa a la planta es el que se reporta desde la estación de bombeo.

Importante: La planta nueva de Tabladita está equipada con medidores de caudal modernos (caudalímetros), los cuales proporcionan una lectura digital más precisa. Sin embargo, los operadores han detectado en ocasiones discrepancias entre las lecturas reportadas desde la fuente (Rincón) y las medidas en la planta nueva, sugiriendo una necesidad de revisión o calibración de la instrumentación según el Operador Sr. Naval Sánchez y la Operadora Ing. María Maraz.

El análisis hidráulico y la simulación CFD de este trabajo se basan en los valores de caudal registrados oficialmente por COSAALT R.L., asumiendo que representan las condiciones operativas bajo las cuales se encuentra trabajando actualmente el sedimentador.

4.1.3. Características y condiciones operativas del sedimentador.

El sedimentador objeto de estudio se encuentra dentro de la planta de tratamiento que abastece a la ciudad de Tarija, recibiendo agua cruda desde el canal de aducción proveniente del río La Victoria.

Este canal conduce el caudal captado hasta las unidades de pretratamiento, donde posteriormente ingresa al sedimentador. La instalación está diseñada para operar a un caudal nominal de 160 L/s. Sin embargo, la experiencia operativa ha permitido trabajar de forma estable con caudales superiores, alcanzando hasta 300–340 L/s en situaciones de alta demanda, mediante ajustes empíricos en la operación.

El sitio presenta acceso vial hasta las inmediaciones de la obtenidas mediante georreferenciación en Google Earth, posicionando con precisión la infraestructura. La topografía circundante y las condiciones del canal influyen directamente en la velocidad de ingreso del agua al sedimentador, aspecto clave para la eficiencia del proceso de sedimentación.

4.2. Recolección de datos.

El sedimentador de la planta potabilizadora Tablada cuenta con planos técnicos previos

proporcionados por COSAALT; sin embargo, para este estudio se realizó una verificación y actualización de dimensiones in situ, garantizando la precisión de los datos empleados en el modelado hidráulico y la simulación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

El levantamiento se efectuó empleando flexómetro y wincha, registrando con exactitud dimensiones clave como longitud, ancho, profundidad, inclinación y disposición de las placas lamelares, así como medidas de zonas de entrada, cámaras internas, canales de salida y vertederos. Se documentó además el estado operativo mediante registro fotográfico, identificando aspectos como la distribución de caudales, la condición de tuberías difusoras y el grado de acumulación de sedimentos.

La información obtenida fue contrastada con los planos de COSAALT, elaborando un plano actualizado que refleja la condición real de la infraestructura. Este material fue insumo esencial para la construcción del modelo geométrico y el análisis hidrodinámico.

Adicionalmente, se incluyeron aportes del operador Sr. Naval Sánchez y del operador Sr. Wilfredo Rojas, quienes describieron condiciones habituales y ajustes en la dosificación de coagulantes ante variaciones de caudal y turbidez.

La Ing. María Maraz, de la Planta de Tabladita, suministró registros de caudales y turbiedades del año 2024, fundamentales para la validación del modelo y la evaluación del desempeño del sedimentador.

4.2.1. Mediciones de campo.

Este enfoque metodológico, basado en la verificación y actualización de dimensiones in situ, aseguró que el modelo geométrico y la simulación CFD del sedimentador se fundamentaran en datos precisos.

Las mediciones, realizadas con flexómetro y wincha, incluyeron dimensiones clave y se complementaron con información operativa proporcionada por los operadores Sr. Naval Sánchez y Sr. Wilfredo Rojas, así como registros históricos de caudal y turbidez facilitados por la Técnica Edith Castillo

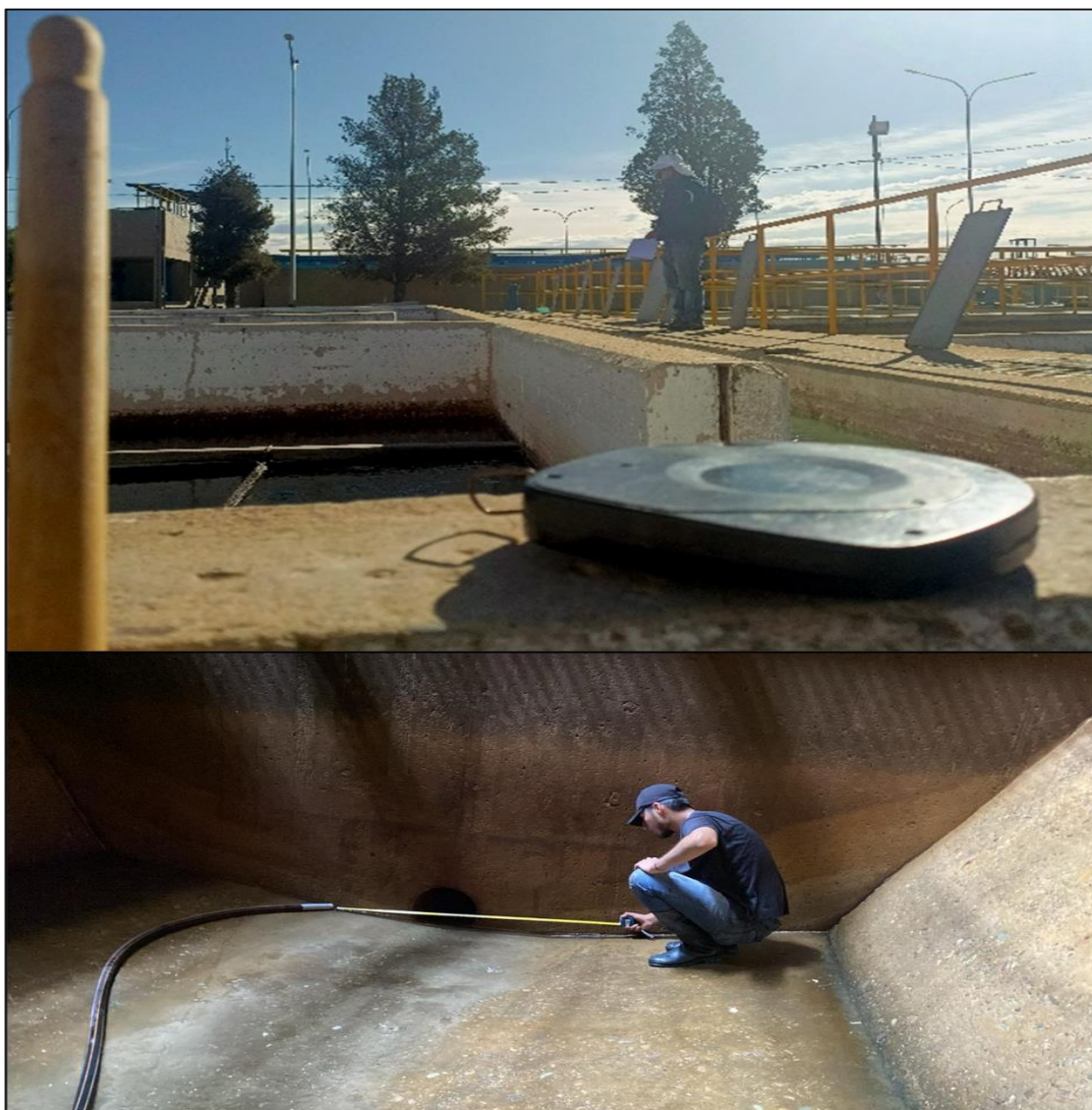


Figura 14. Medición de las dimensiones del sedimentador

Fuente: Elaboración propia

4.3. Simulación y modelado en condiciones actuales.

4.3.1. Elaboración de la geometría.

La elaboración de la geometría se llevó a cabo mediante un proceso meticuloso que combinó el trabajo de campo con técnicas de diseño asistido por computadora. El proceso se desarrolló de la siguiente manera:

- Se utilizó el software de diseño 3D SolidWorks para crear la estructura digital. Este programa fue elegido por su precisión y capacidades avanzadas de modelado tridimensional.
- Utilizando las herramientas de SolidWorks, se construyó la estructura virtual empleando las medidas exactas obtenidas en campo. Esto permitió una representación fidedigna del proyecto en el entorno digital.
- Se realizaron ajustes finos en el modelo digital para asegurar la coherencia y viabilidad del diseño, manteniendo las medidas originales actuales.
- A partir del modelo 3D en SolidWorks, se generaron los planos detallados, incluyendo vistas en planta, alzados, secciones y detalles constructivos según fuera necesario

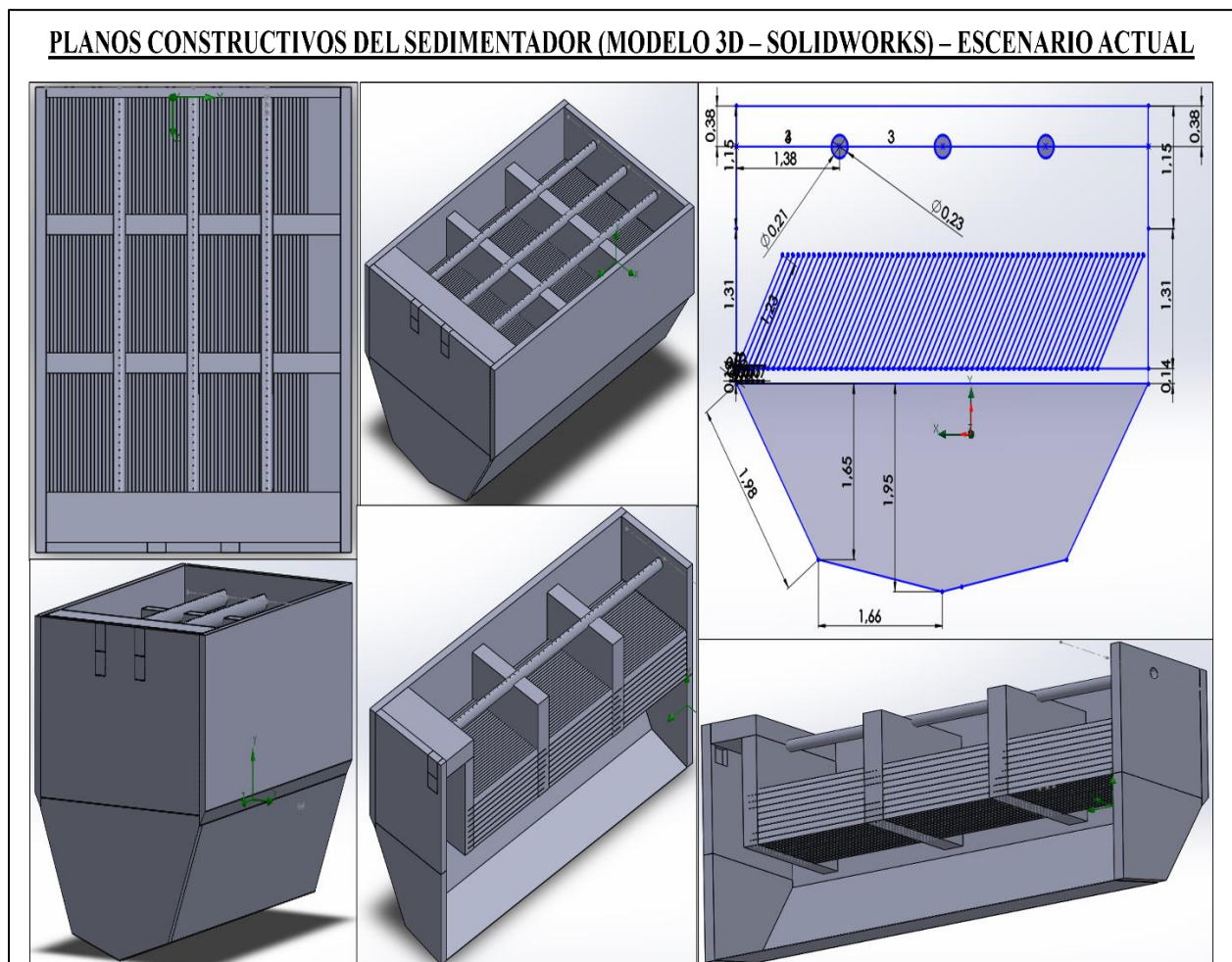


Figura 15. Vista Tridimensional del Sedimentador

Fuente: Elaboración propia

4.3.2. Simulación para un caudal de 160 L/s (caudal de diseño).

La simulación fluidodinámica computacional (CFD) del sedimentador de la planta potabilizadora de Tabladita se realizó para el caudal de diseño de 160 L/s. Para la simulación CFD, se consideró una de las cuatro unidades de sedimentación, asignando un caudal individual equivalente a 40 L/s por sedimentador. El objetivo fue analizar la distribución de velocidades y evaluar el comportamiento hidráulico del flujo bajo condiciones nominales de operación. El modelo numérico permitió obtener los campos de velocidad, presión y temperatura. Sin embargo, las variables de presión y temperatura mostraron variaciones poco significativas para el proceso, por lo que no fueron consideradas en la evaluación técnica (NB 689, 2004).

En las siguientes figuras se presenta las diferentes vistas del modelo CFD, donde se observa la distribución de velocidades. Las zonas de color rojo indican mayores concentraciones de flujo, mientras que las de color azul representan regiones de baja velocidad y asentamiento. Este patrón confirma un flujo predominantemente horizontal, con recirculaciones menores en el fondo del tanque.

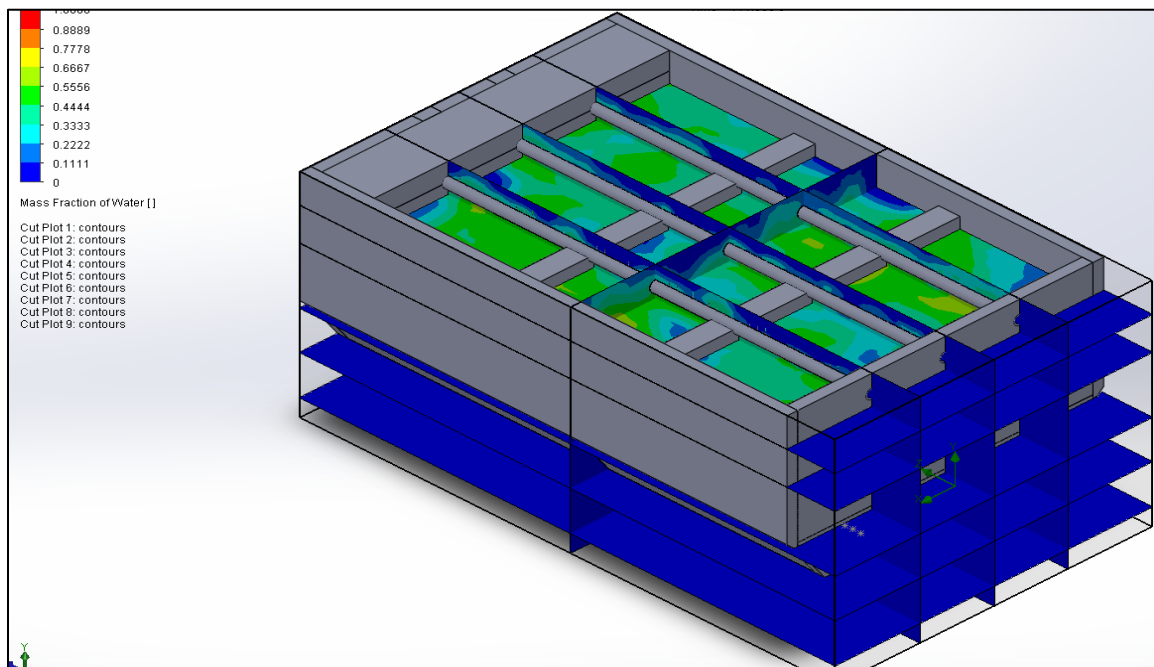


Figura 16. Distribución tridimensional de velocidades en el sedimentador para el caudal de 0,004 m³/s.

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

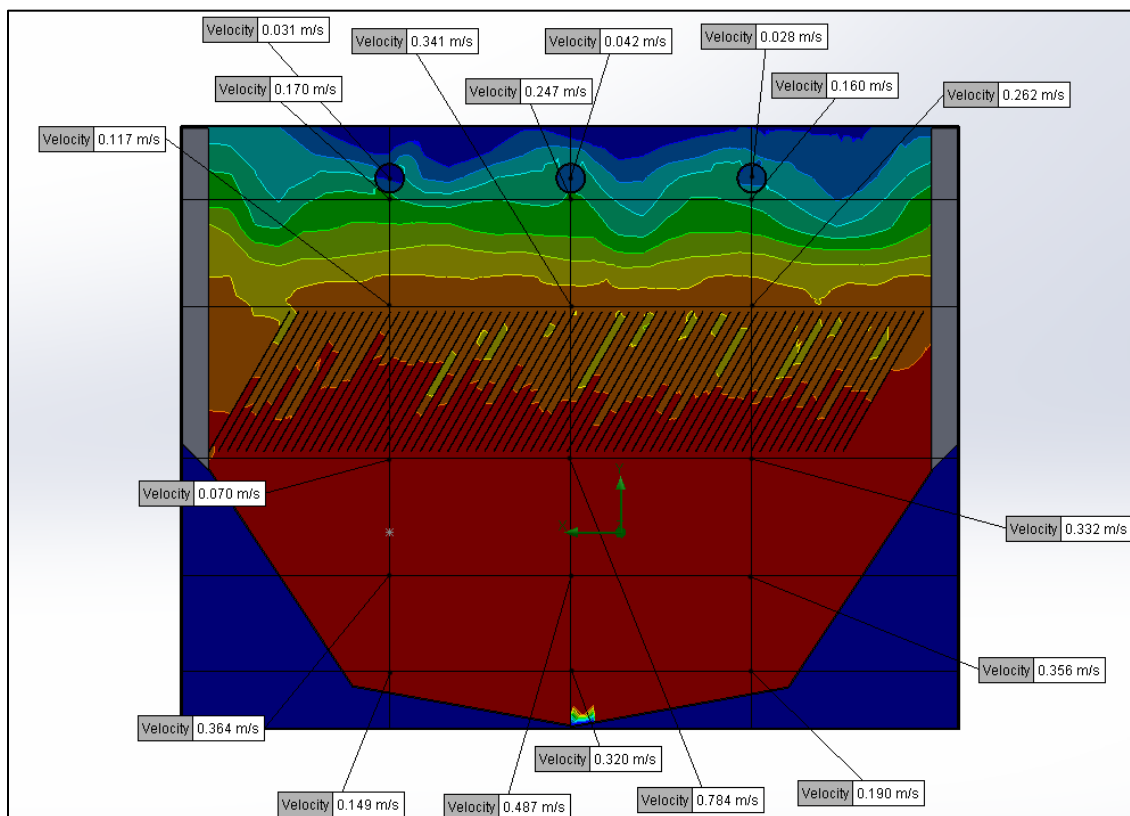
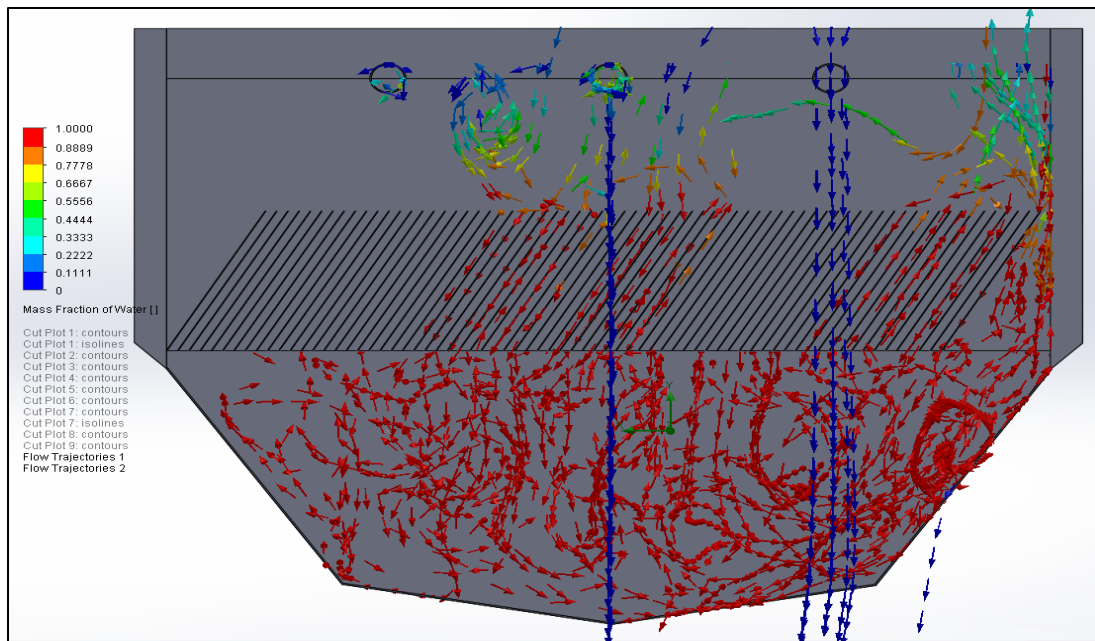


Figura 17. Distribución de velocidades en corte transversal al flujo en el centro del sedimentador.

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Criterios de observación en relacion a la Figura 17, podemos indicar lo siguiente:

1. **Uniformidad de la velocidad:** La velocidad no es uniforme
2. **Variación de la velocidad:** Las velocidades varían desde 0,028 m/s a 0,784 m/s
3. **Ubicación de la velocidad más fuerte:** Antes de las placas lamelares
4. **Ubicación de la velocidad mas lenta:** Por el medio de las tuberías de conducción
5. **Velocidad en puntos clave:** El agua pasa por el sedimentador de abajo hacia arriba, la velocidad de paso por las lamelas en la parte inferior varia en los extremos desde 0,07 m/s - 0,332 m/s y por el centro con 0,784 m/s siendo esta la más fuerte; y por la parte superior varia en los extremos desde 0,117 m/s - 0,262 m/s y por el centro con 0,341 m/s siendo esta la más fuerte también
6. **Comentario general:** Se puede ver que el sentido de flujo del agua, va reduciendo la velocidad, la superficie libre del agua en la parte superior, las lamelas y las conjeturas de la forma de la estructura del sedimentador hace que el flujo pase de manera rápida al ingresar y luego se estabiliza
7. **Análisis de líneas de corriente:** Se observa que el flujo es predominantemente horizontal en la parte inferior del sedimentador y se transforma en vertical a partir de las placas lamelares hacia la parte superior, lo que coincide con el sentido ascendente del agua. Tambien podemos observar movimientos circulares en el agua, tiende a irse por los bordes, hay líneas de flujo que bajan y otras suben
8. **Concordancia con los criterios teóricos:** La teoría establece que en sedimentadores la velocidad del flujo debe mantenerse constante y controlada en toda el área de sedimentación, tanto en sentido horizontal como vertical, con valores recomendados cercanos a 0,01 m/s para garantizar una sedimentación eficiente. Sin embargo, en las gráficas obtenidas se observa que ninguna zona cumple con ese valor, evidenciando variaciones importantes de velocidad. Este comportamiento confirma que, en la práctica, las velocidades son variables y dependen de la geometría del sedimentador, la presencia de las lamelas y el régimen hidráulico del flujo

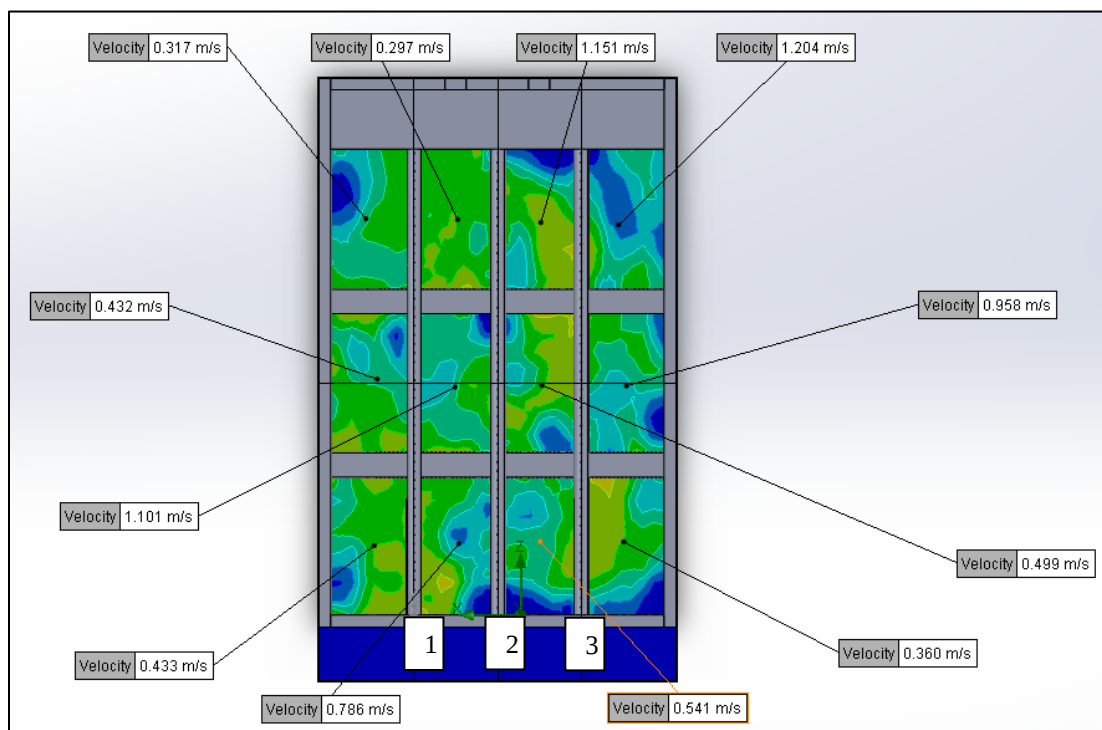
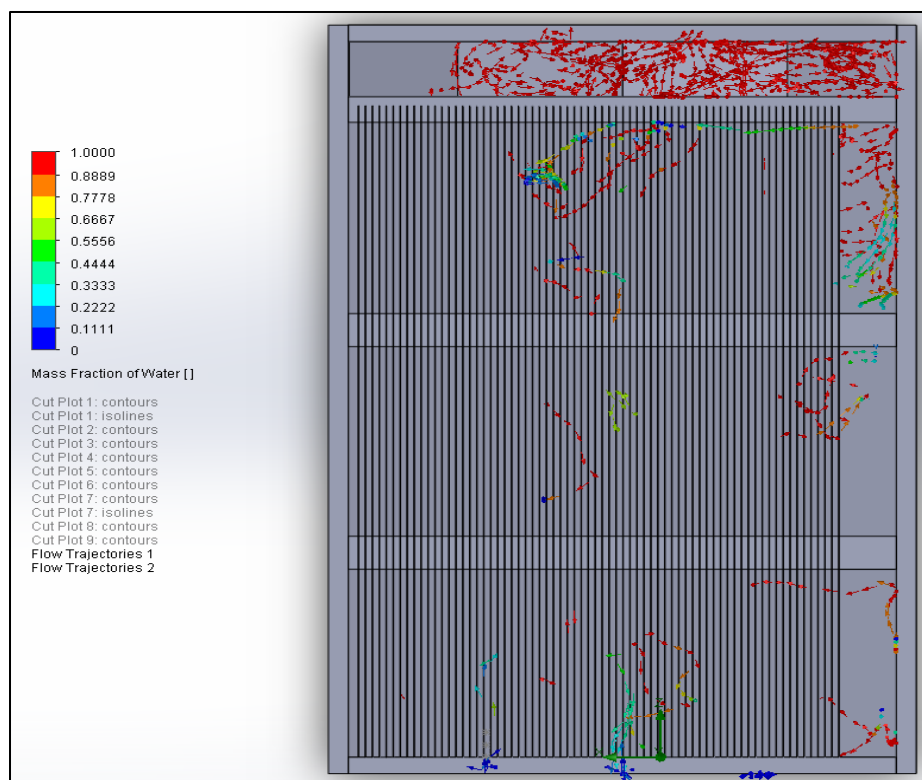
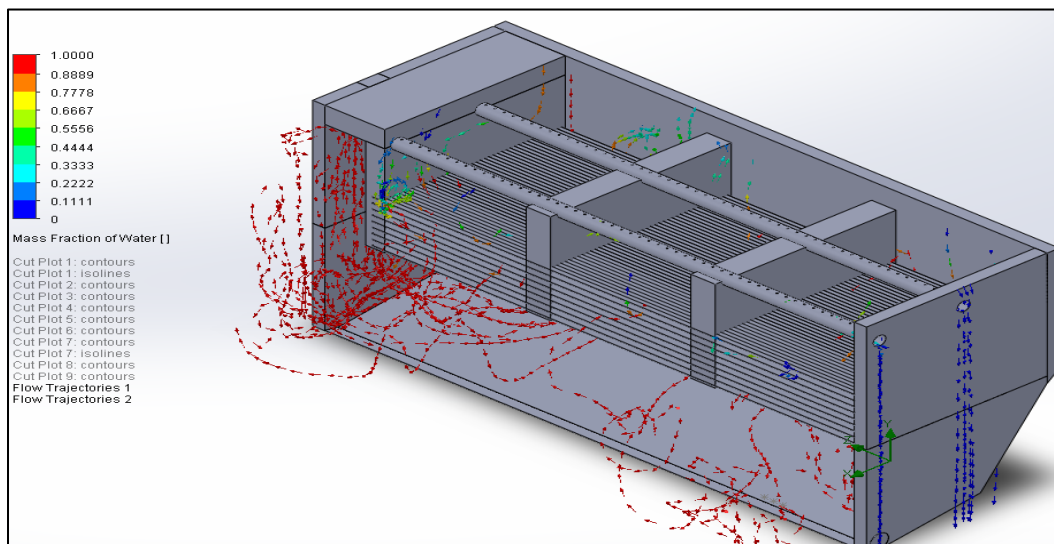


Figura 18. Distribución de velocidades en planta a la altura de las tuberías de entrada.

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Criterios de observación en relacion a la Figura 18, podemos indicar lo siguiente:

1. **Uniformidad de la velocidad:** No uniforme.
2. **Variación de la velocidad:** Entre 0,297 m/s y 1,204 m/s.
3. **Ubicación de la velocidad más fuerte:** En el eje de cada tubería, justo después de la entrada.
4. **Ubicación de la velocidad más lenta:** En los espacios entre tuberías y zonas cercanas a las paredes.
5. **Velocidad en puntos clave:** El promedio de velocidad es de 0,748 m/s en el primer tercio de la longitud (zona de entrada), 0,742 m/s en el tercio central, y 0,530 m/s en el tercio final (zona de salida). Esta notable disminución de velocidad del primer al tercer tercio evidencia una distribución no uniforme del flujo dentro del sedimentador.
6. **Comentario general:** Se concentra el flujo en la zona media; se generan pequeñas recirculaciones laterales.
7. **Análisis de líneas de corriente:** Movimiento horizontal predominante con desvíos hacia el centro; dirección de flujo bien definida.
8. **Concordancia con los criterios teóricos:** Existen valores mayores al ideal teórico; el flujo horizontal presenta gradientes de velocidad que podrían mejorarse con redistribución de entrada.



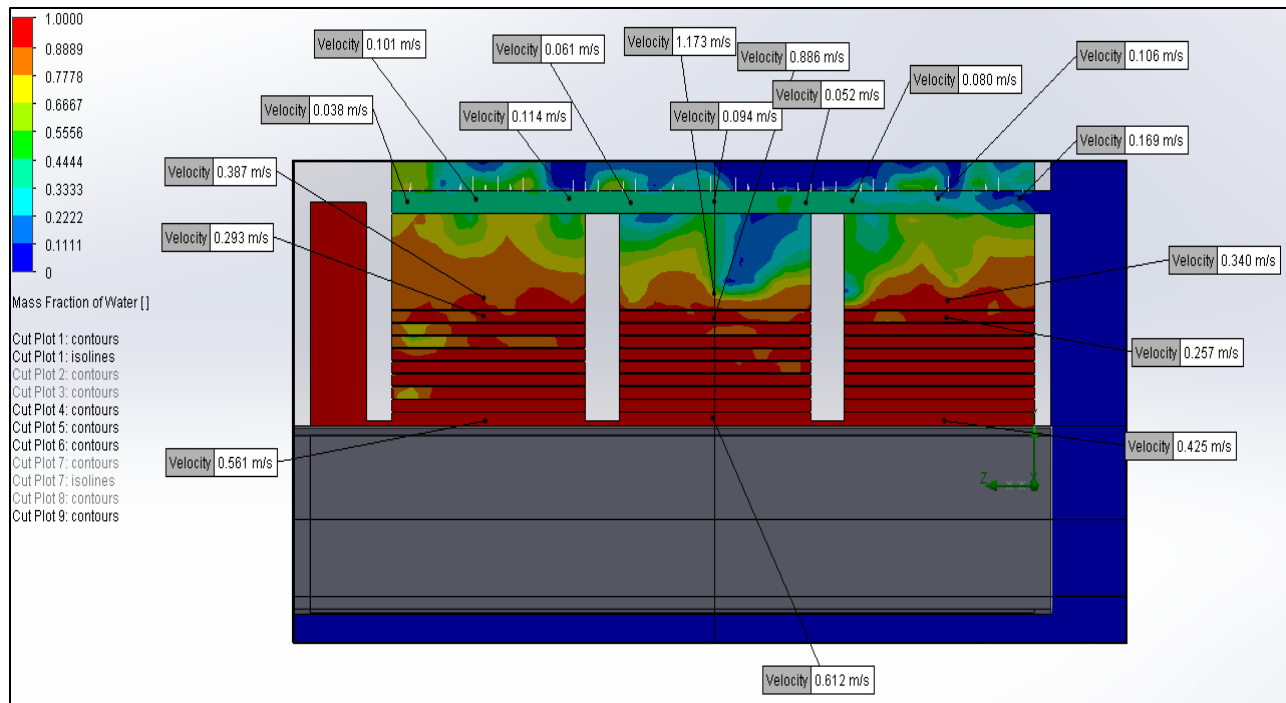


Figura 19. Distribución de velocidades en corte longitudinal por la tubería lateral izquierda (1)

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Criterios de observación en relacion a la Figura 19, podemos indicar lo siguiente:

1. **Uniformidad de la velocidad:** Distribución irregular.
2. **Variación de la velocidad:** Entre 0,038 m/s y 1,173 m/s.
3. **Ubicación de la velocidad más fuerte:** En la parte superior, justo encima de las lamelas (o placas inclinadas).
4. **Ubicación de la velocidad más lenta:** En la parte superior, justo al inicio de la tubería horizontal de conducción.
5. **Velocidad en puntos clave:**
 - Zona de Clarificación (Encima de las Lamelas): La velocidad oscila entre 0,340 m/s y un máximo de 1,173 m/s. Esta alta velocidad máxima, localizada en la sección central superior, es crítica y genera un riesgo de arrastre de flóculos e ineficiencia

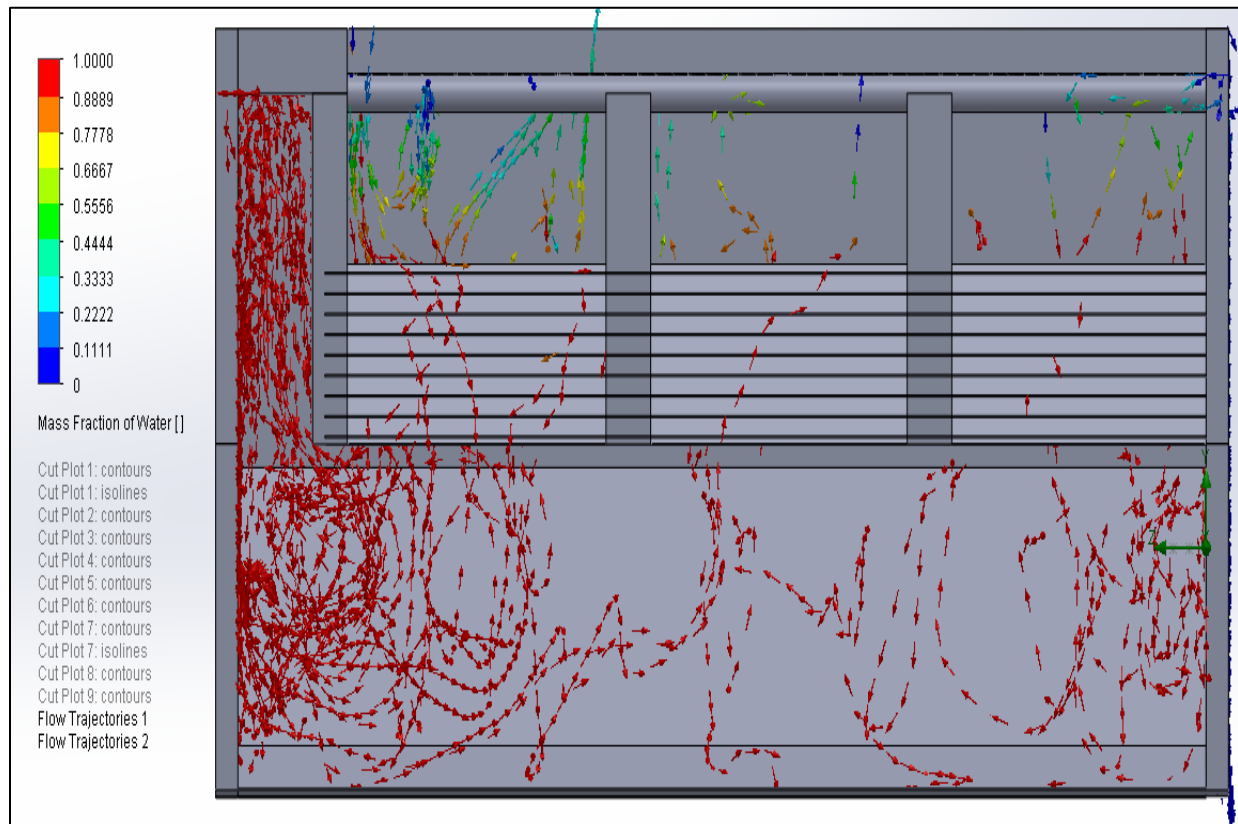
hidráulica.

- Zona de Lamelas (Salida de las Placas): La velocidad de flujo oscila entre 0,257 m/s y 0,886 m/s.
- Zona de Lodos (Debajo de las Lamelas): La velocidad oscila entre 0,425 m/s y 0,612 m/s.

6. **Comentario general:** La energía del flujo disminuye conforme asciende; el comportamiento es con el sentido hidráulico ascendente.

7. **Análisis de líneas de corriente:** Corrientes ascendentes con dirección predominantemente vertical; flujo más recto en la parte central (muy poco, casi nada).

8. **Concordancia con los criterios teóricos:** La disminución de velocidad cumple el principio de reducción progresiva, aunque los valores exceden el límite teórico.



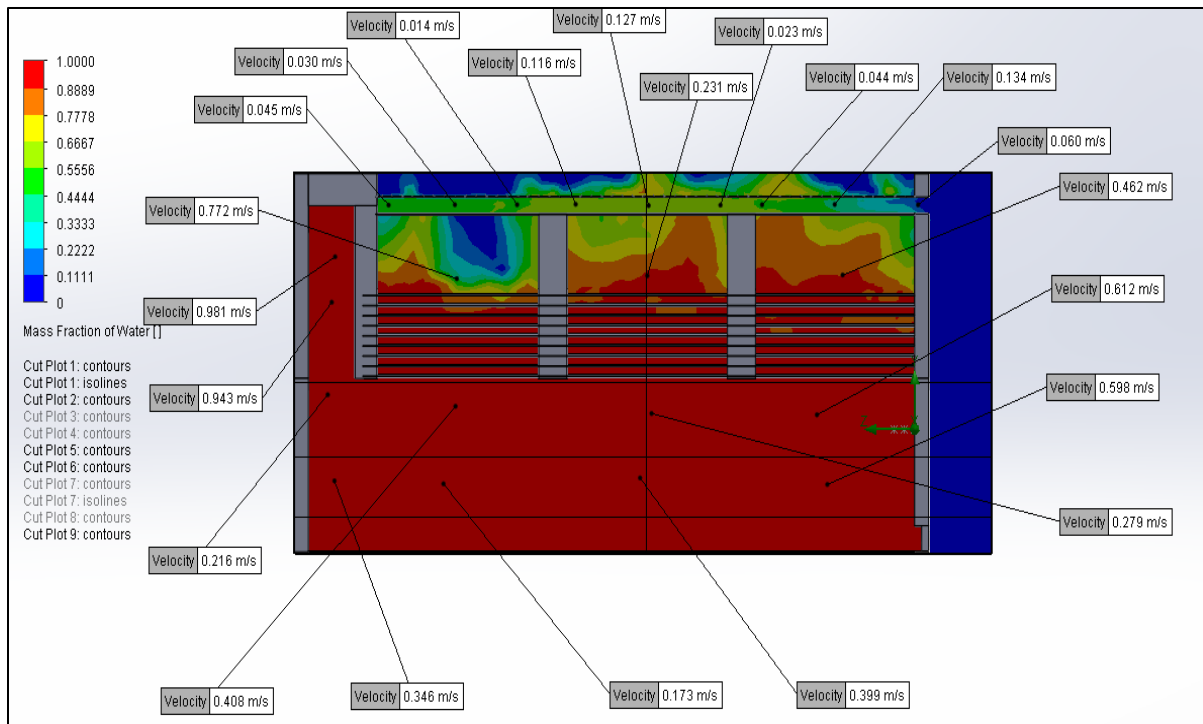


Figura 20. Distribución de velocidades en corte longitudinal por la tubería central (2)

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Criterios de observación en relacion a la Figura 20, podemos indicar lo siguiente:

1. **Uniformidad de la velocidad:** No uniforme, con variaciones a lo largo del eje central.
2. **Variación de la velocidad:** Entre 0,014 m/s y 0,981 m/s.
3. **Ubicación de la velocidad más fuerte:** En la zona de entrada debido al ingreso concentrado del flujo a través de las compuertas.
4. **Ubicación de la velocidad más lenta:** En la parte superior de la zona lamelar, justo al inicio de la tubería horizontal de conducción.
5. **Velocidad en puntos clave:**

Zona de Entrada:

El análisis de la distribución vertical de la velocidad en la Zona de Entrada revela un marcado gradiente de velocidades, indicando una inyección de flujo concentrada en la

superficie y una disipación rápida en profundidad:

Cerca de la Superficie (Junto a la Compuerta): Se registra la velocidad máxima de 0,981 m/s en el punto de impacto directo del chorro de entrada.

Columna Superior de Agua: Inmediatamente debajo, la velocidad se mantiene alta, con un valor de 0,943 m/s.

Bajo Lamelas (Interfase): A la altura de la parte inferior del módulo lamelar, la velocidad ha disminuido drásticamente a 0,216 m/s.

Fondo de la Unidad (Cerca del Piso): En la capa inferior, la velocidad se estabiliza en 0,346 m/s un valor que, aunque menor a la superficie, es significativo en la base del sedimentador

Zona de Decantación:

Zona de Clarificación (Encima de Lamelas): En la sección de recolección de agua clarificada (encima de las lamelas), el flujo horizontal muestra una alta variabilidad:

Cerca de la Entrada: Se registra una velocidad de 0,772 m/s.

Tercio Central: La velocidad es significativamente menor, con 0,231 m/s.

Cerca de la Tubería Colectora (Zona de Recolección): La velocidad asciende a 0,462 m/s en el tramo final.

Zona de Lodos (Debajo de Lamelas): En la zona inferior, donde se acumulan los lodos, las velocidades son:

Cerca de la Entrada: 0,408 m/s.

Tercio Central: La velocidad mínima observada es de 0,279 m/s.

Cerca de la Tolva de Lodos (Salida de Lodos): La velocidad alcanza 0,612 m/s en las proximidades del área de purga

Zona de Lodos:

En la capa de agua inferior, adyacente al fondo de la unidad (interfase agua-lodo), se cuantificó el perfil de velocidad horizontal para evaluar el riesgo de arrastre de sólidos

sedimentados:

Zona de Entrada: Se registra un valor de 0,173 m/s.

Tercio Central: La velocidad intermedia es de 0,399 m/s.

Fondo/Tolva de Lodos: La velocidad máxima en esta capa es de 0,598 m/s, ubicada en la proximidad de la tolva de descarga de lodos.

La tendencia muestra un incremento significativo de la velocidad del flujo hacia el punto de descarga (de 0,173 m/s a 0,598 m/s), lo que indica una aceleración del flujo hacia esa zona y sugiere un alto riesgo de resuspensión de partículas en el fondo del sedimentador

Zona de Salida:

El análisis del perfil de velocidad transversal se realizó en la Zona de Recolección de Agua Clarificada (a lo largo de la tubería colectora que alimenta al proceso de filtración). Las nueve mediciones tomadas desde el lado de entrada hacia la salida final revelan una distribución de flujo no uniforme

Tabla 7. Velocidades de flujo en la Zona de Salida (tubería colectora) del corte longitudinal por la tubería central (2) para Q = 160 L/s.

Ubicación (A lo largo de la Tubería Colectora)	Velocidad (m/s)	Observación
Inicio (Cerca de la Entrada)	0,045	Baja
Punto 2	0,030	Mínima
Punto 3	0,014	Mínima Absoluta
Punto 4	0,116	Rápido incremento
Centro del Sedimentador	0,127	Máxima
Punto 6	0,023	Caída significativa
Punto 7	0,044	Baja
Punto 8	0,134	Máxima de este lado
Final (Antes de la Descarga)	0,060	Estabilización

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

El perfil de velocidades en la recolección exhibe una variación que va desde un mínimo de 0,014 m/s hasta un máximo de 0,134 m/s (cerca del centro). Esta variación no uniforme indica que el agua clarificada no está siendo recolectada de manera homogénea a lo largo del ancho de la unidad, lo que puede deberse a diferencias de carga hidráulica en los orificios de la tubería colectora, afectando la eficiencia de la decantación en toda la superficie

6. **Comentario general:** El flujo presenta una severa no uniformidad hidráulica, caracterizada por una entrada de alta energía concentrada en la superficie 0,981 m/s. Esto genera un marcado cortocircuito hidráulico en las capas superiores del sedimentador. El flujo tiende a acelerarse en la zona central de la unidad (capas de lodos y clarificación), dejando zonas de velocidad extremadamente baja o nula en las esquinas y los extremos, lo que resulta en un subaprovechamiento del volumen efectivo y un alto riesgo de arrastre de flóculos
7. **Análisis de líneas de corriente:** El análisis de las líneas de corriente y la dirección de las flechas (vectores de velocidad) revela la existencia de patrones de flujo altamente ineficientes y turbulentos, lo que confirma los problemas de distribución observados en los puntos anteriores:
 - **Zona de Entrada (Problema de Inyección):** Las líneas de flujo ingresan con un componente vertical descendente predominante, golpeando directamente el fondo de la unidad. Esto provoca la destrucción del gradiente de velocidad y la generación de alta turbulencia en la base del sedimentador.
 - **Fenómeno de Recirculación:** Se observa la formación de grandes vórtices y movimientos circulares inestables a lo largo del fondo del equipo. Estas zonas de recirculación obligan al flujo a volver hacia la entrada y a subir y bajar repetidamente (flechas que marcan hacia abajo), lo que indica una mezcla indeseada y la anulación del flujo horizontal efectivo.
 - **Implicación para la Sedimentación:** La falta de trayectorias horizontales largas y estables demuestra que el flujo no se comporta como el deseado 'flujo pistón'. En lugar de ello, el patrón errático del flujo aumenta el tiempo de residencia de algunas partículas (por el atrapamiento en vórtices) y disminuye drásticamente el de otras

(por el cortocircuito superior), impidiendo una decantación uniforme y eficiente a lo largo de toda la superficie lamelar

8. **Concordancia con los criterios teóricos:** El diseño actual no concuerda con los criterios hidráulicos teóricos para un sedimentador de alta tasa. El objetivo ideal es alcanzar un flujo cercano al 'flujo pistón' con velocidades horizontales uniformes y bajas ($V_h \approx V_o$). Los valores simulados superan drásticamente los límites recomendados en las zonas críticas: La velocidad máxima de 0,981 m/s en la entrada y 0,772 m/s en la clarificación es inaceptable y garantiza la ruptura de flóculos. La velocidad en el fondo de la unidad (0,598 m/s) excede la velocidad crítica de arrastre de lodos. La solución de diseño debe centrarse en la redistribución de energía en la entrada y en la optimización de los sistemas de recolección para lograr la uniformidad requerida.

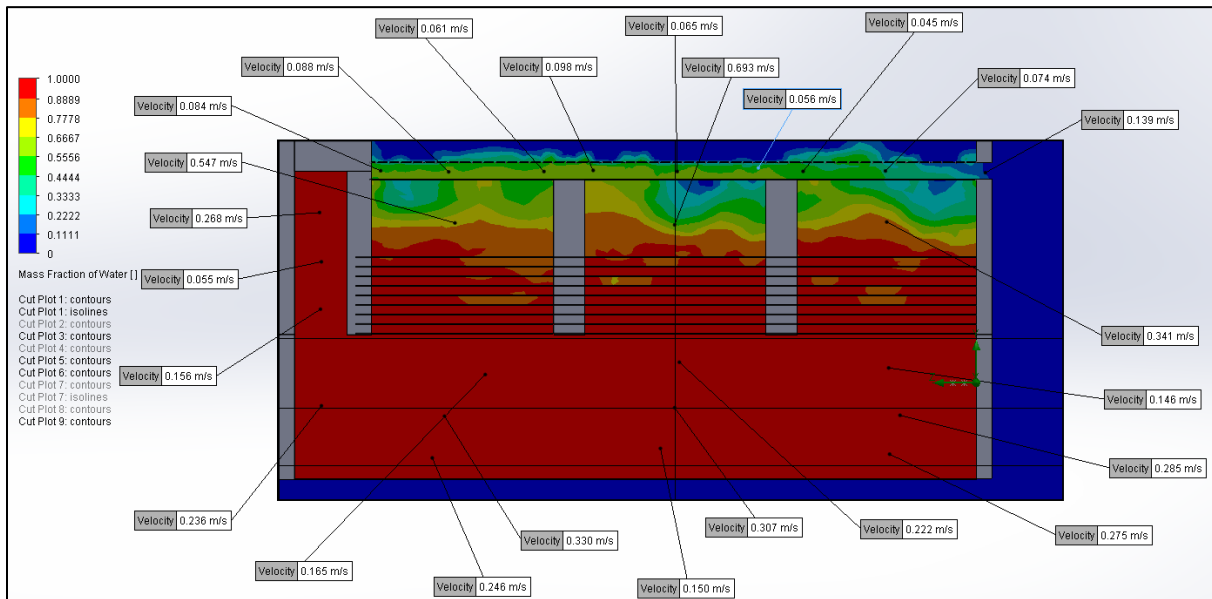


Figura 21. Distribución de velocidades en corte longitudinal por la tubería lateral derecha (3)

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Criterios de observación en relacion a la Figura 21, podemos indicar lo siguiente:

1. **Uniformidad de la velocidad:** No uniforme, con variaciones significativas en todas las zonas funcionales.

2. **Variación de la velocidad:** Entre 0,014 m/s y 0,693 m/s.
3. **Ubicación de la velocidad más fuerte:** 0,693 m/s, ubicada en la Zona de Clarificación (encima de las lamelas) en la sección central del sedimentador.
4. **Ubicación de la velocidad más lenta:** 0,014 m/s, ubicada en la Zona de Recolección (tubería colectora de salida), cerca del tercio final.
5. **Velocidad en puntos clave:**

Zona de Entrada (Gradiente Vertical): El análisis del gradiente vertical de velocidad en la Zona de Entrada revela una inyección concentrada en la superficie, con la velocidad disipada a medida que el flujo se profundiza:

Cerca de la Superficie (Junto a la Compuerta): 0,268 m/s.

Columna Superior de Agua: Desciende a 0,055 m/s.

Bajo Lamelas (Interfase Superior): La velocidad asciende ligeramente a 0,156 m/s (altura inicial de las lamelas).

Fondo de la Unidad (Cerca del Piso): Se estabiliza en 0,236 m/s.

Zona de Decantación (Encima y Debajo de Lamelas): El flujo horizontal en esta zona clave muestra una no uniformidad marcada, como se muestra en la tabla 5:

Tabla 8. Velocidades de flujo en la Zona de Decantación del corte longitudinal por la tubería lateral derecha (3) para $Q = 160 \text{ L/s}$

Ubicación	Encima de Lamelas (Clarificación) (m/s)	Debajo de Lamelas (Lodos) (m/s)
Cerca de la Entrada	0,547	0,165
Tercio Central	0,693(Máx. Global)	0,220
Cerca de Tubería Colectora/Tolva	0,341 (Recolección)	0,146 (Tolva)

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Zona de Lodos (Capa de Fondo): Se cuantificó el perfil de velocidad horizontal en la capa de agua inferior, adyacente al fondo de la unidad:

Zona de Entrada (Superior e Inferior): 0,330 m/s y 0,246 m/s.

Tercio Central (Superior e Inferior): 0,307 m/s y 0,150 m/s.

Fondo/Tolva de Lodos (Superior e Inferior): 0,285 m/s y 0,275 m/s.

Zona de Salida (Tubería Colectora): El perfil de velocidad transversal a lo largo de la Tubería Colectora revela lo siguiente (de inicio a descarga): 0,084 → 0,088 → 0,061 → 0,098 → 0,065 → 0,056 → 0,045 → 0,074 → 0,139 m/s (Máximo).

6. Comentario general: El análisis de velocidades confirma que la distribución hidráulica es altamente ineficiente, con un rango de variación de flujo excesivo entre 0,014 m/s y 0,693 m/s. A pesar de que la velocidad de entrada superficial (0,268 m/s) es menor que en el corte anterior, el flujo aún se acelera significativamente en la Zona de Clarificación Central (hasta 0,693 m/s). Esta aceleración crea una ruta de cortocircuito directa sobre las lamelas, lo que compromete la eficiencia de la decantación y la calidad del agua clarificada. La distribución en la Zona de Lodos es más homogénea que en la zona de clarificación, pero las velocidades en las capas inferiores (0,275 m/s cerca de la tolva) aún deben ser validadas contra el criterio de resuspensión.

7. Concordancia con los criterios teóricos: La velocidad máxima de 0,693 m/s en la Zona de Clarificación (criterio 3) es inaceptable para un sedimentador de alta tasa. Las velocidades horizontales de flujo (V_h) en las zonas de decantación y clarificación deben ser extremadamente bajas (típicamente inferiores a 0,001 m/s o muy cercanas a la velocidad de desborde, V_o convertida a m/s) para preservar los flóculos. El valor observado está varios órdenes de magnitud por encima de lo requerido, lo que indica que el diseño actual aún falla en la disipación de energía y en la distribución uniforme del flujo. Se requiere una modificación en el sistema de entrada y un mejor diseño de la tubería colectora para garantizar que el flujo se acerque al régimen de flujo pistón.

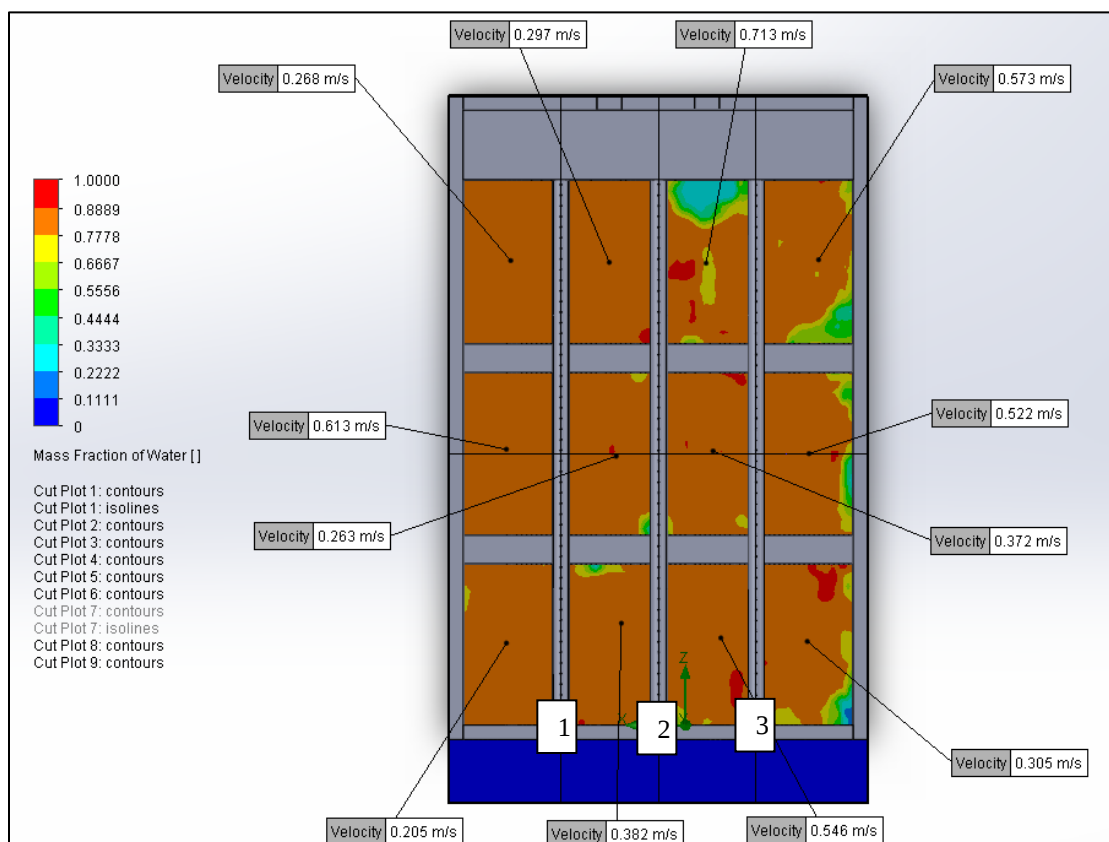
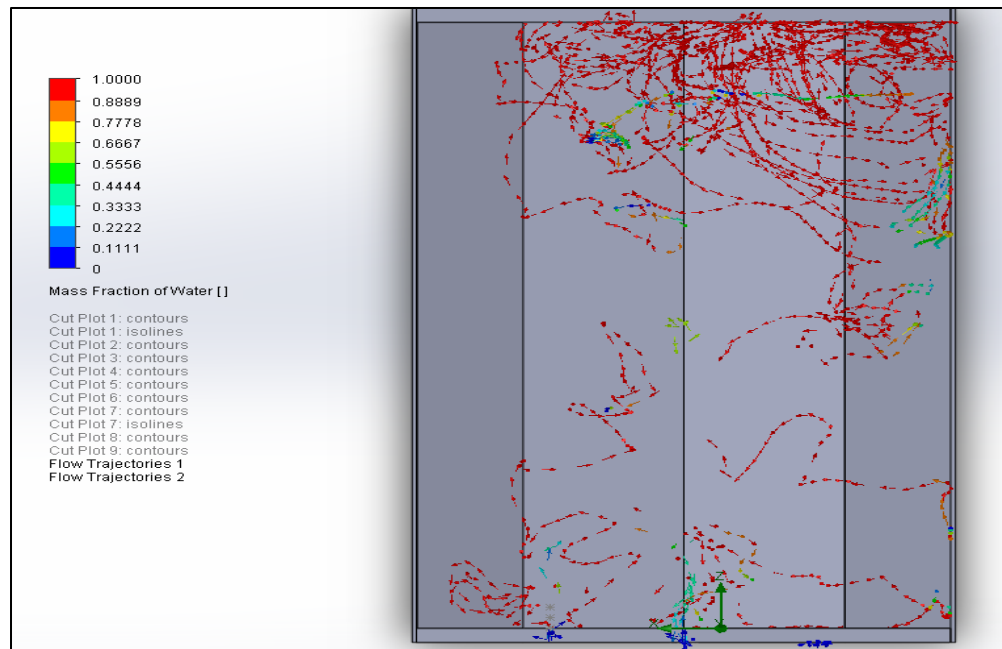


Figura 22. Distribución de velocidades en planta sobre las placas inclinadas del sedimentador

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Criterios de observación en relación a la Figura 22, podemos indicar lo siguiente:

1. Uniformidad de la velocidad: No uniforme, con variaciones significativas tanto longitudinal como transversalmente en la vista en planta sobre las lamelas.

2. Variación de la velocidad: Entre 0,205 m/s y 0,713 m/s.

3. Ubicación de la velocidad más fuerte: 0,713 m/s, aproximadamente en la Zona de Decantación, sobre las lamelas, en el primer tercio de longitud, entre la tubería 2 y la tubería 3.

4. Ubicación de la velocidad más lenta: 0,205 m/s, en el tercio final de longitud, sobre las lamelas, entre el muro/pared y la tubería 1.

5. Velocidad en puntos clave:

Vista en Planta (Sobre las Lamelas) Se observa la distribución de velocidades a lo largo del ancho del sedimentador en tres tercios longitudinales, como se muestra en la tabla 6:

Tabla 9. Velocidades de flujo en la Zona de Decantación de la vista en planta sobre las placas inclinadas del sedimentador para un $Q = 160$ L/s

Tercio Longitudinal	Entre Muro y Tubería 1 (m/s)	Entre Tubería 1 y Tubería 2 (m/s)	Entre Tubería 2 y Tubería 3 (m/s)	Entre Tubería 3 y Muro (m/s)
Primer Tercio (Entrada)	0,268	0,297	0,713 (Máx. Global)	0,573
Segundo Tercio (Central)	0,613	0,263	0,372	0,522
Tercer Tercio (Final)	0,205 (Mín. Global)	0,382	0,546	0,305

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

6. Comentario general: El análisis de la vista en planta sobre las lamelas revela una marcada no uniformidad en la distribución de la velocidad, con un rango de 0,205 m/s a 0,713 m/s. La máxima velocidad de 0,713 m/s se concentra en el primer tercio longitudinal (zona de entrada), específicamente entre las tuberías 2 y 3, indicando un flujo preferencial y un cortocircuito

temprano del caudal por esa sección. Se observan velocidades elevadas (0,613 m/s, 0,522 m/s) en las zonas adyacentes a los muros en el tercio central y final, lo que sugiere el impacto de los chorros de entrada y la presencia de zonas de alta energía cerca de las paredes. La presencia de velocidades muy bajas (0,205 m/s) en la zona de salida (tercio final, junto al muro) indica el subaprovechamiento de esa área para la decantación.

7. Análisis de líneas de corriente (Debajo de las Lamelas): El gráfico de líneas de corriente (debajo de las lamelas) revela un patrón de flujo altamente turbulento e ineficiente en la zona de lodos, con importantes implicaciones para la resuspensión. Se observa:

Acumulación de Flujo en el Primer Tercio: Existe una concentración significativa de líneas de flujo y movimiento en el primer tercio longitudinal, extendiéndose desde la tubería 1 hasta el extremo de la pared. En esta zona se aprecia una fuerte actividad de remolinos y movimientos circulares.

Flujo Errático y Remolinos: Las líneas de corriente presentan un comportamiento zigzag y la formación de múltiples remolinos y movimientos circulares inestables a lo largo de toda la zona de lodos, especialmente entre las tuberías 1 y 2, y 2 y 3.

Zonas de Bajo Movimiento: En contraste, se observa una casi ausencia de líneas de flujo desde el extremo del muro o pared hasta la tubería 1, lo que indica zonas de flujo estancado o muy bajo movimiento en esa región.

Resuspensión de Lodos: El patrón de flujo errático, con remolinos y concentración de energía en el primer tercio, junto a las zonas de estancamiento, es altamente perjudicial. Sugiere un riesgo crítico de resuspensión de los lodos ya asentados y un depósito no uniforme de los mismos, lo que afectaría la calidad del agua decantada y la operación de purga.

8. Concordancia con los criterios teóricos: Los resultados de la simulación muestran una clara discrepancia con los criterios hidráulicos teóricos de diseño para sedimentadores lamelares. La alta velocidad máxima de 0,713 m/s registrada sobre las lamelas en la zona de entrada es incompatible con los requisitos de flujo laminar y uniforme necesario para la correcta decantación y la prevención de la rotura de flóculos. Asimismo, el patrón de turbulencia y remolinos observado en las líneas de corriente en la zona de lodos y las elevadas velocidades en esa región (como se vio

en análisis anteriores de hasta 0,612 m/s) superan la velocidad crítica de arrastre de lodos, lo que pondrá en riesgo la estabilidad del manto de lodos y la eficiencia del proceso. Se concluye que el diseño actual no logra la uniformidad de flujo ni la disipación de energía requerida, lo que exige una modificación profunda del sistema de entrada y de la distribución interna

Tabla 10. Parámetros hidráulicos del sedimentador para $Q = 160$ L/s.

Parámetro	Símbolo	Fórmula	Valor	Unidad
Caudal de diseño	Q	-	160	L/s
Carga superficial	CS	Q/A	72,22	$m^3/m^2 \cdot d$
Tiempo de retención hidráulico	TRH	V/Q	1,51	h
Velocidad de flujo	Vf	Según CFD	-	m/s

Fuente: Elaboración propia

4.3.3. Simulación para un caudal de 215,03 L/s (caudal mínimo operativo).

El caudal operativo registrado en la planta de tabladita es de aproximadamente 215,03 L/s para el conjunto de las cuatro unidades de sedimentación, para efectos de la simulación CFD, el caudal se dividió entre las cuatro unidades, aplicando un flujo de 53,76 L/s por sedimentador

A continuación, se muestran las gráficas de distribución de velocidades obtenidas mediante el software SolidWorks Flow Simulation, que reflejan un patrón de flujo más estable y con menor energía cinética. Posteriormente, se presenta el resumen de parámetros hidráulicos determinados para el escenario.

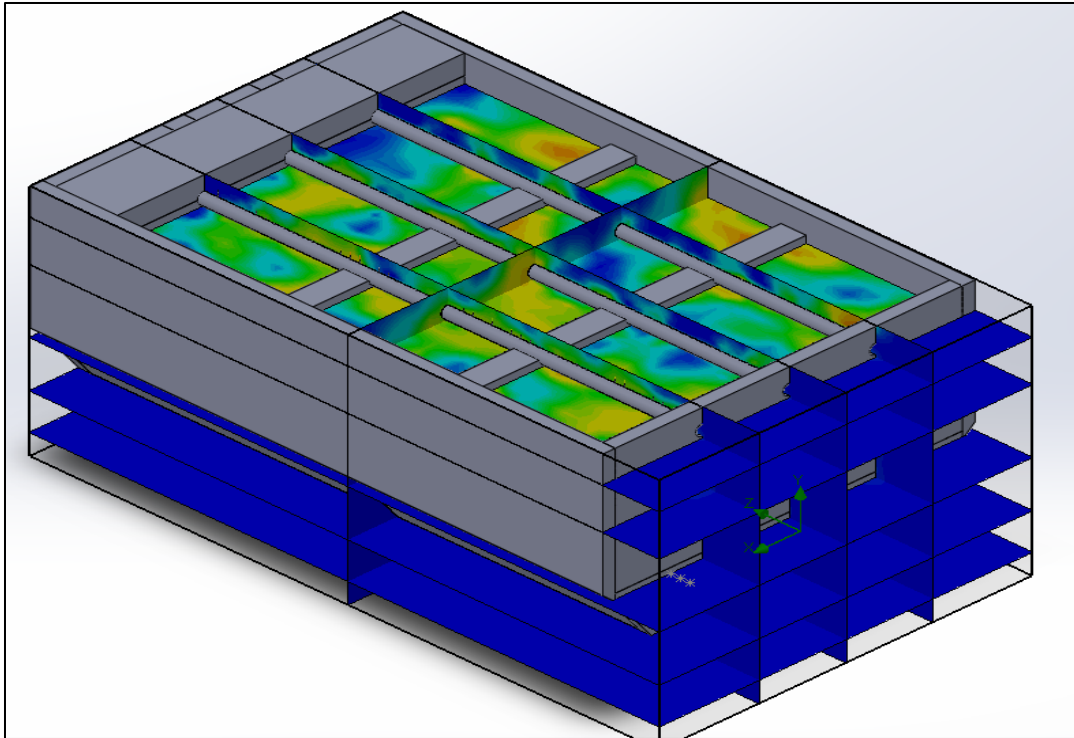
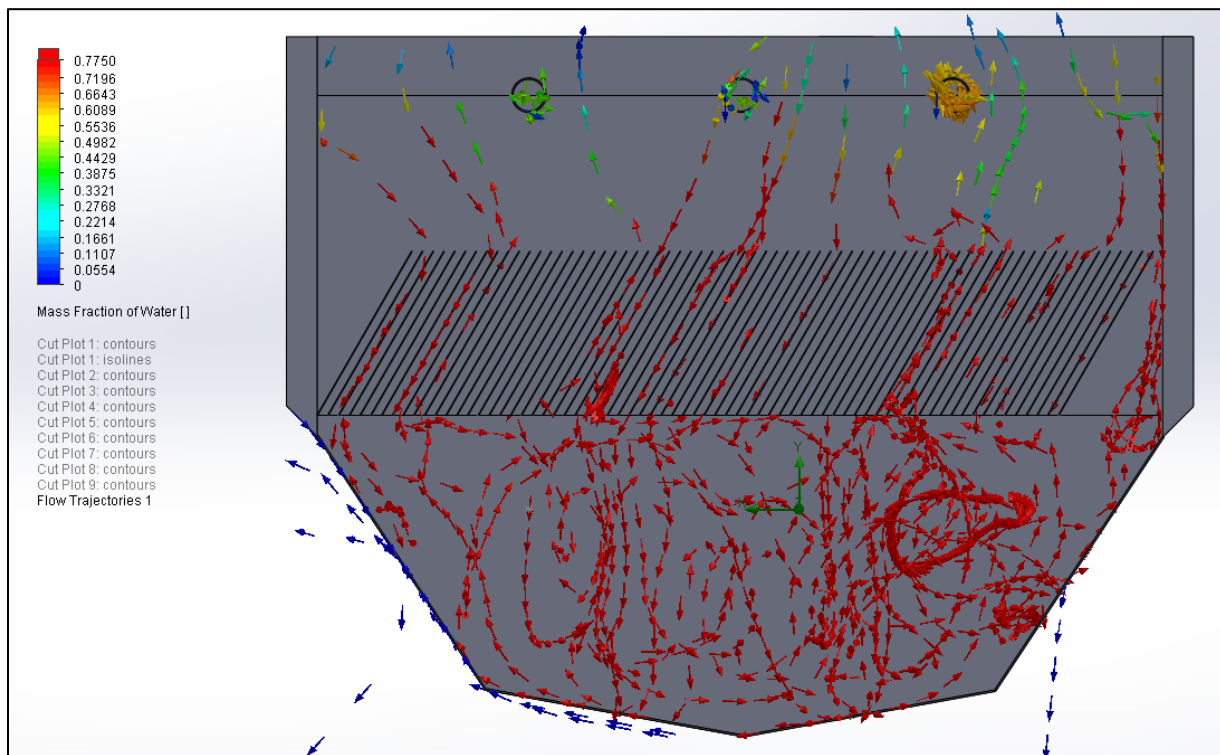


Figura 23. Distribución tridimensional de velocidades en el sedimentador para el caudal de $0,054 \text{ m}^3/\text{s}$.

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)



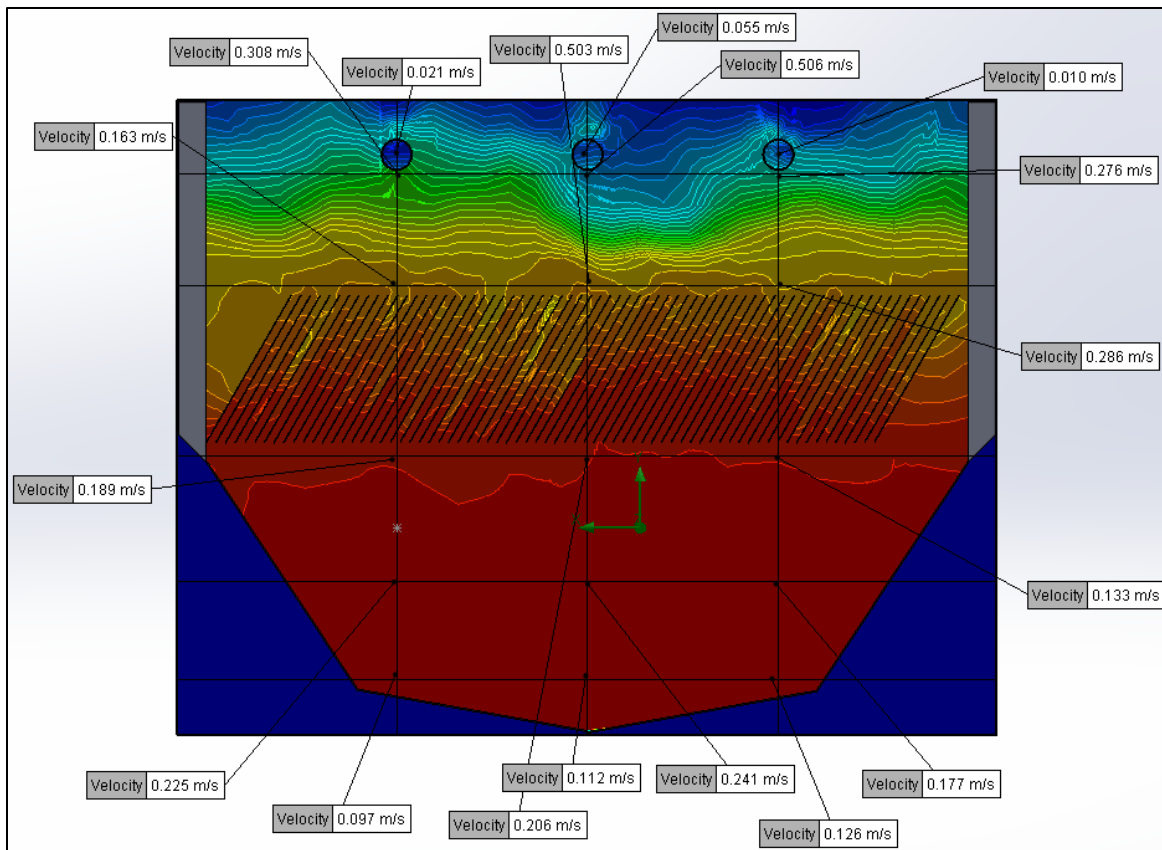


Figura 24. Distribución de velocidades en corte transversal al flujo en el centro del sedimentador.

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Criterios de observación en relacion a la Figura 24, podemos indicar lo siguiente:

- 1. Uniformidad de la velocidad:** No uniforme, con significativas variaciones de velocidad tanto vertical como horizontal en el corte transversal.
- 2. Variación de la velocidad:** Entre 0,010 m/s y 0,503 m/s.
- 3. Ubicación de la velocidad más fuerte:** 0,503 m/s, localizada en la Zona de Decantación, encima de las lamelas, justo en la parte central (en dirección a la tubería 2).
- 4. Ubicación de la velocidad más lenta:** 0,010 m/s, ubicada en la Zona de Salida (dentro de la tubería 3), justo en el centro del conducto.
- 5. Velocidad en puntos clave:**

Zona de Decantación (Corte Transversal): El análisis transversal en la zona de

decantación revela variaciones significativas sobre y debajo de las lamelas, como se muestra en la tabla 8:

Tabla 11. Velocidades de flujo en la Zona de Decantación del corte transversal al flujo en el centro del sedimentador para $Q = 215,03 \text{ L/s}$

Ubicación (Dirección)	Debajo de Lamelas (m/s)	Encima de Lamelas (m/s)
Tubería 1	0,189	0,163
Tubería 2 (Central)	0,206	0,503 (Máx. Global)
Tubería 3 (Extremo)	0,133	0,286

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Zona de Lodos (Corte Transversal): La distribución de velocidades en la zona de lodos se analizó en dos niveles de profundidad, como se muestra en la tabla 9:

Tabla 12. Velocidades de flujo en la Zona de Lodos del corte transversal al flujo en el centro del sedimentador para $Q = 215,03 \text{ L/s}$

Ubicación (Dirección)	Al Ras del Suelo (Fondo) (m/s)	Un Poco Más Arriba del Suelo (m/s)
Tubería 1	0,097	0,225
Tubería 2 (Central)	0,112	0,241
Tubería 3 (Extremo)	0,126	0,177

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Zona de Salida (Corte Transversal): Las velocidades en las tuberías colectoras y justo debajo de ellas son, como se muestra en la tabla 10:

Tabla 13. Velocidades de flujo en la Zona de Salida del corte transversal al flujo en el centro del sedimentador para Q = 215,03 L/s

Ubicación (Dirección)	Dentro de Tuberías (m/s)	Debajo de Tuberías (m/s)
Tubería 1	0,021	0,308
Tubería 2 (Central)	0,055	0,506 (Máx. Zona)
Tubería 3 (Extremo)	0,010 (Mín. Global)	0,276

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

6. Comentario general: La simulación del corte transversal central del sedimentador revela una hidráulica altamente deficiente y no uniforme. La velocidad máxima de 0,503 m/s se concentra sobre las lamelas, en la sección central (tubería 2), creando un flujo preferencial y un potencial cortocircuito localizado. Asimismo, las velocidades justo debajo de las tuberías de salida (hasta 0,506 m/s) son excesivamente altas, lo que indica una succión irregular del flujo que puede arrastrar partículas y afectar la uniformidad de la recolección. En la zona de lodos, las velocidades más cercanas al fondo son bajas (0,097 m/s a 0,126 m/s), pero las capas ligeramente superiores presentan un incremento significativo (hasta 0,241 m/s), sugiriendo una disipación de energía ineficiente en la base y el riesgo de resuspensión.

7. Análisis de líneas de corriente: Las líneas de corriente en el corte transversal central muestran un comportamiento del flujo altamente turbulento y desorganizado a lo largo de toda la columna de agua, lo que es inaceptable para un proceso de sedimentación:

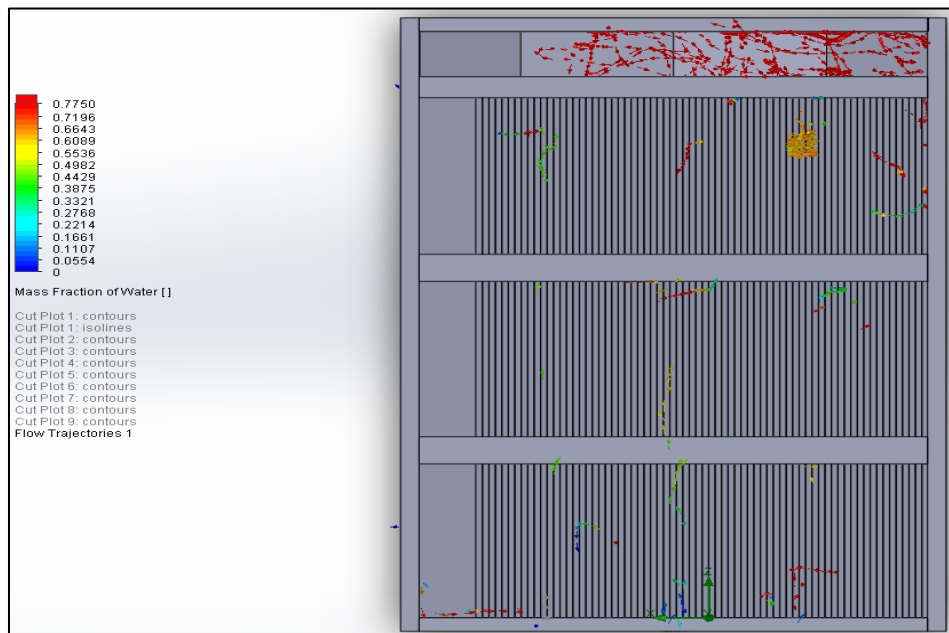
Flujo Vertical Errático: En la zona de decantación (entre y encima de las lamelas), el flujo presenta movimientos ascendentes y descendentes irregulares, en lugar de un flujo laminar y horizontal sobre las placas. Se observa una marcada tendencia a bajar el flujo en la dirección de la tubería 2 (central), mientras que en la tubería 1 el flujo baja más y en la tubería 3 es más variado.

Recirculaciones y Turbulencia en Lodos: La zona de lodos exhibe una intensa actividad de remolinos y movimientos circulares inestables a lo largo de todo el corte. Esta turbulencia horizontal y vertical indica una mezcla constante en el fondo, lo cual es altamente perjudicial para la estabilidad del manto de lodos y su asentamiento.

Concentración de Recirculación: Se aprecia una concentración de líneas de flujo subiendo y bajando en el extremo entre la tubería 3 y la pared, justo debajo de las lamelas, formando un vórtice localizado.

Flujo en Salida Irregular: Incluso en la zona de salida, el flujo dentro y alrededor de las tuberías colectoras es variado (sube, baja, mezcla), indicando una recolección no uniforme del agua clarificada.

9. **Concordancia con los criterios teóricos:** Los resultados del corte transversal central divergen drásticamente de los criterios teóricos para el diseño hidráulico de sedimentadores lamelares. La velocidad máxima de 0,503 m/s sobre las lamelas centrales es significativamente superior a los valores recomendados para flujo laminar, lo que anula la eficiencia de decantación en esa sección. De igual forma, la alta velocidad de 0,506 m/s debajo de las tuberías colectoras es un claro indicador de una recolección desigual y un potencial arrastre de finos hacia la filtración. Las intensas turbulencias, remolinos y flujos verticales observados en las líneas de corriente en todas las zonas, especialmente en la de lodos, son completamente inconsistentes con el objetivo de un proceso de separación por gravedad. Se concluye que el diseño actual presenta fallas críticas en la uniformidad del flujo, la disipación de energía y la estabilidad hidráulica, comprometiendo la operación eficiente del sedimentador.



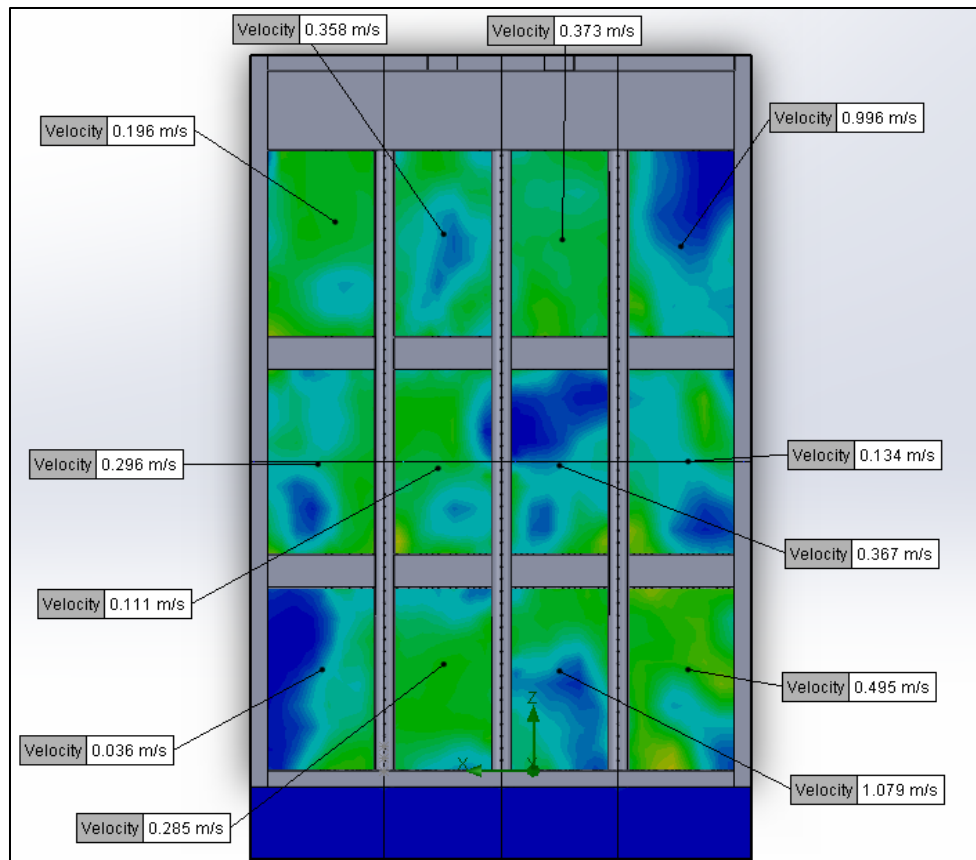


Figura 25. Distribución de velocidades en planta a la altura de las tuberías de entrada

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Criterios de observación en relacion a la Figura 25, podemos indicar lo siguiente:

- 1. Uniformidad de la velocidad:** No uniforme, con extremas variaciones en la distribución transversal del flujo a la altura de la entrada.
- 2. Variación de la velocidad:** Entre 0,036 m/s y 1,079 m/s.
- 3. Ubicación de la velocidad más fuerte:** 1,079 m/s, ubicada en el tercer tercio longitudinal (zona final), entre la tubería 2 y la tubería 3.
- 4. Ubicación de la velocidad más lenta:** 0,036 m/s, en el tercer tercio longitudinal (zona final), entre el muro/pared y la tubería 1.
- 5. Velocidad en puntos clave:** Vista en Planta a la Altura de las Tuberías de Entrada (Transversalmente) Se observa la distribución de velocidades a lo largo del ancho del sedimentador en tres tercios longitudinales, como se muestra en la tabla 11:

Tabla 14. Velocidades de flujo en la Zona de Salida de la vista en planta a la altura de las tuberías de entrada para $Q = 215,03 \text{ L/s}$

Tercio Longitudinal	Entre Muro y Tubería 1 (m/s)	Entre Tubería 1 y Tubería 2 (m/s)	Entre Tubería 2 y Tubería 3 (m/s)	Entre Tubería 3 y Muro (m/s)
Primer Tercio (Entrada)	0,196	0,358	0,373	0,996
Segundo Tercio (Central)	0,296	0,111	0,367	0,134
Tercer Tercio (Final)	0,036 (Mín. Global)	0,285	1,079 (Máx. Global)	0,495

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

6. Comentario general: La distribución de velocidades a la altura de las tuberías de entrada en esta vista en planta es extremadamente no uniforme, revelando un rango de variación de flujo crítico entre $0,036 \text{ m/s}$ y $1,079 \text{ m/s}$. La presencia de un pico de velocidad de $1,079 \text{ m/s}$ en el tercer tercio longitudinal (zona final), entre las tuberías 2 y 3, es altamente preocupante. Esta alta velocidad indica un cortocircuito masivo del flujo que no logra distribuirse equitativamente a lo largo del ancho del sedimentador, saltando las secciones centrales. Asimismo, la velocidad de $0,996 \text{ m/s}$ en el primer tercio, cerca del muro y tubería 3, confirma una inyección inicial concentrada. La presencia de velocidades extremadamente bajas ($0,036 \text{ m/s}$) sugiere zonas de estancamiento o ineficacia hidráulica en otros puntos, lo que subraya la ineficiencia general del diseño actual."

7. Análisis de líneas de corriente (Vista Superior de las Lamelas): El análisis de las líneas de corriente sobre las lamelas, con una vista hacia abajo, muestra un patrón de flujo muy irregular y concentrado, indicando serias deficiencias en la distribución transversal:

Concentración en la Entrada: Se observa una alta concentración de líneas de flujo y actividad en la zona de entrada (primer tercio), específicamente entre la tubería 1 y el extremo de la pared (incluyendo las tuberías 1, 2, 3 y el otro extremo de la pared). El flujo es multidireccional, con movimientos hacia la izquierda, derecha, arriba, abajo y algunas recirculaciones, lo que es indicativo de una inyección desordenada y de alta energía.

Zonas de Bajo Flujo: Por el contrario, en el primer tercio de longitud, desde el lado de la tubería 1 hacia el otro extremo de la pared (opuesto a la concentración), se aprecian muy pocas líneas de flujo, lo que sugiere áreas de estancamiento hidráulico o flujo muy reducido.

Reducción de Actividad en Centro y Final: En el segundo tercio (central), la cantidad de líneas de flujo es notablemente menor que en el primer tercio, con solo algunas trayectorias en la parte central. En el tercer tercio (final), la actividad es aún más limitada, con algunas líneas de flujo cerca de la esquina (entre la tubería 1 y el extremo de la pared), y en general, un patrón disperso y reducido de líneas de flujo con flechas apuntando en múltiples direcciones (abajo, arriba, derecha, izquierda).

Implicación Global: Este patrón de flujo altamente concentrado en la entrada, seguido de una disminución drástica de actividad en las zonas centrales y finales, demuestra una ineficiencia crítica en la distribución transversal del caudal sobre las lamelas. El flujo no está utilizando toda el área disponible para la decantación, resultando en un cortocircuito efectivo que bypassa gran parte de la superficie lamelar, impidiendo la decantación uniforme y comprometiendo gravemente la eficiencia del proceso.

8. Concordancia con los criterios teóricos: Los resultados de la simulación de la vista en planta a la altura de las tuberías de entrada son totalmente inconsistentes con los criterios hidráulicos teóricos para sedimentadores lamelares. La velocidad máxima de 1,079 m/s (3,88 m/h) y de 0,996 m/s en las zonas de entrada y final, respectivamente, es extraordinariamente alta y está muy por encima de los límites de velocidad horizontal (V_h) aceptables para un flujo laminar sobre las placas inclinadas (que idealmente debería ser inferior a la velocidad de desborde V_o , generalmente menor a 0,001 m/s o 3,6 m/h como velocidad superficial). La concentración de flujo y la turbulencia observadas en las líneas de corriente en la entrada, junto con las zonas de estancamiento, demuestran un cortocircuito hidráulico severo que invalida el concepto de flujo pistón. Se concluye que el diseño actual no cumple con los requisitos fundamentales de distribución uniforme y disipación de energía, lo que hace que el sedimentador sea ineficaz para la remoción de flóculos y exige un rediseño radical de la zona de entrada y del sistema de distribución.

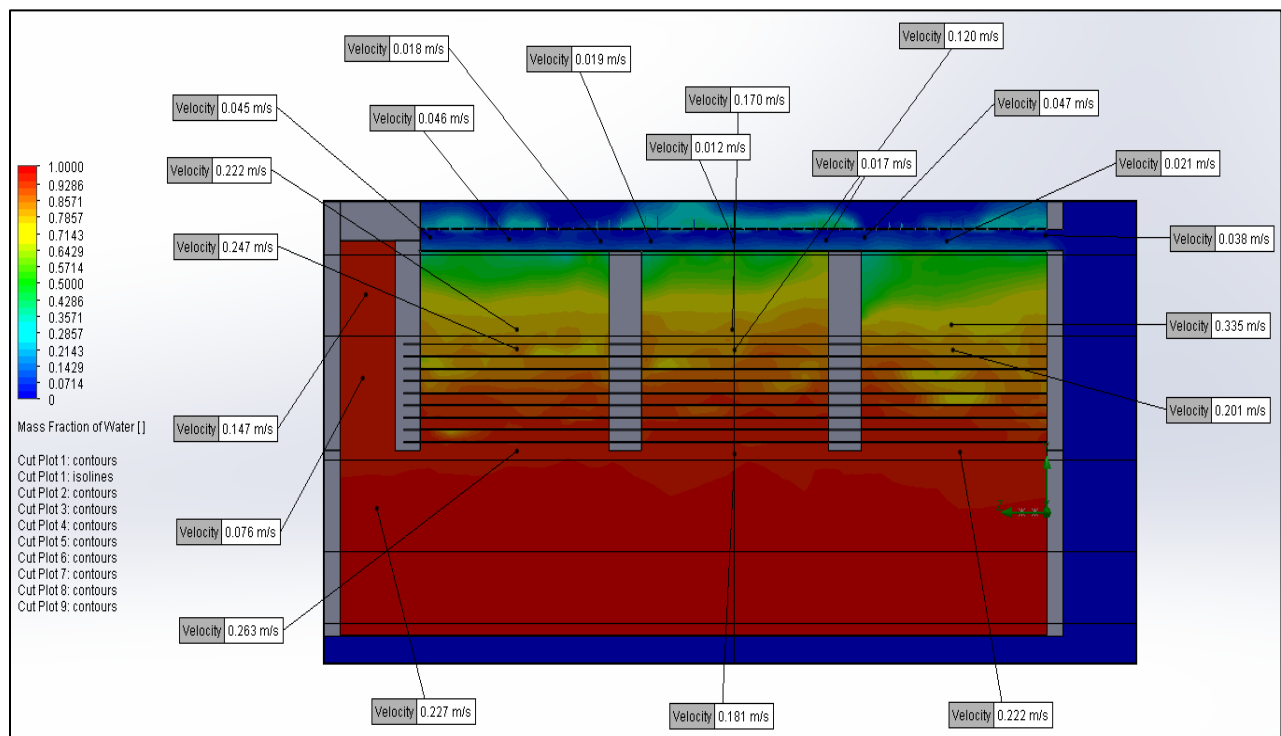
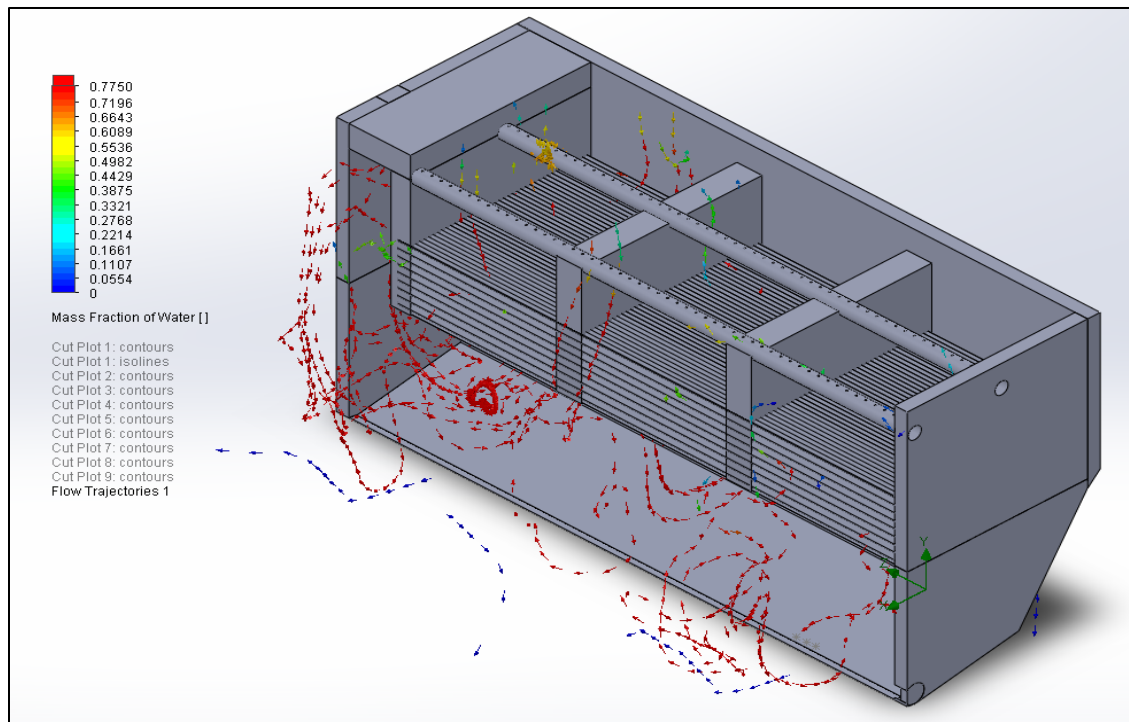


Figura 26. Distribución de velocidades en corte longitudinal por la tubería lateral izquierda (1)

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Criterios de observación en relacion a la Figura 26, podemos indicar lo siguiente:

1. Uniformidad de la velocidad: No uniforme, con variaciones significativas en las tres capas analizadas y a lo largo de la longitud.

2. Variación de la velocidad: Entre 0,012 m/s y 0,335 m/s.

3. Ubicación de la velocidad más fuerte: 0,335 m/s, ubicada en la Zona de Decantación (encima de las lamelas) en el tercer tercio de longitud (zona final).

4. Ubicación de la velocidad más lenta: 0,012 m/s, ubicada en la Zona de Salida (tubería colectora), justo en el centro del tubo en el tercio central.

5. Velocidad en puntos clave:

Zona de Entrada (Gradiente Vertical) Se observa un gradiente vertical de velocidad significativo, con una fuerte caída de la velocidad en las capas superiores:

Cerca de la Superficie (Junto a la Compuerta): 0,147 m/s.

Columna Superior de Agua: Desciende a 0,076 m/s.

Capa Inferior (Sobre la Zona de Lodos): La velocidad asciende a 0,227 m/s, indicando un rebote o una aceleración del flujo hacia la base.

Zona de Decantación (Capas de Flujo) Se analiza la velocidad del flujo horizontal en tres capas funcionales a lo largo de la longitud, como se muestra en la tabla 12:

Tabla 15. Velocidades de flujo en la Zona de Decantación del corte longitudinal por la tubería lateral izquierda (1) para $Q = 215,03 \text{ L/s}$

Tercio Longitudinal	Debajo de Lamelas (Lodos) (m/s)	En Medio de Lamelas (m/s)	Encima de Lamelas (Clarificación) (m/s)
Primer Tercio	0,263	0,247	0,222
Segundo Tercio (Central)	0,181	0,120	0,170
Tercer Tercio (Final)	0,222	0,201	0,335 (Máx. Global)

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Zona de Salida (Tubería Colectora) El perfil de velocidad transversal a lo largo de la Tubería Colectora revela una baja velocidad general, pero variabilidad: $0,045 \rightarrow 0,046 \rightarrow 0,018 \rightarrow 0,019 \rightarrow 0,012$ (Mín. Global) $\rightarrow 0,017 \rightarrow 0,047 \rightarrow 0,021 \rightarrow 0,038$ m/s.

6. Comentario general: La distribución de velocidades en este corte longitudinal muestra una inestabilidad hidráulica, aunque con un rango de variación general menor en comparación con el corte central, oscilando entre 0,012 m/s y 0,335 m/s. El principal problema es la aceleración del flujo hacia el final del sedimentador, con la velocidad máxima de 0,335 m/s concentrada en el tercer tercio (zona de clarificación). Esto indica un tiempo de retención subestimado y una falta de aprovechamiento del primer tercio longitudinal para la decantación. Las velocidades en la capa de lodos se mantienen elevadas (0,227 m/s en la entrada), sugiriendo un riesgo continuo de resuspensión, a pesar de que la recolección en la tubería de salida se realiza a velocidades muy bajas, aunque no uniformes.

7. Análisis de líneas de corriente: El análisis de las líneas de corriente (vista 3D) corrobora la falta de control hidráulico:

Zona de Entrada: El flujo es predominantemente vertical descendente (flechas hacia abajo), impactando el fondo de la unidad y destruyendo la estabilidad de la zona de lodos.

Zona de Lodos: Se observa alta turbulencia y movimientos circulares inestables a lo largo de toda la base del sedimentador (primer, segundo y tercer tercio), confirmando el riesgo de resuspensión.

Zona de Decantación (Sobre Lamelas): El flujo es calmado y escaso (pocas líneas de flujo). Aunque el flujo es vertical ascendente (flechas hacia arriba) en la dirección de las lamelas, la cantidad extremadamente reducida de líneas de corriente, especialmente en el segundo y tercer tercio, demuestra que gran parte del caudal útil está siguiendo rutas más rápidas (cortocircuitos) y no está utilizando la superficie lamelar de manera efectiva.

Zona de Salida: Las líneas de flujo en el sistema de recolección muestran un comportamiento errático (suben y bajan), indicando una succión irregular y un desequilibrio en el colector.

8. Concordancia con los criterios teóricos: Los resultados de la simulación del corte lateral son inconsistentes con los criterios teóricos de diseño. La velocidad máxima de 0,335 m/s en la zona

de clarificación es inaceptablemente alta para el flujo sobre las lamelas, un régimen que debe ser laminar y con velocidades horizontales cercanas a la velocidad de desborde (V_o). El flujo elevado y concentrado en el tercer tercio longitudinal, junto con la intensa turbulencia observada en la zona de lodos, comprueba que el diseño actual no logra la disipación de energía ni el régimen de flujo pistón requerido. A pesar de que esta velocidad máxima es menor que la de los otros cortes (picos de 1,079 m/s), sigue siendo demasiado alta para garantizar la integridad de los flóculos y la eficiencia del proceso de decantación. Se requiere una corrección en el sistema de entrada y distribución.

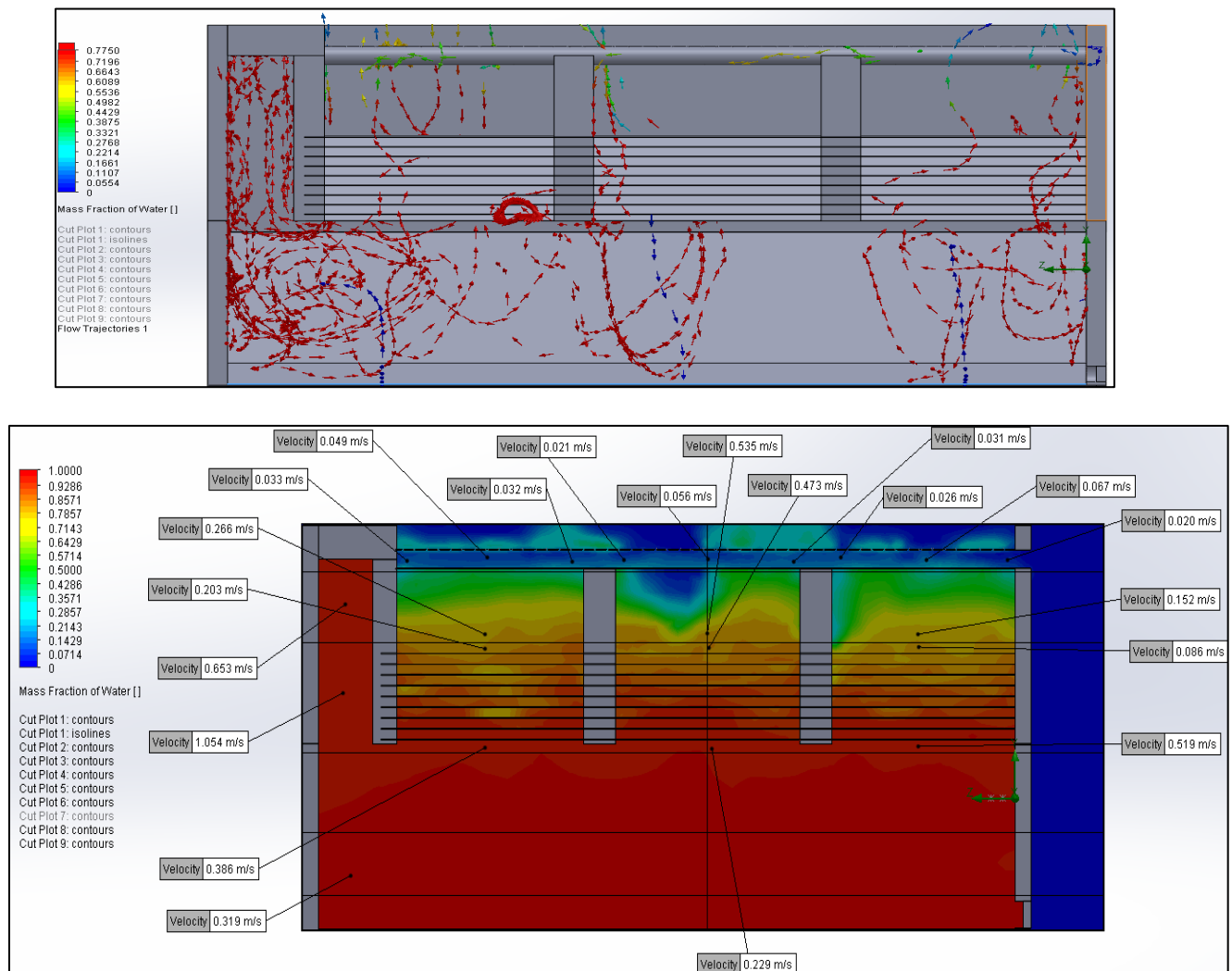


Figura 27. Distribución de velocidades en corte longitudinal por la tubería central (2)

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Criterios de observación en relación a la Figura 27, podemos indicar lo siguiente:

1. Uniformidad de la velocidad: No uniforme, con extremas variaciones en todas las zonas funcionales y en todas las capas de flujo.

2. Variación de la velocidad: Entre 0,020 m/s y 1,054 m/s.

3. Ubicación de la velocidad más fuerte: 1,054 m/s, ubicada en la Zona de Entrada, a la altura de la parte media de las lamelas, justo debajo del chorro superficial principal.

4. Ubicación de la velocidad más lenta: 0,020 m/s, localizada en la Zona de Salida (tubería colectora), en el tercio final de la longitud, justo antes de la descarga.

5. Velocidad en puntos clave:

Zona de Entrada (Gradiente Vertical) La entrada presenta un marcado gradiente vertical, con una velocidad extrema en la zona media:

Cerca de la Superficie (Junto a la Compuerta): 0,653 m/s.

A Media Altura (Interfase Entrada-Lamelas): 1,054 m/s (Máx. Global).

Fondo de la Unidad (Cerca del Piso): 0,319 m/s.

Zona de Decantación (Capas de Flujo): La distribución de velocidades en las tres capas dentro y alrededor de las lamelas, como se muestra en la tabla 13:

Tabla 16. Velocidades de flujo en la Zona de Decantación del corte longitudinal por la tubería central (2) para $Q = 215,03$ L/s

Tercio Longitudinal	Debajo de Lamelas (m/s)	Dentro de Lamelas (m/s)	Encima de Lamelas (m/s)
Primer Tercio	0,386	0,203	0,266
Segundo Tercio (Central)	0,229	0,473	0,535
Tercer Tercio (Final)	0,519	0,086	0,152

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Zona de Salida (Tubería Colectora) El perfil de velocidad transversal a lo largo de la Tubería Colectora (de inicio a descarga) es: $0,033 \rightarrow 0,049 \rightarrow 0,032 \rightarrow 0,021 \rightarrow 0,056 \rightarrow 0,031 \rightarrow 0,026 \rightarrow 0,067 \rightarrow 0,020$ (Mín. Global) m/s.

6. Comentario general: Este corte longitudinal central revela una hidráulica catastrófica con una extrema no uniformidad y velocidades de flujo peligrosamente altas, evidenciando un cortocircuito masivo y una ineficiente disipación de energía. La velocidad máxima de 1,054 m/s en la zona de entrada (a media altura) es inaceptable y genera una fuerte turbulencia e inestabilidad que se propaga por todo el sistema. Aunque las velocidades en la tubería de salida son bajas, no compensan la severa inuniformidad interna, con la zona de decantación mostrando picos de hasta 0,535 m/s (encima de lamelas) y un aumento del flujo en la zona de lodos del tercer tercio (0,519 m/s), confirmando el riesgo de resuspensión y la falta de aprovechamiento de la superficie lamelar.

7. Análisis de líneas de corriente: El análisis de las líneas de corriente en este corte longitudinal confirma los graves problemas hidráulicos:

Zona de Entrada (Flujo Descontrolado): El flujo es abrumadoramente vertical descendente (flechas hacia abajo), impactando la zona inferior con una violencia considerable. Esta inyección de alta energía provoca una intensa turbulencia y la formación de grandes vórtices circulares que se extienden desde el inicio de las lamelas hasta el fondo del sedimentador.

Turbulencia en Lodos: La zona de lodos está dominada por movimientos circulares erráticos y turbulentos, que van hacia la izquierda, derecha, arriba y abajo, impidiendo la sedimentación estable. Existe una concentración de remolinos justo al final del primer tercio de longitud, debajo de las lamelas.

Flujo en Decantación (Inadecuado): Encima y en medio de las lamelas, el flujo presenta trayectorias diagonal-ascendentes y descendentes, con una actividad muy reducida en el segundo tercio y prácticamente nula en el tercer tercio, lo que sugiere que el agua clarificada no está utilizando la superficie lamelar de manera efectiva. El movimiento del fluido que debería ser suave y laminar está alterado por movimientos verticales significativos.

Inestabilidad Global: Las líneas de corriente demuestran la ausencia de un flujo pistón

adecuado, con amplias zonas de recirculación, turbulencia y cortocircuito, comprometiendo la eficiencia global del proceso. El flujo en la zona de salida es más calmado, pero no logra contrarrestar la inestabilidad interna.

8. Concordancia con los criterios teóricos: Los resultados de la simulación de este corte longitudinal central son completamente inconsistentes con los criterios hidráulicos teóricos para decantadores lamelares. La velocidad máxima de 1,054 m/s en la zona de entrada (a media altura) y los picos de hasta 0,535 m/s sobre las lamelas centrales, exceden con creces los límites de velocidad horizontal (V_h) para un flujo laminar y eficiente. Estas velocidades, combinadas con la intensa turbulencia y los patrones de flujo desorganizados observados en las líneas de corriente, confirman un cortocircuito hidráulico severo y una destrucción de flóculos inaceptable. Las velocidades en la zona de lodos (0,319 m/s en el fondo y 0,519 m/s en el tercer tercio) también superan la velocidad crítica de arrastre, lo que garantiza la resuspensión de lodos. Se concluye que el diseño actual presenta fallas fundamentales en la distribución de energía, la uniformidad del flujo y la capacidad de decantación, requiriendo un rediseño integral del sistema de entrada y de la configuración interna.

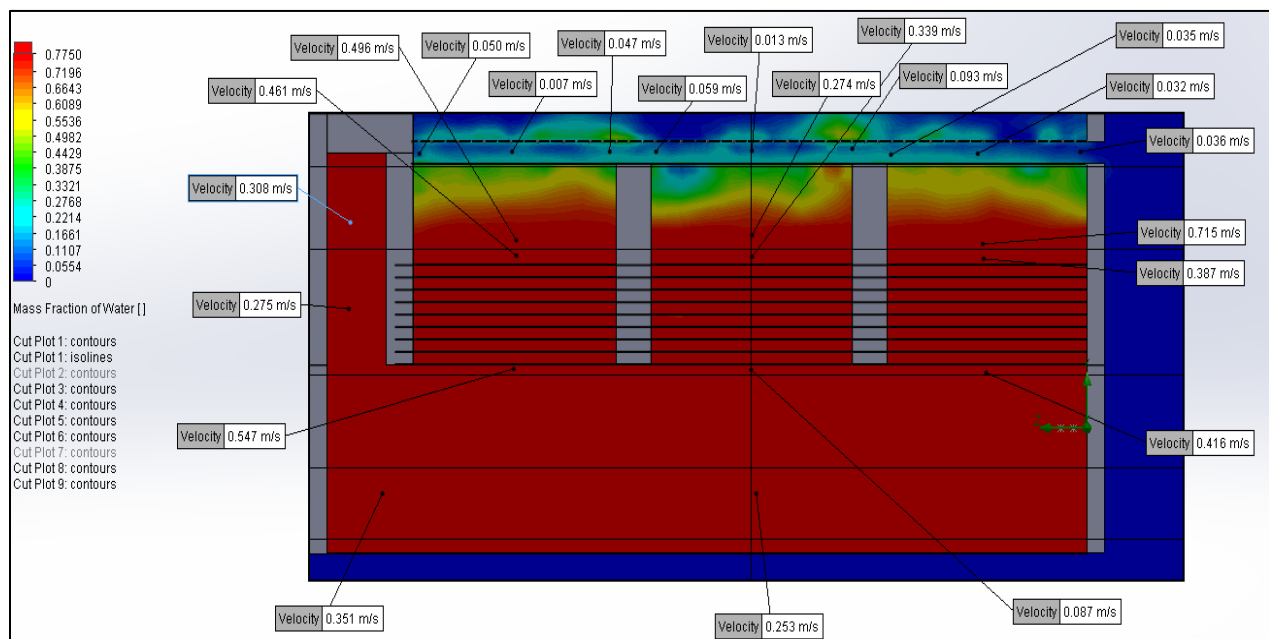


Figura 28. Distribución de velocidades en corte longitudinal por la tubería lateral derecha (3)

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Criterios de observación en relación a la Figura 28, podemos indicar lo siguiente:

- 1. Uniformidad de la velocidad:** No uniforme, con extrema variabilidad.
- 2. Variación de la velocidad:** Entre 0,007 m/s y 0,715 m/s.
- 3. Ubicación de la velocidad más fuerte:** 0,715 m/s, ubicada en la Zona de Decantación (encima de las lamelas, en la capa superior), en el tercer tercio de longitud (zona final).
- 4. Ubicación de la velocidad más lenta:** 0,007 m/s, localizada en la Zona de Salida (tubería colectora), en el primer tercio de longitud, cerca del inicio de la descarga.
- 5. Velocidad en puntos clave:**

Zona de Entrada (Gradiente Vertical) Se observa un gradiente de velocidad significativo en la zona de inyección:

Cerca de la Superficie (Junto a la Compuerta): 0,308 m/s.

A Media Altura: 0,275 m/s.

Fondo de la Unidad (Cerca del Piso): 0,351 m/s.

Zona de Decantación (Capas de Flujo) La distribución de velocidades se analiza en tres capas verticales y tres tercios longitudinales. Destaca una fuerte aceleración en el tercio final, como se muestra en la Tabla 14:

Tabla 17. Velocidades de flujo en la Zona de Decantación del corte longitudinal por la tubería lateral derecha (3) para $Q = 215,03\text{L/s}$

Capa Vertical	Primer Tercio (m/s)	Segundo Tercio (Central) (m/s)	Tercer Tercio (Final) (m/s)
Encima de Lamelas (Superior)	0,496	0,274	0,715 (Máx. Global)
Encima de Lamelas (Inferior)	0,461	0,339	0,387
Debajo de Lamelas (Lodos)	0,547	0,087	0,416

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Zona de Lodos (Capa de Fondo) Tercio Central (Cerca del Piso): 0,253 m/s.

Zona de Salida (Tubería Colectora) El perfil de velocidad a lo largo de la tubería colectora muestra bajas velocidades, pero con un mínimo extremo:

Primer Tercio: 0,050 → 0,007 (Mín. Global) → 0,047 m/s.

Tercio Central: 0,059 → 0,013 → 0,093 m/s.

Tercer Tercio (Final): 0,035 → 0,032 → 0,036 m/s.

6. Comentario general: La simulación en el corte lateral derecho confirma la alta ineficiencia hidráulica del sedimentador, con una variación de velocidad que va desde 0,007 m/s hasta un valor crítico de 0,715 m/s. El problema más evidente es la aceleración del flujo hacia el final de la unidad, con la velocidad máxima concentrada en la capa superior de la zona de clarificación en el tercer tercio. Esta aceleración sugiere que el tiempo de retención real es mucho menor al diseñado y que el caudal está evitando las zonas de flujo lento. La velocidad en la zona de lodos del primer tercio (0,547 m/s) y del tercer tercio (0,416 m/s) es excesivamente alta, lo que indica un riesgo crítico de resuspensión de lodos, mientras que la baja velocidad en el tercio central de la zona de lodos (0,087 m/s) sugiere la existencia de zonas muertas o estancadas, evidenciando una distribución de flujo completamente irregular.

7. Concordancia con los criterios teóricos: Los resultados de este corte lateral son inconsistentes con los criterios teóricos de diseño. La velocidad máxima de 0,715 m/s en la zona de clarificación es inaceptable para un decantador laminar. La velocidad horizontal del flujo (V_h) sobre las lamelas debe ser laminar y sumamente baja (muy cercana o inferior a la velocidad de desborde V_o) para evitar la rotura y arrastre de flóculos. Este valor excede los límites recomendados en varios órdenes de magnitud. Las velocidades elevadas en la zona de lodos (0,547 m/s en el primer tercio y 0,416 m/s en el tercer tercio) también superan la velocidad crítica de arrastre, lo que garantiza la resuspensión de las partículas sedimentadas. Se concluye que el diseño actual no logra la distribución uniforme ni la baja turbulencia requeridas, confirmando la necesidad de un rediseño integral del sistema de entrada y distribución.

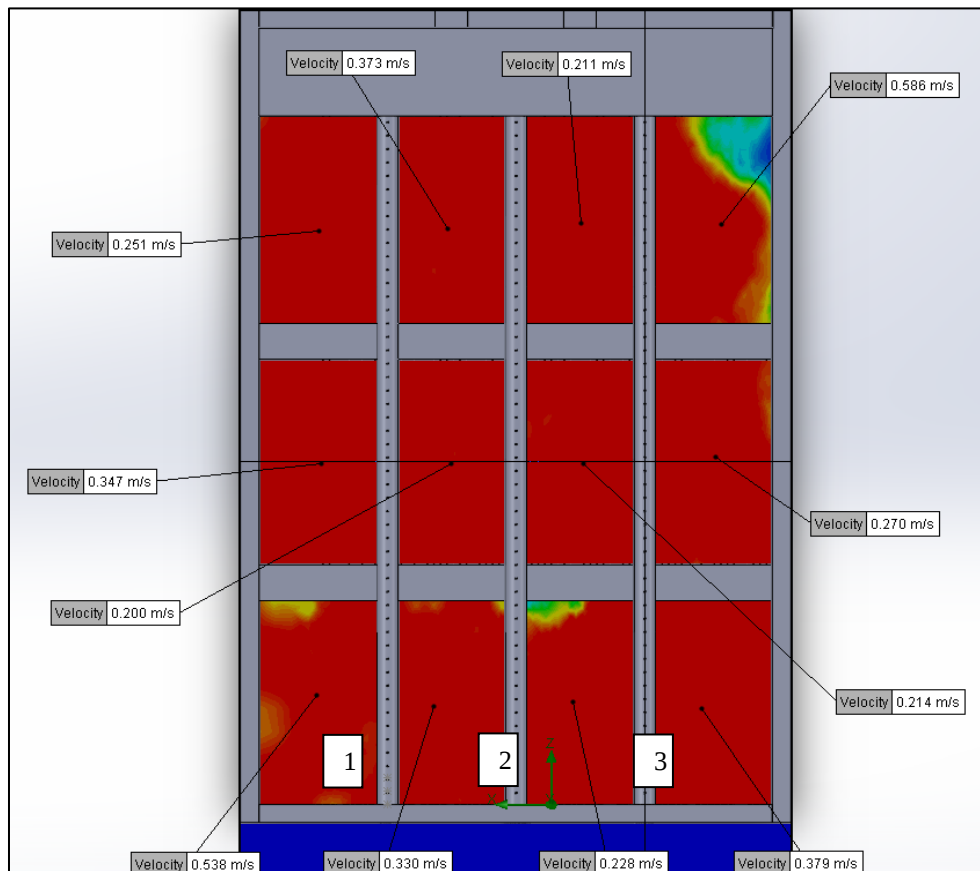
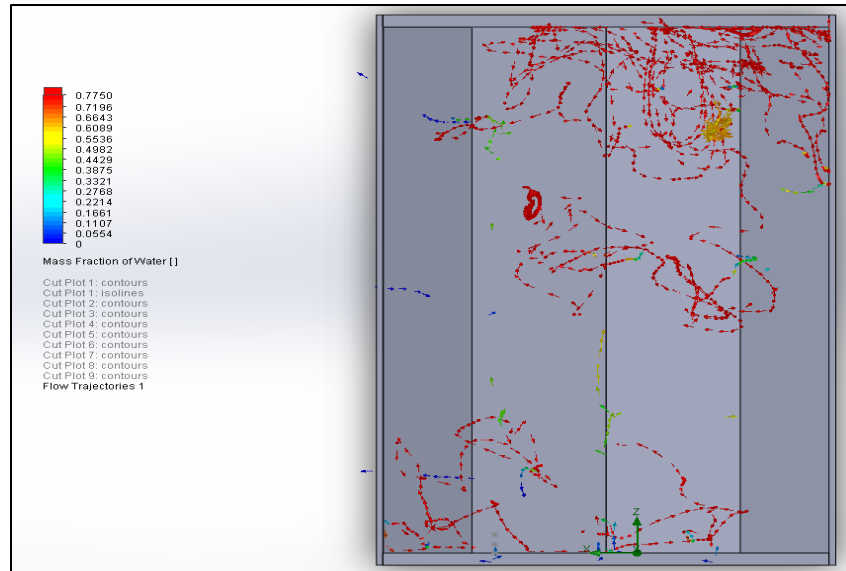


Figura 29. Distribución de velocidades en planta sobre las placas inclinadas del sedimentador

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Criterios de observación en relación a la Figura 29, podemos indicar lo siguiente:

- 1. Uniformidad de la velocidad:** No uniforme, con variaciones significativas tanto longitudinal como transversalmente en la vista en planta sobre las lamelas.
- 2. Variación de la velocidad:** Entre 0,200 m/s y 0,586 m/s.
- 3. Ubicación de la velocidad más fuerte:** 0,586 m/s, ubicada en el Primer Tercio de Longitud (zona de entrada), sobre las lamelas, entre la tubería 3 y el extremo del muro/pared.
- 4. Ubicación de la velocidad más lenta:** 0,200 m/s, ubicada en el Segundo Tercio Central, sobre las lamelas, entre la tubería 1 y la tubería 2.
- 5. Velocidad en puntos clave:** Vista en Planta (Sobre las Lamelas) Se observa la distribución de velocidades a lo largo del ancho del sedimentador en tres tercios longitudinales, como se muestra en la Tabla 15:

Tabla 18. Velocidades de flujo en la Zona de Decantación de la vista en planta sobre las placas inclinadas del sedimentador para un $Q = 215,03 \text{ L/s}$

Tercio Longitudinal	Entre Muro y Tubería 1 (m/s)	Entre Tubería 1 y Tubería 2 (m/s)	Entre Tubería 2 y Tubería 3 (m/s)	Entre Tubería 3 y Muro (m/s)
Primer Tercio (Entrada)	0,251	0,373	0,211	0,586 (Máx. Global)
Segundo Tercio (Central)	0,347	0,200 (Mín. Global)	0,214	0,270
Tercer Tercio (Final)	0,538	0,330	0,228	0,379

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

6. Comentario general: El análisis de la vista en planta sobre las lamelas revela una distribución de flujo irregular y deficiente, con la velocidad máxima de 0,586 m/s concentrada en el primer tercio cerca del muro y la tubería 3, indicando un flujo preferencial y cortocircuito temprano del caudal en esa sección transversal. Por otro lado, la velocidad mínima de 0,200 m/s en el tercio central sugiere que el flujo es desviado, dejando ciertas zonas subutilizadas. Es notable el aumento

de velocidad a 0,538 m/s en el tercio final cerca del muro y tubería 1, lo cual es ineficiente, ya que se espera que las velocidades disminuyan hacia la zona de salida. La falta de uniformidad transversal compromete la eficiencia de toda la superficie de decantación.

7. Análisis de líneas de corriente (Debajo de las Lamelas): El gráfico de líneas de corriente (debajo de las lamelas) revela un patrón de flujo en la zona de lodos altamente turbulento y desorganizado, con formación de vórtices y extensas zonas muertas (estancamiento):

Concentración de Turbulencia: Existe una alta concentración de líneas de flujo circulares y movimientos turbulentos (izquierda, derecha, arriba, abajo) en el primer tercio, especialmente entre las tuberías 1, 2, y 3. La mayor concentración se observa entre la tubería 2 y la tubería 3.

Movimiento Reducido: En contraste, el segundo y tercer tercio central muestran mucha menos actividad de líneas de corriente y un movimiento circular más reducido, aunque aún presente entre las tuberías 1, 2 y 3.

Zonas Muertas Críticas (Estancamiento): Lo más preocupante es la existencia de grandes zonas sin circulación aparente: en el primer y segundo tercio, entre el muro y la tubería 1, y en el segundo y tercer tercio, entre la tubería 3 y el muro de ese extremo. Estas áreas muertas promueven la sedimentación no uniforme y el desarrollo de problemas operativos (anaerobiosis).

Implicación: La combinación de alta turbulencia concentrada (riesgo de resuspensión) y extensas zonas de estancamiento (riesgo de sedimentación no uniforme/problemas de calidad) demuestra que la distribución del flujo en la zona de lodos es crítica e ineficiente.

8. Concordancia con los criterios teóricos: La velocidad máxima de 0,586 m/s registrada sobre las lamelas, aunque menor que otros picos, sigue siendo inaceptablemente alta para los criterios de diseño. Se recuerda que la velocidad horizontal (V_h) debe ser laminar y muy baja (cercana al V_o). Los picos de velocidad observados a lo largo de todas las simulaciones (hasta 1,079 m/s), así como la turbulencia y las zonas muertas, son inconsistentes con el requisito de flujo pistón. El diseño actual no logra la uniformidad de flujo, la disipación de energía, ni la estabilidad requerida en la zona de lodos (demostrado por la alta turbulencia y zonas de estancamiento).

Conclusión General del Análisis: El diseño actual del sedimentador falla hidráulicamente en todos

los cortes analizados. Se requiere un rediseño integral del sistema de entrada, la zona de distribución y posiblemente del sistema de recolección para lograr un régimen de flujo laminar y uniforme

Tabla 19. Parámetros hidráulicos del sedimentador para $Q = 215,03$ L/s

Parámetro	Símbolo	Fórmula	Valor	Unidad
Caudal mínimo	Q	-	215,03	L/s
Carga superficial	CS	Q/A	97,07	$m^3/m^2 \cdot d$
Tiempo de retención hidráulico	TRH	V/Q	1,13	h
Velocidad de flujo	Vf	Según CFD	-	m/s

Fuente: Elaboración propia

4.3.4. Simulación para un caudal de 342,25 L/s (caudal máximo operativo).

En condiciones de máxima demanda, la planta potabilizadora de Tabladita puede operar hasta con un caudal total cercano a 340 L/s, valor que supera el caudal de diseño debido al crecimiento poblacional y a la necesidad de garantizar el suministro continuo.

Este caudal se distribuye entre las cuatro unidades de sedimentación, correspondiendo aproximadamente 85 L/s por cada sedimentador.

La simulación CFD se realizó con este caudal incrementado para analizar el comportamiento del flujo y la eficiencia hidráulica bajo condiciones más exigentes. A continuación, se presentan las figuras que muestran la distribución de velocidades obtenidas con el módulo Flow Simulation de SolidWorks, seguidas del resumen de los parámetros hidráulicos de operación estimados.

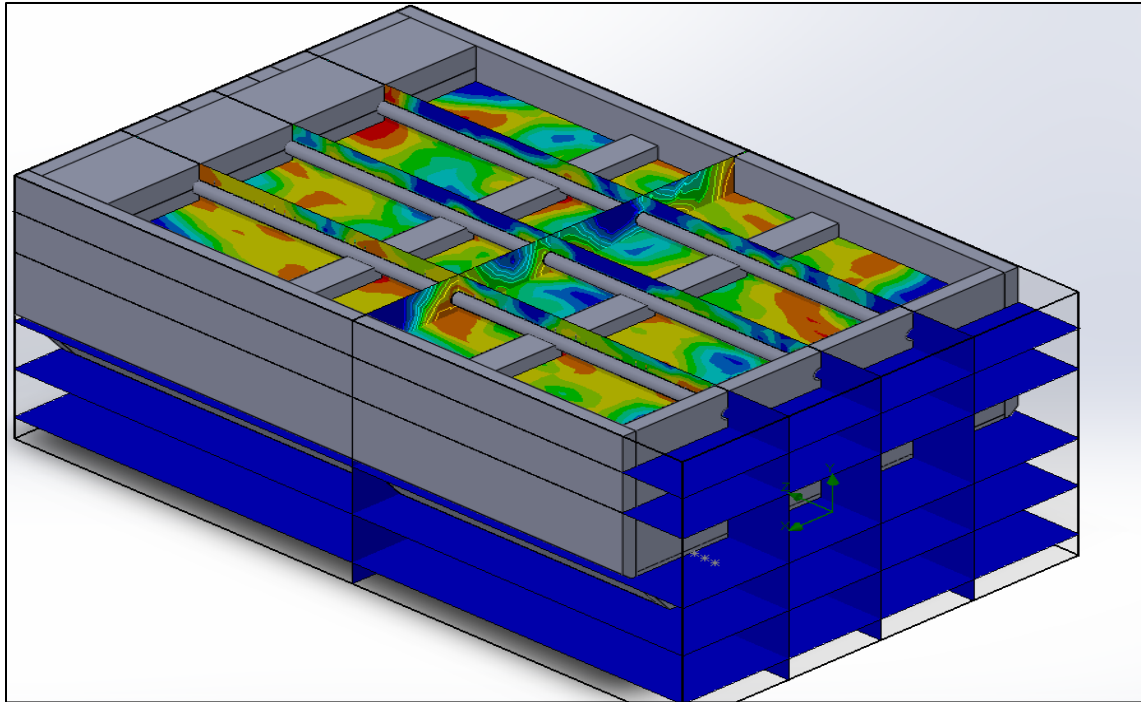
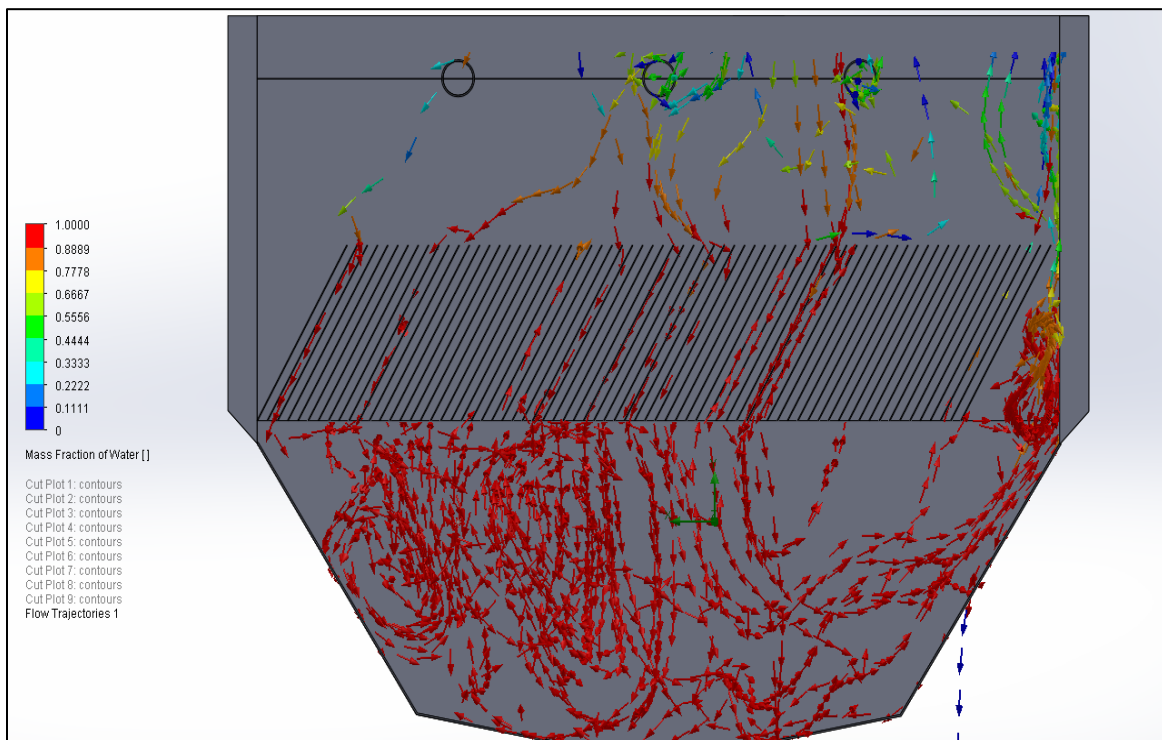


Figura 30. Distribución tridimensional de velocidades en el sedimentador para el caudal de $0,086 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)



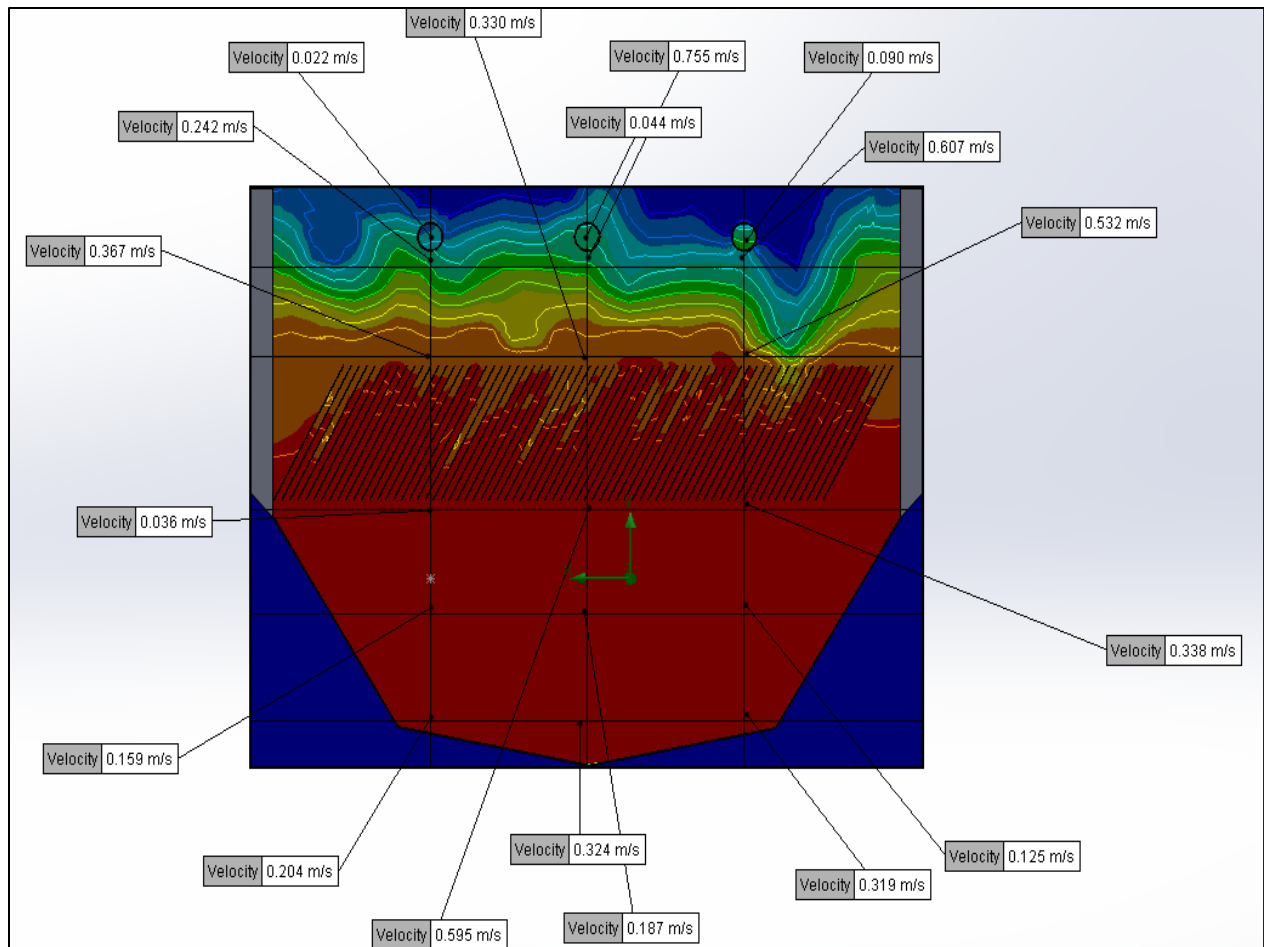


Figura 31. Distribución de velocidades en corte transversal al flujo en el centro del sedimentador

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Criterios de observación en relacion a la Figura 31, podemos indicar lo siguiente:

- 1. Uniformidad de la velocidad:** No uniforme, con marcadas variaciones en todas las zonas funcionales y capas de flujo del corte transversal.
- 2. Variación de la velocidad:** Entre 0,022 m/s y 0,755 m/s.
- 3. Ubicación de la velocidad más fuerte:** 0,755 m/s, ubicada en la Zona de Salida, justo debajo de la tubería colectora 2 (en la parte central).
- 4. Ubicación de la velocidad más lenta:** 0,022 m/s, localizada en la Zona de Salida, dentro de la tubería colectora 1.

5. Velocidad en puntos clave:

Zona de Decantación (Corte Transversal) El análisis transversal en la zona de decantación revela variaciones significativas sobre y debajo de las lamelas, como se muestra en la Tabla 17:

Tabla 20. Velocidades de flujo en la Zona de Decantación del corte transversal al flujo en el centro del sedimentador para $Q = 342,25 \text{ L/s}$

Ubicación (Dirección)	Debajo de Lamelas (m/s)	Encima de Lamelas (m/s)
Tubería 1	0,036	0,367
Tubería 2 (Central)	0,595	0,030
Tubería 3 (Extremo)	0,038	0,532

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Zona de Lodos (Corte Transversal) La distribución de velocidades en la zona de lodos se analizó en dos niveles de profundidad, como se muestra en la Tabla 18:

Tabla 21. Velocidades de flujo en la Zona de Lodos del corte transversal al flujo en el centro del sedimentador para $Q = 342,25 \text{ L/s}$

Ubicación (Dirección)	Al Ras del Suelo (Fondo) (m/s)	Un Poco Más Arriba del Suelo (m/s)
Tubería 1	0,204	0,159
Tubería 2 (Central)	0,324	0,187
Tubería 3 (Extremo)	0,319	0,125

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Zona de Salida (Corte Transversal) Las velocidades en las tuberías colectoras y justo debajo de ellas, como se muestra en la Tabla 19:

Tabla 22. Velocidades de flujo en la Zona de Salida del corte transversal al flujo en el centro del sedimentador para $Q = 342,25 \text{ L/s}$

Ubicación (Dirección)	Dentro de Tuberías (m/s)	Debajo de Tuberías (m/s)
Tubería 1	0,022 (Mín. Global)	0,242
Tubería 2 (Central)	0,044	0,755 (Máx. Global)
Tubería 3 (Extremo)	0,090	0,607

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

6. Comentario general: La simulación del corte transversal central del sedimentador revela una hidráulica altamente deficiente y con severos problemas de distribución de energía. La velocidad máxima de 0,755 m/s se concentra justo debajo de la tubería colectora central (Tubería 2), lo que indica una succión excesiva y localizada del flujo, causando un arrastre potencial de flóculos y comprometiendo la calidad del agua clarificada. Los valores de velocidad varían drásticamente desde 0,022 m/s hasta este pico. En la zona de decantación, se observan velocidades elevadas debajo de las lamelas (0,595 m/s en el centro) y encima de las lamelas (0,532 m/s en el extremo), lo que es inaceptable para un flujo laminar. La distribución en la zona de lodos, con velocidades hasta 0,324 m/s, aún representa un riesgo de resuspensión, aunque sea menor que en otras simulaciones.

7. Análisis de líneas de corriente: El análisis de las líneas de corriente en el corte transversal central confirma un patrón de flujo extremadamente turbulento y desorganizado, con formación de vórtices y movimientos erráticos:

Turbulencia en Lodos: La zona de lodos (debajo de las lamelas y al fondo) presenta una concentración masiva de movimientos circulares y turbulentos, con flechas en múltiples direcciones (abajo, arriba, izquierda, derecha, diagonales). La mayor concentración se observa entre el muro, tubería 1, tubería 2 y tubería 3, indicando una mezcla intensa y un alto riesgo de resuspensión.

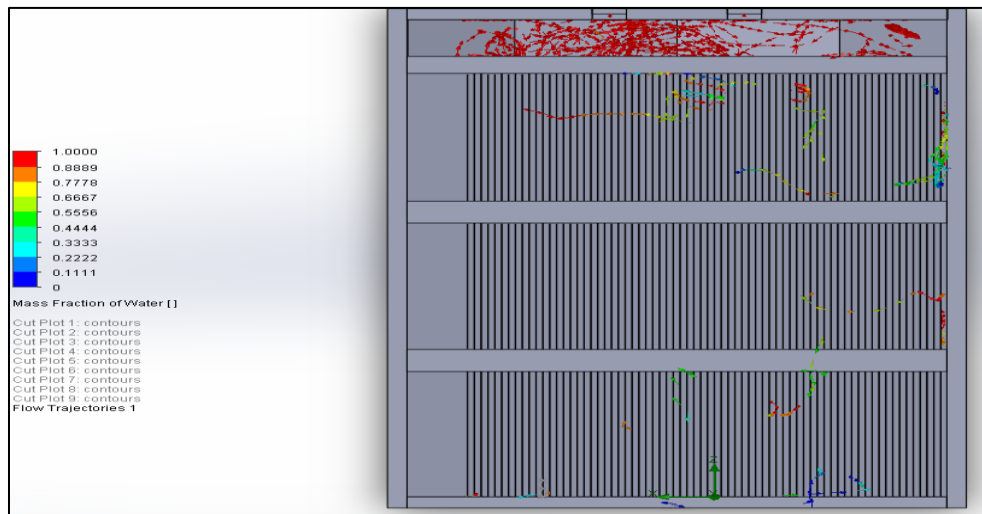
Flujo en Lamelas (Desordenado): En medio de las lamelas, el flujo es variado, con flechas que suben y bajan en la inclinación de las placas, mostrando poca uniformidad. Se observa una mayor concentración de líneas de flujo entre la tubería 2 y la tubería 3, con

predominancia de movimientos descendentes, aunque con fluctuaciones.

Succión Irregular en Salida: Encima de las lamelas y hasta la altura de los colectores, el flujo también es desordenado. Se observa una fuerte concentración de líneas de flujo, mayoritariamente descendentes y curvas, alrededor de las tuberías 2 y 3, así como entre ellas. Esto demuestra una succión irregular y desequilibrada por los orificios de recolección, confirmando las altas velocidades puntuales observadas y la falta de un flujo uniforme hacia la salida.

Inestabilidad Global: En general, el patrón de flujo carece de la linealidad y la calma necesarias para la sedimentación, con áreas de fuerte actividad turbulenta y flujos preferenciales, comprometiendo la eficiencia del tratamiento.

8. Concordancia con los criterios teóricos: Los resultados de la simulación del corte transversal central son drásticamente inconsistentes con los criterios teóricos de diseño. La velocidad máxima de 0,755 m/s debajo de la tubería colectora central es excesivamente alta y generaría un arrastre de flóculos inaceptable hacia la filtración. Las velocidades en la zona de decantación (hasta 0,595 m/s debajo de lamelas y 0,532 m/s encima de lamelas) y en la zona de lodos (hasta 0,324 m/s) superan los límites permitidos para un flujo laminar y estable. La intensa turbulencia y los patrones de flujo desorganizados observados en las líneas de corriente confirman la ausencia de un flujo pistón y la ineficiente disipación de energía. Se reitera que el diseño actual presenta fallas fundamentales en la distribución de flujo y la capacidad de decantación, haciendo indispensable un rediseño integral del sedimentador.



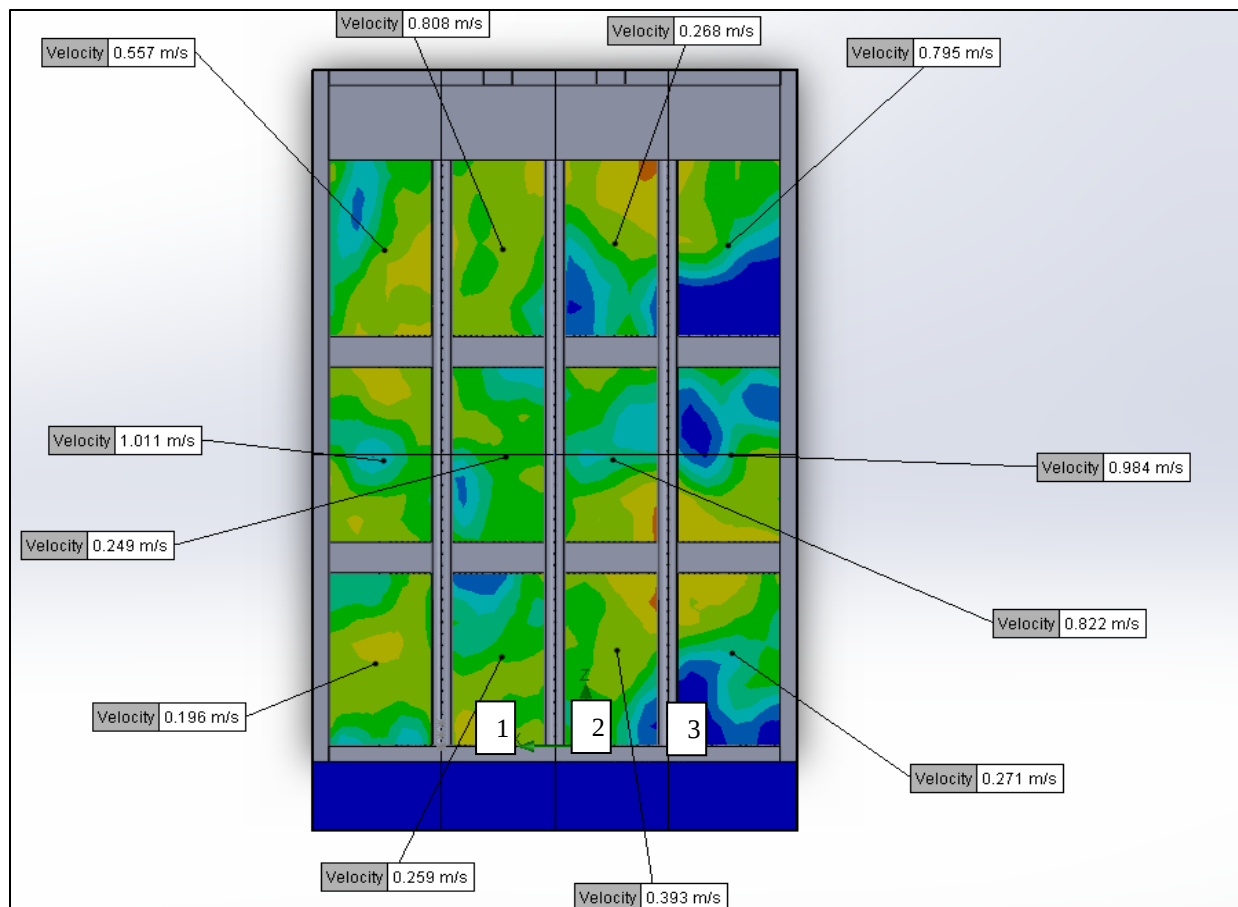


Figura 32. Distribución de velocidades en planta a la altura de las tuberías de entrada

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Criterios de observación en relacion a la Figura 32, podemos indicar lo siguiente:

- 1. Uniformidad de la velocidad:** No uniforme, con extremas variaciones tanto longitudinal como transversalmente en esta vista a la altura de las tuberías colectoras.
- 2. Variación de la velocidad:** Entre 0,196 m/s y 1,011 m/s.
- 3. Ubicación de la velocidad más fuerte:** 1,011 m/s, ubicada en el Segundo Tercio Central de longitud, entre el muro/pared y la tubería 1.
- 4. Ubicación de la velocidad más lenta:** 0,196 m/s, en el Tercer Tercio Final de longitud, entre el muro/pared y la tubería 1.
- 5. Velocidad en puntos clave:** Vista en Planta a la Altura de las Tuberías de Entrada (Transversalmente). Se observa la distribución de velocidades a lo largo del ancho del

sedimentador en tres tercios longitudinales, como se muestra en la Tabla 20.

Tabla 23. Velocidades de flujo en la Zona de Salida de la vista en planta a la altura de las tuberías de entrada para $Q = 342,25 \text{ L/s}$

Tercio Longitudinal	Entre Muro y Tubería 1 (m/s)	Entre Tubería 1 y Tubería 2 (m/s)	Entre Tubería 2 y Tubería 3 (m/s)	Entre Tubería 3 y Muro (m/s)
Primer Tercio (Entrada)	0,557	0,808	0,268	0,795
Segundo Tercio (Central)	1,011 (Máx. Global)	0,249	0,822	0,984
Tercer Tercio (Final)	0,196 (Mín. Global)	0,259	0,393	0,271

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

6. Comentario general: La distribución de velocidades a la altura de las tuberías de entrada en esta vista en planta es críticamente no uniforme, con un rango de variación entre 0,196 m/s y 1,011 m/s. El pico de 1,011 m/s en el segundo tercio central (entre muro y tubería 1), y valores muy altos como 0,984 m/s y 0,822 m/s en el mismo tercio, demuestran un cortocircuito masivo y un flujo preferencial descontrolado hacia ciertos canales de salida. Las velocidades elevadas en el primer tercio (hasta 0,808 m/s) también son problemáticas. La existencia de una velocidad mínima de 0,196 m/s en el tercer tercio (zona de estancamiento) subraya la ineficiencia global de la recolección del agua clarificada y la falta de aprovechamiento de toda la superficie disponible.

7. Análisis de líneas de corriente (Vista Superior de las Lamelas): El análisis de las líneas de corriente (vista superior de las lamelas, mirando hacia abajo) revela un patrón de flujo altamente irregular, turbulento y con extensas zonas muertas, demostrando una ineficiente distribución del caudal:

Concentración en Entrada y Turbulencia: En la zona de entrada, hay una alta concentración de líneas de flujo y un patrón predominantemente turbulento (movimientos circulares, flechas en múltiples direcciones: izquierda, derecha, arriba, abajo, diagonales). Esto se observa especialmente entre las tuberías 1, 2 y 3, indicando una inyección desordenada y de alta energía.

Zonas Muertas Críticas (Estancamiento): Es muy significativo que, en el primer tercio longitudinal, desde la tubería 1 hacia el muro/pared lateral (izquierda), no se observa ninguna línea de flujo. Esto indica una zona muerta completa, donde el agua no circula, impidiendo cualquier proceso de decantación. Similarmente, en el segundo y tercer tercio longitudinal, la mayor parte del área (desde tubería 1 al muro/pared y de tubería 2 a muro/pared) carece de líneas de flujo, confirmando extensas áreas de estancamiento.

Flujo Limitado y Desorganizado: A diferencia de la entrada, en el primer tercio longitudinal (sobre las lamelas), la cantidad de líneas de flujo es muy escasa y se observa un patrón errático (flechas hacia la izquierda, derecha, curvas). En el segundo tercio central, la actividad es mucho menor, concentrándose un poco solo cerca de la tubería 3 y el muro. En el tercer tercio final, la actividad es igualmente muy limitada, con una pequeña concentración entre la tubería 2 y la tubería 3.

Implicación Global: La combinación de una entrada turbulenta, zonas muertas masivas y una distribución de flujo muy deficiente sobre las lamelas (donde el caudal es escaso y desorganizado), demuestra un cortocircuito hidráulico severo que anula la eficiencia de la decantación. El flujo no está utilizando la mayor parte de la superficie lamelar, haciendo el diseño inoperante.

8. Concordancia con los criterios teóricos: Los resultados de la simulación de esta vista en planta a la altura de las tuberías de entrada son completamente inconsistentes con los criterios hidráulicos teóricos para decantadores lamelares. La velocidad máxima de 1,011 m/s (3,64 m/h) y otros picos elevados (hasta 0,984 m/s) en las zonas de recolección están muy por encima de los límites de velocidad horizontal (V_h) aceptables para un flujo que debe ser laminar y uniforme. La presencia de extensas zonas muertas (sin líneas de flujo) y la turbulencia concentrada en la entrada y en puntos específicos, demuestran un cortocircuito hidráulico masivo y una ineficiente utilización del volumen del sedimentador. Este patrón invalida por completo el concepto de flujo pistón y la función de las lamelas. Se concluye que el diseño actual presenta fallas estructurales y operacionales críticas, haciendo imperativo un rediseño radical del sistema de distribución y recolección para lograr la uniformidad y eficiencia esperadas.

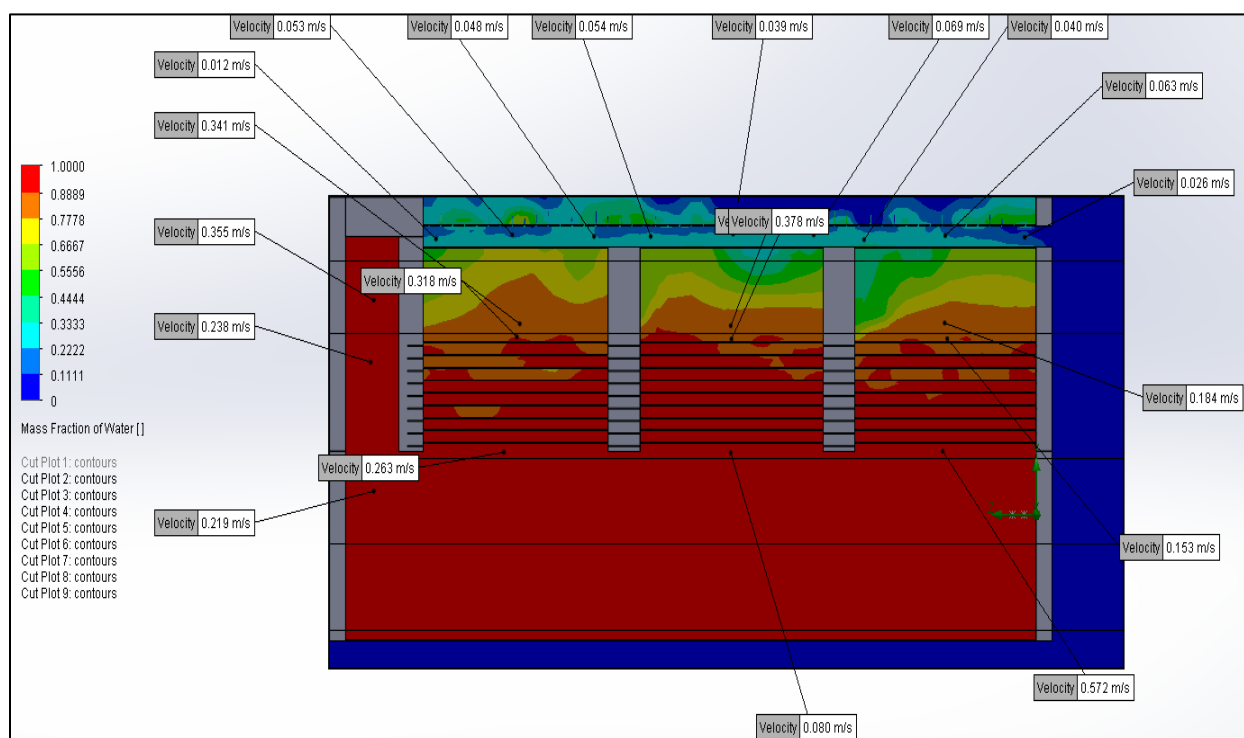
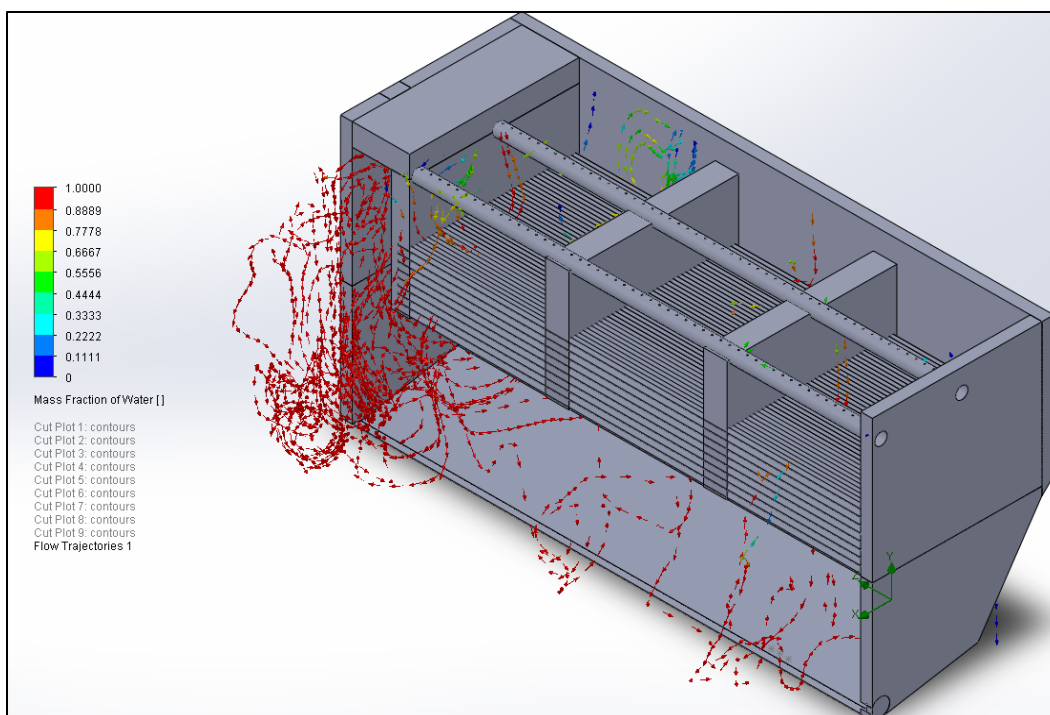


Figura 33. Distribución de velocidades en corte longitudinal por la tubería lateral izquierda (1)

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Criterios de observación en relacion a la Figura 33, podemos indicar lo siguiente:

1. Uniformidad de la velocidad: No uniforme, con variaciones significativas que indican una distribución irregular del flujo tanto vertical como longitudinalmente.

2. Variación de la velocidad: Entre 0,012 m/s y 0,572 m/s.

3. Ubicación de la velocidad más fuerte: 0,572 m/s, ubicada en la Zona de Decantación, debajo de las lamelas, en el tercer tercio final de longitud.

4. Ubicación de la velocidad más lenta: 0,012 m/s, localizada en la Zona de Salida (tubería colectora), en el inicio del primer tercio longitudinal.

5. Velocidad en puntos clave:

Zona de Entrada (Gradiente Vertical) La entrada presenta un gradiente vertical de velocidad:

Cerca de la Superficie (Junto a la Compuerta): 0,355 m/s.

Inmediatamente Debajo: 0,238 m/s.

A Media Altura (Debajo de Lamelas, pero en Entrada): 0,219 m/s.

Zona de Decantación (Capas de Flujo) La distribución de velocidades en las tres capas dentro y alrededor de las lamelas, como se muestra en la Tabla 21.

Tabla 24. Velocidades de flujo en la Zona de Decantación del corte longitudinal por la tubería lateral izquierda (1) para $Q = 342,25 \text{ L/s}$

Capa Vertical	Primer Tercio (m/s)	Segundo Tercio (Central) (m/s)	Tercer Tercio (Final) (m/s)
Encima de Lamelas	0,341	No Disponible	0,184
En Medio de Lamelas	0,318	0,378m/s	0,153
Debajo de Lamelas	0,219	0,080m/s	0,572 (Máx. Global)

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Zona de Salida (Tubería Colectora) El perfil de velocidad a lo largo de la tubería colectora muestra bajas velocidades, pero con un mínimo extremo:

Primer Tercio: 0,012 (Mín. Global) → 0,053 → 0,048 m/s.

Segundo Tercio: 0,054 → 0,039 → 0,069 m/s.

Tercer Tercio: 0,040 → 0,063 → 0,026 m/s.

6. Comentario general: Este corte longitudinal por la tubería 1 revela una hidráulica con problemas significativos de distribución de flujo y uniformidad. La velocidad máxima de 0,572 m/s en la zona de decantación (debajo de las lamelas, tercio final) es inaceptablemente alta, lo que indica un flujo preferencial y una aceleración descontrolada hacia la salida de la zona de lodos. Aunque las velocidades en el colector son bajas (min. 0,012 m/s), la inuniformidad interna, con valores elevados en la entrada (0,355 m/s) y en medio de las lamelas (0,378 m/s), compromete la eficiencia de la decantación. La presencia de velocidades elevadas en la zona de lodos del tercio final representa un riesgo de resuspensión de las partículas.

7. Análisis de líneas de corriente: El análisis de las líneas de corriente (vista 3D) corrobora un patrón de flujo turbulento y desorganizado, especialmente en las zonas de entrada y lodos, con poca actividad en las lamelas:

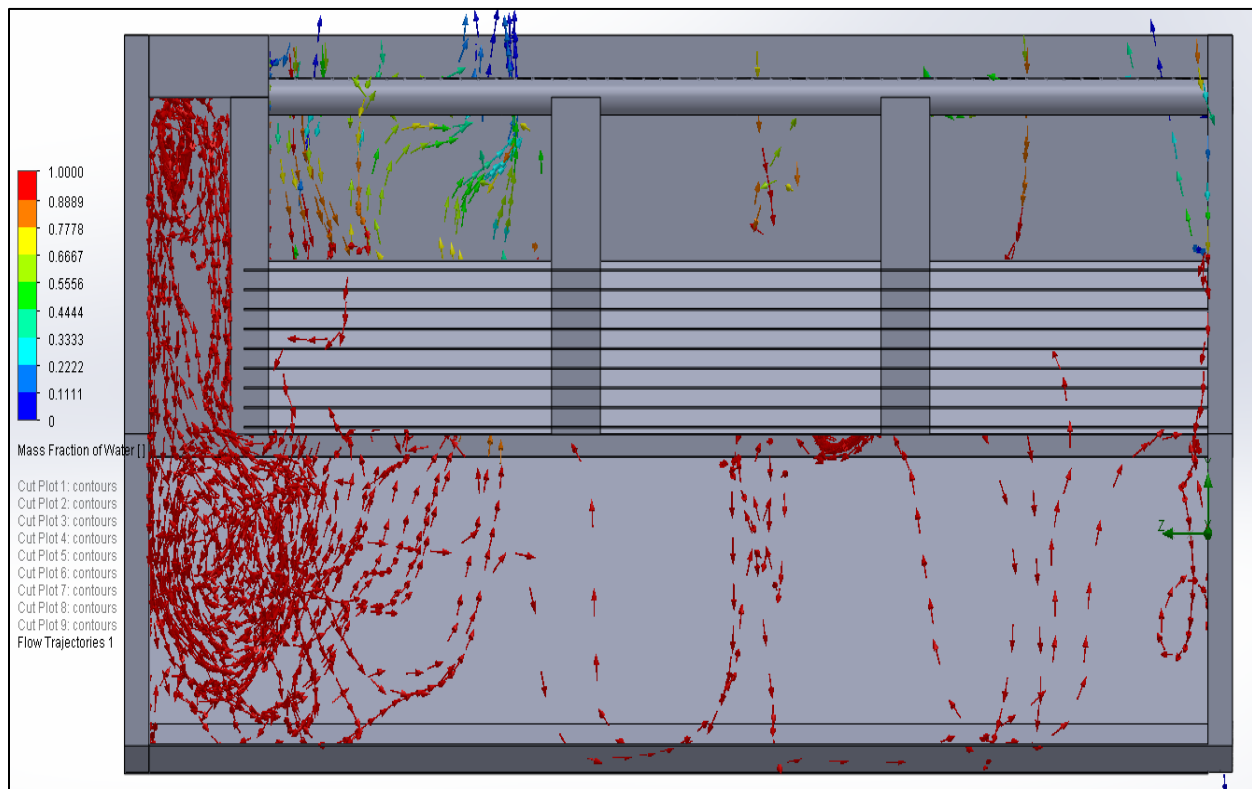
Zona de Entrada (Turbulencia Severa): La zona de entrada muestra una alta concentración de líneas de flujo y movimientos circulares muy turbulentos, con flechas en múltiples direcciones (verticales predominantes, pero también horizontales, diagonales y curvas). Esta turbulencia inicial indica una energía de inyección excesiva que no se disipa adecuadamente.

Zona de Lodos (Actividad Errática): A lo largo del fondo del sedimentador (primer, segundo y tercer tercio), las líneas de flujo muestran movimientos circulares y curvas en varias direcciones, aunque con menor intensidad que en la entrada. Esto sugiere un movimiento errático en la zona de lodos, con riesgo de resuspensión. La ausencia de líneas de flujo en medio de las lamelas es una anomalía.

Flujo en Lamelas (Bajo y Desorganizado): Encima de las lamelas, la actividad de las líneas de flujo es muy escasa, especialmente en el segundo y tercer tercio. Donde hay flujo

(principalmente en el primer tercio), las flechas indican movimientos ascendentes predominantes, pero en cantidades limitadas. Esto demuestra que el caudal no está utilizando de manera eficiente toda la superficie lamelar, lo que resulta en una baja eficiencia de decantación en estas secciones.

8. Concordancia con los criterios teóricos: Los resultados de la simulación de este corte longitudinal por la tubería 1 son inconsistentes con los criterios teóricos de diseño. La velocidad máxima de 0,572 m/s en la zona de decantación (debajo de las lamelas) es excesivamente alta y supera con creces los límites para un flujo laminar en la zona de lodos, lo que garantiza la resuspensión de las partículas. Asimismo, las velocidades en la entrada (0,355 m/s) y en medio de las lamelas (0,378 m/s) también son superiores a los valores recomendados para un flujo estable y la integridad de los flóculos. La turbulencia general y los patrones de flujo desorganizados en las líneas de corriente confirman que el diseño actual no logra la disipación de energía, la uniformidad de flujo ni el régimen de flujo pistón esperados. Se concluye que el diseño presenta fallas críticas que comprometen gravemente la eficiencia del sedimentador, requiriendo un rediseño integral del sistema.



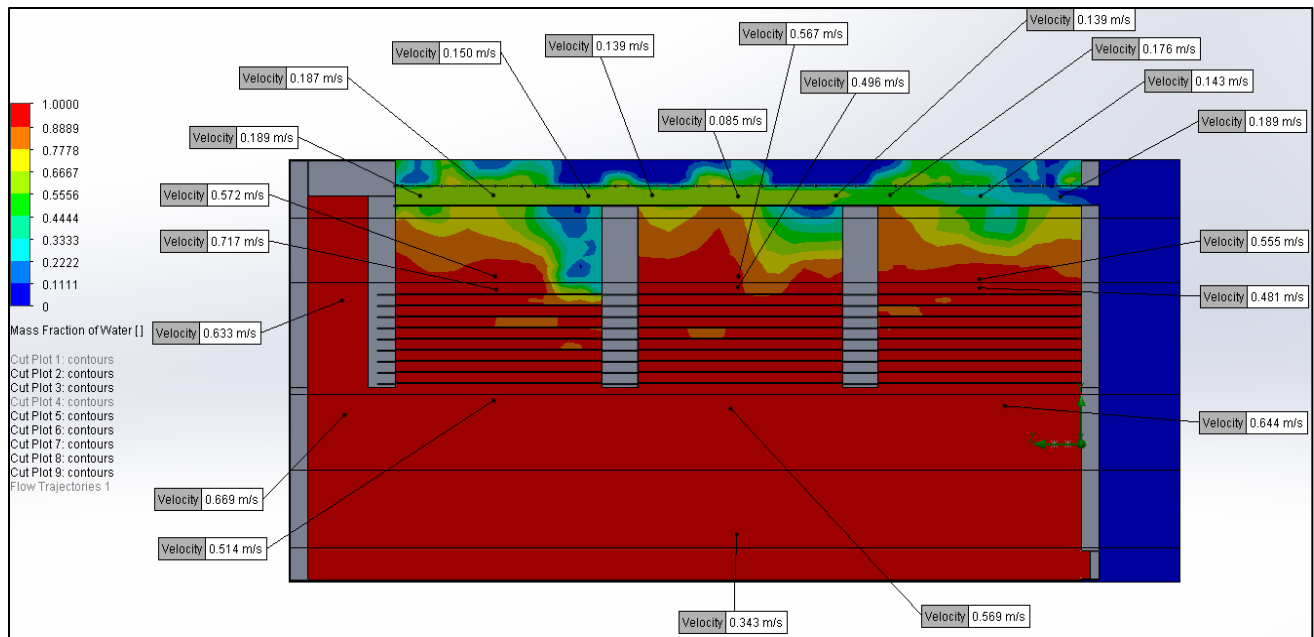


Figura 34. Distribución de velocidades en corte longitudinal por la tubería central (2)

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Criterios de observación en relacion a la Figura 34, podemos indicar lo siguiente:

Criterio 1: Uniformidad de la velocidad

- Observación: La velocidad no es uniforme, ya que varía drásticamente desde un mínimo de 0,085 m/s hasta un máximo de 0,717 m/s.
- Análisis: Esta diferencia de 0,632 m/s entre los puntos extremos es inaceptable para un proceso de sedimentación. La falta de uniformidad implica que el tiempo de retención hidráulica (TRH) es muy diferente para distintas zonas del sedimentador, con una gran porción del caudal tomando un "camino corto" (cortocircuito).

Criterio 2: Variación de la velocidad (V_{min} y V_{max})

- Observación: La variación de la velocidad se encuentra entre 0,085 m/s y 0,717 m/s.
- Análisis: El valor máximo (0,717 m/s) es excesivamente alto. Comparado con la velocidad horizontal ideal para la decantación (V_h , ideal 0,02 m/s), el valor máximo es más de 35 veces superior. Esto confirma que la fuerza de arrastre hidrodinámico es muchísimo mayor que la fuerza de sedimentación de los flóculos, provocando su arrastre masivo.

Criterio 3: Ubicación de la velocidad más fuerte (Vmax)

- Observación: La velocidad máxima de 0,717 m/s está ubicada en la zona de decantación, encima de las lamelas o placas inclinadas, en el 1er tercio longitudinal.
- Análisis: Esta es la zona más crítica. La localización de Vmax en el tercio inicial, justo donde el flujo entra en contacto con las lamelas, genera un efecto jet o chorro de alta velocidad. Este chorro:
 - Corta la lámina de agua de las lamelas.
 - Anula el área de decantación superficial útil, ya que los flóculos son succionados hacia la salida antes de tener la oportunidad de sedimentar.

Criterio 4: Ubicación de la velocidad más lenta (Vmin)

- Observación: La velocidad más lenta (0,085 m/s) se encuentra en la zona de salida, en la tubería colectora de agua, en el 2do tercio central, justo en el centro.
- Análisis: La ubicación en la tubería colectora (el punto de menor energía) es esperada. Sin embargo, un valor de 0,085 m/s sigue siendo considerablemente alto para un punto de efluente y es indicativo de un flujo de salida concentrado y con cierta turbulencia, aunque sea el punto más lento de la unidad. Además, al estar justo en el centro, puede indicar una zona de estancamiento parcial que no contribuye al flujo horizontal efectivo.

Criterio 5: Velocidad en puntos clave

- **Zona de Entrada (debajo de las lamelas, cerca de la compuerta):** Se observan velocidades de 0,633 m/s y 0,669 m/s.
 - Análisis: Las velocidades aquí son altísimas. La velocidad de 0,669 m/s por debajo de las lamelas demuestra que la energía del chorro de entrada penetra profundamente en la unidad, no permitiendo que el flujo se distribuya adecuadamente incluso en la zona inferior.
- **Zona de Decantación (Debajo de Lamelas):**
 - 1er Tercio: 0,514 m/s
 - 2do Tercio: 0,569 m/s

- 3er Tercio: 0,644 m/s
- Análisis: Es preocupante que las velocidades aumenten ligeramente hacia el final de la zona de decantación (0,514→0,644 m/s). Esto es completamente contrario al diseño ideal, donde las velocidades deberían disminuir para favorecer la sedimentación.
- **Zona de Decantación (Encima de Lamelas):**
 - 1er Tercio (Máx.): 0,717 m/s
 - 2do Tercio: 0,496 m/s
 - 3er Tercio: 0,481 m/s
 - Análisis: Se observa una disminución del impacto del chorro después del 1er tercio, pero incluso los valores del 2do y 3er tercio ($\approx 0,5$ m/s) son extremadamente destructivos para la sedimentación.
- **Zona de Lodos:**
 - 2do Tercio Central: 0,343 m/s
 - Análisis: Este valor es alarmante. La velocidad en la zona de lodos no debería superar 0,01 m/s a 0,015 m/s para evitar la resuspensión. El valor de 0,343 m/s garantiza la resuspensión continua y violenta del material sedimentado, lo cual anula el propósito del decantador.
- **Zona de Salida (Tubería Colectora):**
 - Velocidades entre 0,189 m/s y 0,085 m/s.
 - Análisis: Si bien son las velocidades más bajas de la unidad, todavía son altas y demuestran que el efluente está siendo arrastrado a una velocidad significativa, lo que implica una alta concentración de sólidos en el agua tratada.

Criterio 6: Comentario general

Análisis de Síntesis: Este corte longitudinal revela que la unidad opera bajo un régimen de flujo de cortocircuito hidrodinámico (cortocircuito) severo y un flujo tipo jet concentrado

inmediatamente después de la entrada. La energía cinética del chorro no solo anula el área de decantación efectiva en el primer tercio, sino que también penetra hasta la zona de lodos, manteniendo el material ya sedimentado en suspensión. El problema principal no es solo el arrastre, sino la recirculación de lodos debido a la altísima velocidad en el fondo. La unidad, en estas condiciones, es ineficaz como sedimentador.

Criterio 7: Análisis de líneas de corriente

- **Zona de Entrada:** Se observa una turbulencia extrema (movimientos circulares/flechas en todas direcciones: abajo, arriba, cerca del fondo).
 - Análisis: Confirma la alta energía cinética que rompe los flóculos y genera un flujo no dirigido, invalidando cualquier esfuerzo de sedimentación en el área adyacente.
- **Zona de Decantación (Debajo de Lamelas):** Turbulencia en el 1er tercio, líneas de corriente más juntas en el 2do tercio y separadas en el 3er tercio. Predominan direcciones hacia arriba y curvas.
 - Análisis: La turbulencia en el 1er tercio es un efecto de borde de la zona de entrada. Las líneas que suben y bajan o son curvas demuestran que, en lugar de un flujo laminar horizontal ideal, existe una recirculación y ascenso de partículas que entran al espacio laminar de las placas, lo que reduce la eficiencia de colección de las lamelas.
- **Zona de Lodos:** Muy pocas líneas de flujo, pero más en el 1er tercio y muy pocas en los tercios 2 y 3.
 - Análisis: Aunque la cantidad de líneas es baja (propio de la zona de lodos), su existencia, especialmente en el 1er tercio, y la velocidad de 0,343 m/s confirman que hay suficiente movimiento para re-movilizar y resuspender los sólidos, lo cual es inaceptable.
- **Zona de Salida:** Muchas líneas de flujo en el 1er tercio y pocas en los tercios 2 y 3. Predominan líneas que suben y bajan.
 - Análisis: La concentración de líneas en el 1er tercio de la zona de salida (la más cercana al flujo principal) indica que el flujo más rápido se dirige directamente a

esa sección. Las líneas que suben y bajan confirman que hay remolinos que arrastran agua (y sólidos) desde abajo hacia la tubería colectora.

Criterio 8: Concordancia con criterios teóricos

- Velocidad Horizontal (Vh): El valor máximo de 0,717 m/s es totalmente discordante con el requisito teórico de $V_h \leq 0,02$ m/s (o idealmente menor) que establecen normas como la NB-689 y guías de la OPS (2005). El flujo está muy por encima del régimen laminar requerido.
- Flujo en Zona de Lodos: El valor de 0,343 m/s en la zona de lodos es más de 20 veces superior al límite aceptable (0,01 a 0,015 m/s) para prevenir la resuspensión. Esto supera los principios de operación de un sedimentador.
- Conclusión Teórica: La simulación muestra un déficit hidráulico estructural y operativo, caracterizado por una distribución de velocidades no uniforme, un severo fenómeno de cortocircuito y una intensa turbulencia que anula la eficiencia de decantación. El diseño de la cámara de entrada no proporciona la amortiguación ni la distribución uniforme necesarias para un decantador laminar.

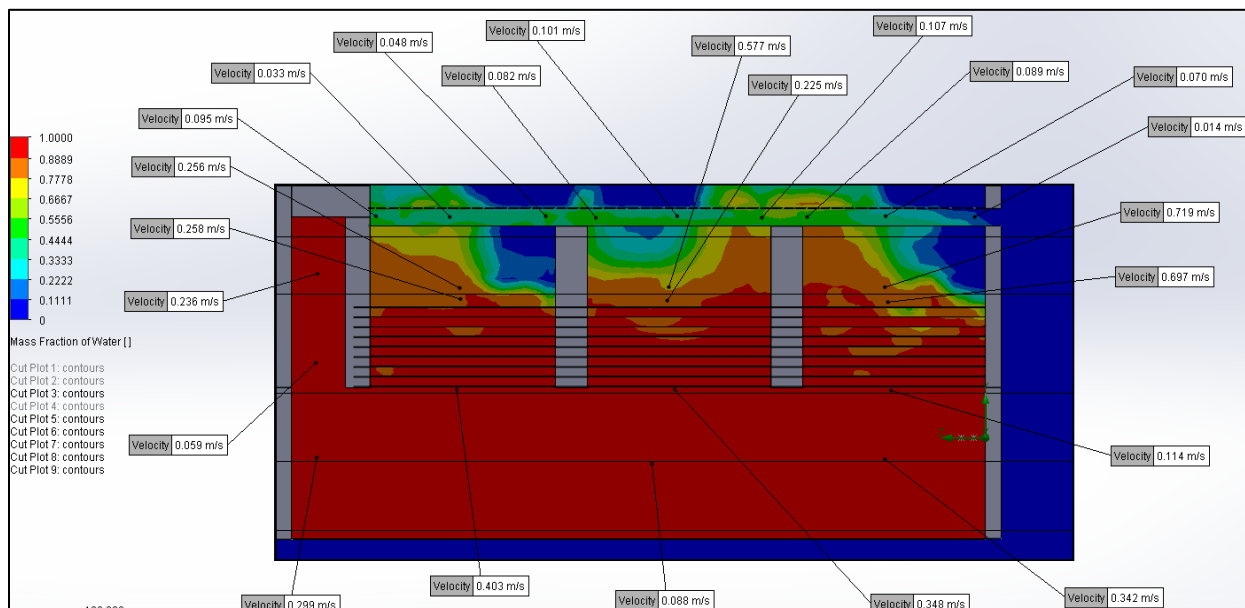


Figura 35. Distribución de velocidades en corte longitudinal por la tubería lateral derecha (3)

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Criterios de observación en relación a la Figura 35, podemos indicar lo siguiente:

1. Uniformidad de la velocidad: No uniforme, con marcadas variaciones en las capas de flujo y una aceleración severa hacia el final del sedimentador.

2. Variación de la velocidad: Entre 0,033 m/s y 0,719 m/s.

3. Ubicación de la velocidad más fuerte: 0,719 m/s, ubicada en la Zona de Decantación (encima de las lamelas, en la capa superior), en el tercer tercio final de longitud.

4. Ubicación de la velocidad más lenta: 0,033 m/s, localizada en la Zona de Salida (tubería colectora), dentro del tubo, en el primer tercio inicial de longitud.

5. Velocidad en puntos clave:

Zona de Entrada (Gradiente Vertical) Se observan tres velocidades con variación a lo largo de la altura:

- Cerca de la superficie, junto a la compuerta, se registra una velocidad de 0,236 m/s.
- A una altura media (cerca del inicio de las lamelas), la velocidad desciende a 0,059 m/s.
- Cerca de la capa de lodos (por encima del piso), la velocidad asciende a 0,229 m/s.

Zona de Decantación (Capas de Flujo) Las velocidades se analizan a lo largo de la longitud del sedimentador en tres capas verticales:

- **Debajo de las Lamelas (Zona de Lodos):** Se observa una tendencia decreciente seguida de una velocidad más baja. En el primer tercio es de 0,403 m/s, en el segundo tercio es 0,348 m/s, y en el tercer tercio es 0,114 m/s.
- **Encima de las Lamelas (Capa Inferior):** Las velocidades son 0,258 m/s (primer tercio), 0,225 m/s (segundo tercio) y 0,697 m/s (tercer tercio).
- **Encima de las Lamelas (Capa Superior):** Se registra una fuerte aceleración hacia el final. Las velocidades son 0,256 m/s (primer tercio), 0,577 m/s (segundo tercio) y el valor máximo global de 0,719 m/s (tercer tercio).

Zona de Lodos (Sobre el Fondo) Se identifican dos velocidades por encima del nivel del

piso:

- En el segundo tercio longitudinal, la velocidad es de 0,088 m/s.
- En el tercer tercio longitudinal, la velocidad es de 0,342 m/s.

Zona de Salida (Tubería Colectora). El flujo en la tubería presenta un perfil irregular:

- **Primer Tercio:** 0,095 m/s; 0,033 m/s (Mínimo Global); 0,048 m/s.
- **Segundo Tercio (Central):** 0,082 m/s; 0,101 m/s; 0,107 m/s.
- **Tercer Tercio (Final):** 0,089 m/s; 0,070 m/s; 0,014 m/s.

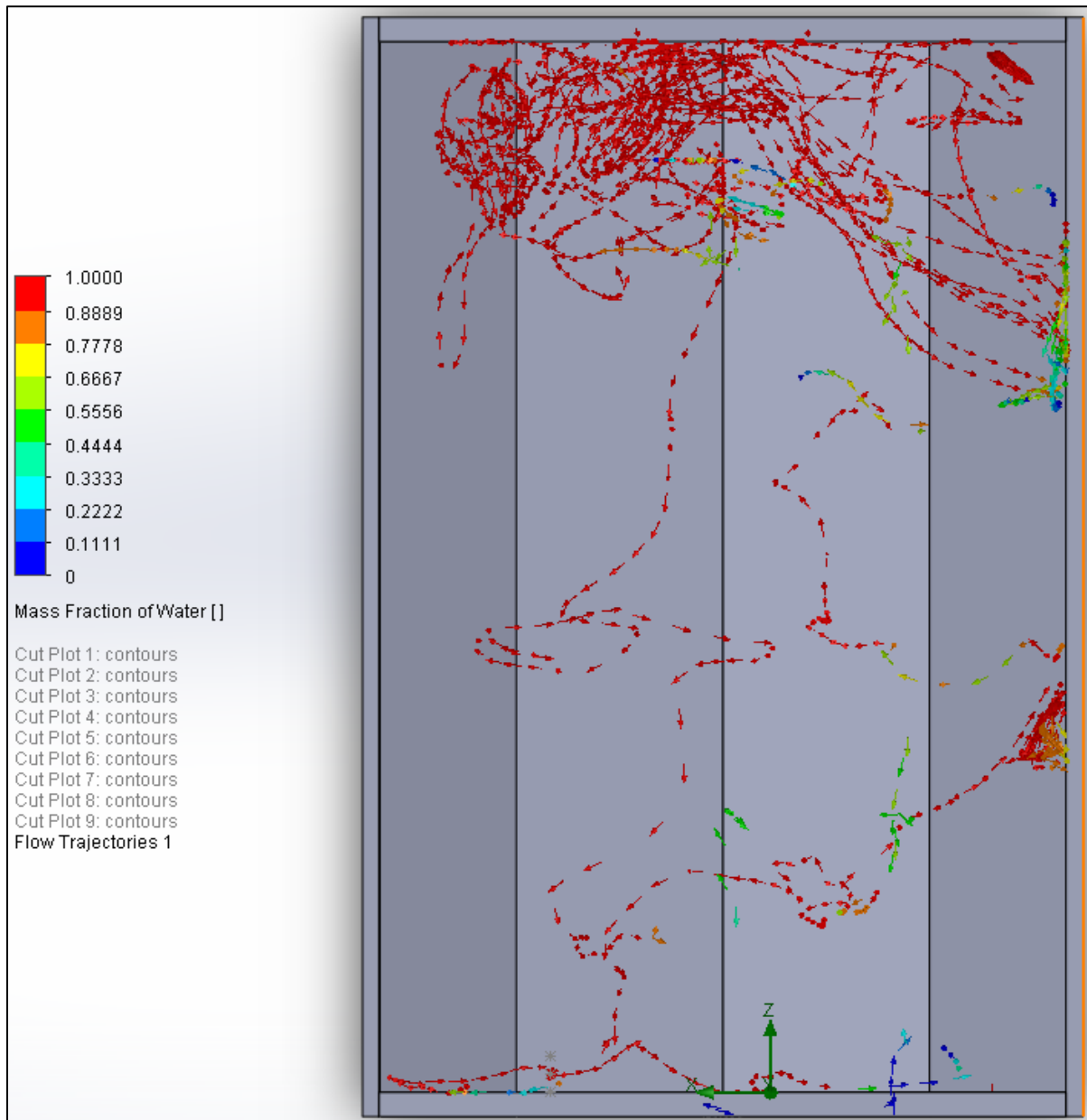
6. Comentario general: Este corte longitudinal lateral reafirma los fallos hidráulicos críticos del diseño. La velocidad máxima de 0,719 m/s concentrada en la zona de clarificación del tercio final indica un cortocircuito masivo y descontrolado. Este fenómeno provoca que el agua clarificada sea acelerada bruscamente en la salida sin aprovechar eficientemente la superficie lamelar a lo largo de toda su longitud. Las velocidades en la zona de lodos del primer y segundo tercio (0,403 m/s y 0,348 m/s) son también elevadas, representando un riesgo continuo de resuspensión de flóculos. Aunque la velocidad mínima de 0,033 m/s en la tubería de salida es baja, el perfil general de flujo en las capas funcionales es inestable y, por lo tanto, la eficiencia de remoción será severamente comprometida.

7. Análisis de líneas de corriente: No se dispone del gráfico de líneas de corriente para este corte longitudinal, por lo que el análisis de la turbulencia y los patrones de flujo se basa únicamente en los datos de velocidad y las tendencias observadas en los demás cortes. Sin embargo, la drástica aceleración del flujo hacia el tercio final y las altas velocidades registradas (0,719 m/s) son un fuerte indicativo de trayectorias de flujo inestables, no uniformes y de cortocircuito, lo cual es corroborado por los demás análisis

8. Concordancia con los criterios teóricos: Los resultados de la simulación de este corte longitudinal son totalmente inconsistentes con los criterios hidráulicos teóricos para decantadores laminares. La velocidad horizontal del flujo (V_h) en la zona de clarificación debe ser laminar y muy baja (cercana a la velocidad de desborde V_o). El valor de 0,719 m/s es miles de veces superior al límite recomendado, lo que garantiza la destrucción, el arrastre de flóculos y la ineficiencia de la unidad. Asimismo, las velocidades en la zona de lodos del primer y segundo tercio (hasta 0,403

m/s) superan la velocidad crítica de arrastre (V_a), lo que confirma el riesgo de resuspensión de las partículas ya sedimentadas. La falta de uniformidad y la alta velocidad concentrada en el tercio final demuestran la ausencia de un flujo pistón.

Conclusión General: El diseño actual del sedimentador presenta algunas fallas estructurales y operacionales críticas, comprometiendo gravemente la eficiencia. Se requiere un rediseño integral del sistema de distribución para corregir la hidráulica.



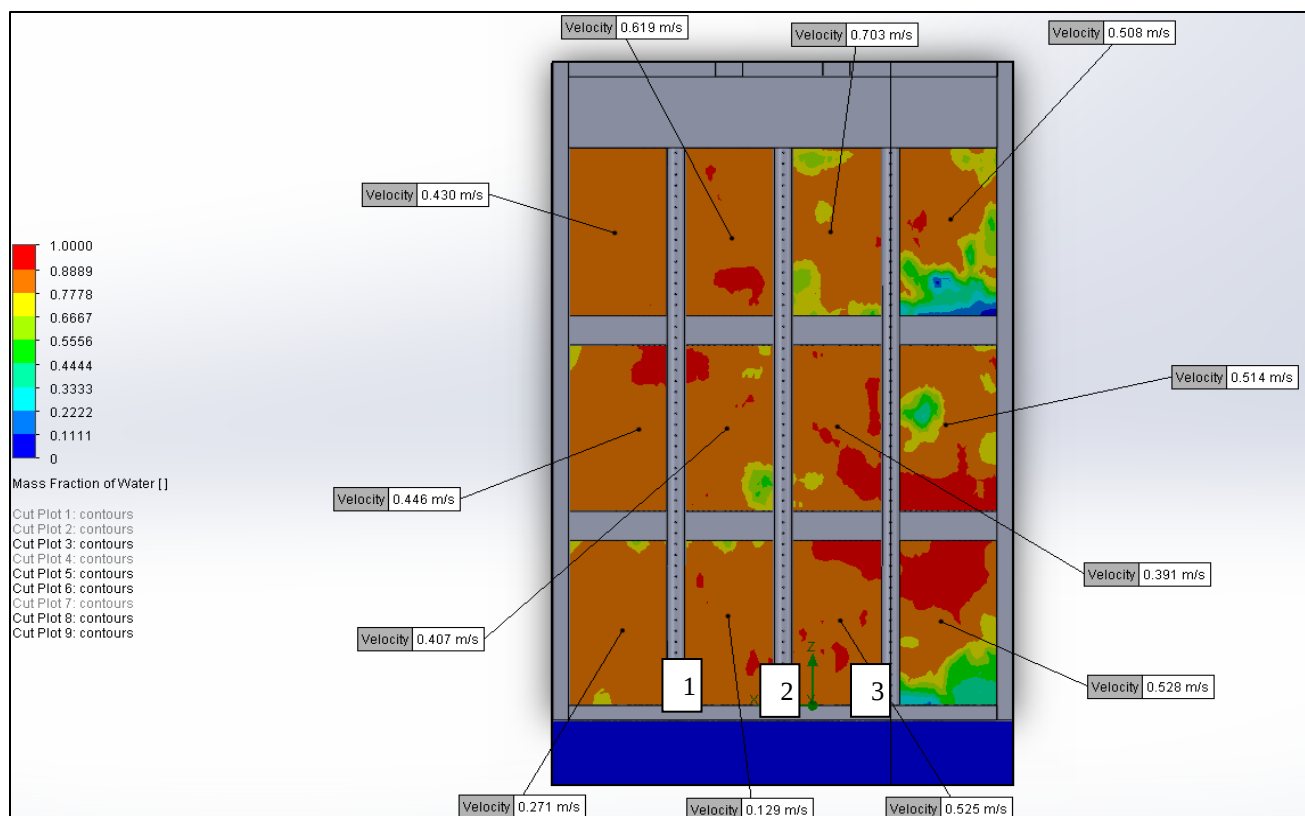


Figura 36. Distribución de velocidades en planta sobre las placas inclinadas del sedimentador

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Criterios de observación en relacion a la Figura 36, podemos indicar lo siguiente:

- 1. Uniformidad de la velocidad:** No uniforme, con variación extrema a lo largo del ancho del sedimentador, especialmente marcada entre el primer y el tercer tercio longitudinal.
- 2. Variación de la velocidad:** Entre 0,129 m/s y 0,703 m/s.
- 3. Ubicación de la velocidad más fuerte:** 0,703 m/s, ubicada en el Primer Tercio Longitudinal (Entrada), sobre las lamelas, entre la tubería 2 y la tubería 3.
- 4. Ubicación de la velocidad más lenta:** 0,129 m/s, localizada en el Tercer Tercio Longitudinal (Salida), sobre las lamelas, entre la tubería 1 y la tubería 2.
- 5. Velocidad en puntos clave:**

Vista en Planta (Sobre las Lamelas) Se observa la distribución de velocidades a lo largo del

ancho del sedimentador en tres tercios longitudinales:

Primer Tercio (Entrada): La velocidad más fuerte de este tercio (0,703 m/s) se ubica entre Tubería 2 y Tubería 3. Otros valores son 0,430 m/s (Muro-T1), 0,619 m/s (T1-T2) y 0,508 m/s (T3-Muro).

Segundo Tercio (Central): Las velocidades son 0,446 m/s (Muro-T1), 0,407 m/s (T1-T2), 0,391 m/s (T2-T3) y 0,514 m/s (T3-Muro).

Tercer Tercio (Final): Se encuentra la velocidad más lenta (0,129 m/s) entre Tubería 1 y Tubería 2. Otros valores son 0,271 m/s (Muro-T1), 0,525 m/s (T2-T3) y 0,528 m/s (T3-Muro).

6. Comentario general: La vista en planta sobre las lamelas revela una distribución de flujo altamente inuniforme e ineficiente. La velocidad máxima de 0,703 m/s en el primer tercio indica una inyección de caudal descontrolada y concentrada en la sección central-derecha, causando un cortocircuito. Es notable la fuerte reducción de velocidad en el tercer tercio (hasta 0,129 m/s en la zona T1-T2), lo que sugiere zonas de estancamiento en el tercio final. Sin embargo, otras secciones de ese mismo tercio (T2-T3 y T3-Muro) presentan un aumento de velocidad de más de 0,500 m/s, lo que subraya la extrema falta de uniformidad transversal y longitudinal del flujo sobre la superficie de decantación.

7. Análisis de líneas de corriente (Debajo de las Lamelas): El gráfico de líneas de corriente (debajo de las lamelas) revela que la zona de lodos está dominada por la turbulencia concentrada en el centro y la falta de actividad en los extremos:

Turbulencia Concentrada: La mayor concentración de movimientos circulares, flechas en múltiples direcciones (izquierda, derecha, arriba, abajo, curvas) se observa en el Primer Tercio Longitudinal, especialmente entre la Tubería 1, Tubería 2 y Tubería 3. Esta intensa actividad turbulenta es crítica para la zona de lodos y garantiza la resuspensión de partículas.

Flujo Centralizado: En el segundo y tercer tercio longitudinal, la actividad de las líneas de corriente se reduce significativamente y se concentra principalmente alrededor de las tuberías (T1, T2 y T3).

Zonas de Estancamiento: El análisis visual confirma que en los extremos (Muro-T1 y Muro-T3) de los tres tercios, el movimiento de las líneas de flujo es mínimo o nulo, lo que implica la existencia de zonas muertas o estancadas, especialmente en los costados de las paredes.

8. Concordancia con los criterios teóricos: Los resultados de esta simulación son completamente inconsistentes con los criterios hidráulicos teóricos para decantadores lamelares. La velocidad máxima de 0,703 m/s registrada sobre las lamelas es inaceptablemente alta para un proceso de clarificación. La velocidad horizontal (V_h) debe ser laminar y muy baja. Este valor elevado invalida la decantación y provoca la rotura y arrastre de flóculos. La coexistencia de velocidades muy altas (0,703 m/s) con zonas de estancamiento (0,129 m/s) y la intensa turbulencia concentrada en la zona de lodos demuestran un cortocircuito hidráulico severo y la ausencia de un flujo pistón uniforme. En conclusión, la hidráulica del diseño es completamente ineficiente y requiere una solución de rediseño radical.

Tabla 25. Parámetros hidráulicos del sedimentador para $Q = 342,25$ L/s

Parámetro	Símbolo	Fórmula	Valor	Unidad
Caudal máximo	Q	-	342,25	L/s
Carga superficial	CS	Q/A	154,5	$m^3/m^2 \cdot d$
Tiempo de retención hidráulico	TRH	V/Q	0,71	h
Velocidad de flujo	V_f	Según CFD	-	m/s

Fuente: Elaboración propia

4.3.5. Síntesis de Tendencias Hidráulicas y Patrones de Flujo.

El análisis exhaustivo de todas simulaciones CFD revela un conjunto de seis patrones de flujo recurrentes que son consistentes en todas las condiciones de operación simuladas. Estos patrones indican deficiencias hidráulicas significativas en el diseño actual del sedimentador y serán la base para la propuesta de rediseño en el Capítulo 5.

4.3.6. Patrones Críticos Observados en el Sedimentador Lamelar.

4.3.6.1 Inadecuada Distribución Inicial de Flujo (Cortocircuito de Entrada).

- **Descripción:** En las vistas en planta (isovista), el flujo de entrada desde el canal de alimentación no se distribuye uniformemente a lo largo de la pared frontal del sedimentador, sino que se concentra notablemente hacia el centro de la estructura. Este fenómeno genera una velocidad direccional alta que impacta directamente en la zona de lodos y la entrada a las lamelas, creando un desequilibrio de caudal en el primer tercio del tanque.
- **Consecuencia:** Velocidad Alta del agua en la zona central, provocando un cortocircuito hidráulico que reduce el tiempo real de retención (TRH) y minimiza la oportunidad de floculación y sedimentación

4.3.6.2 Desarrollo de Celdas de Recirculación y Flujo Helicoidal.

- **Descripción:** Inmediatamente después del impacto del flujo en el centro del tanque, el fluido desarrolla grandes celdas de recirculación o vórtices en las esquinas y a lo largo de las paredes laterales, especialmente visibles en los cortes longitudinales de la zona de floculación y la parte superior de la zona de lodos. El patrón de flujo en estas zonas es predominantemente helicoidal.
- **Consecuencia:** Formación de zonas muertas (donde el fluido se estanca o fluye lentamente sin contribuir a la clarificación) y zonas de mezcla (donde los flóculos ya formados se rompen debido a la turbulencia).

4.3.6.3 Picos de Velocidad Horizontal Excesivos (Turbulencia).

- **Descripción:** Los mapas de velocidad de flujo horizontal (V_h) muestran concentraciones de velocidad máxima en el área de entrada. Los picos de velocidad alcanzan valores de hasta 0,703 m/s (para $Q = 342$ L/s). Al convertir este valor a unidades de diseño, se obtiene un valor máximo de 42,18 m/min.
- **Análisis Crítico:** Este valor es alarmantemente alto. Comparado con el límite teórico de la velocidad crítica de arrastre (V_a), que es de 0,3 a 0,4 m/min (OPS, 2005, p. 48), la velocidad modelada es más de 100 veces superior al límite máximo admisible.
- **Consecuencia:** Se genera una turbulencia extrema que garantiza la resuspensión de los

lodos previamente asentados y la ruptura de los flóculos en la zona de contacto y de lodos, comprometiendo gravemente la calidad del efluente.

4.3.6.4 Sedimentación Irregular en la Tolva de Lodos.

- **Descripción:** Los vectores de velocidad en la zona inferior del sedimentador, destinados al almacenamiento de lodos, no muestran una tendencia neta de flujo laminar descendente. Por el contrario, existen vectores de velocidad significativos dirigidos horizontalmente y ascendentes en esta zona.
- **Consecuencia:** El patrón de flujo impide que los flóculos sedimenten de manera uniforme hacia la tolva de lodos. La alta velocidad de arrastre horizontal mencionada en el patrón 3 no permite que la capa de lodos se compacte adecuadamente, reintroduciendo partículas al flujo ascendente hacia las lamelas.

4.3.6.5 Flujo No Uniforme en la Zona de Lamelas.

- **Descripción:** A pesar de la presencia de las lamelas, la distribución de velocidad en los canales no es homogénea. Existe una diferencia notable entre el caudal que ingresa a las lamelas en la zona central (con mayor velocidad) y el caudal que ingresa a los módulos cercanos a las paredes (con menor velocidad).
- **Consecuencia:** El principio teórico fundamental del sedimentador lamelar ($V_s > V_v$) se ve afectado. Las lamelas no están siendo utilizadas al 100% de su capacidad. Los módulos con mayor caudal experimentan velocidades verticales ascendentes más altas de lo tolerable, y en otros módulos se crean zonas de bajo rendimiento.

4.3.6.6 Acumulación de Flujo en el Canal de Salida (Colección).

- **Descripción:** En el extremo de salida, el flujo converge de manera brusca hacia el canal de colección. Los vectores de velocidad muestran una aceleración final del agua justo antes de desbordar la lámina del vertedero, lo que indica un diseño ineficiente del sistema de colección.
- **Consecuencia:** Los flóculos que lograron sobrevivir al proceso y llegaron a la zona final de clarificación son arrastrados y succionados al canal de agua decantada debido a la alta velocidad de colección, disminuyendo la calidad final del agua tratada.

Capítulo V:

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PROPUESTA

Capítulo V: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PROPUESTA

5.1. Análisis de Resultados del CFD y Contrastación Teórica – Normativa.

El propósito fundamental de la modelación fluidodinámica computacional (CFD) fue contrastar el comportamiento hidráulico real del sedimentador lamelar con los criterios de diseño teóricos y normativos establecidos por la Norma Boliviana NB 689 (2004) y las guías técnicas internacionales (OPS/CEPIS, 2005). Este análisis se concentra en demostrar cómo los patrones de flujo identificados en el numeral 4.3.5 provocan un incumplimiento de los parámetros críticos, comprometiendo la eficiencia de clarificación.

- El análisis integral de las simulaciones CFD realizadas para caudales de 160, 215 y 342 L/s permitió identificar patrones de flujo recurrentes en el sedimentador lamelar de la planta potabilizadora de Tabladita. Estos patrones ratifican la existencia de una distribución no uniforme de velocidades, un cortocircuito hidráulico en la zona central y una turbulencia excesiva sobre las lamelas y en la zona de lodos, tal como se sintetiza en el Capítulo 4.
- En particular, la simulación para el caudal máximo operativo ($Q = 342,25$ L/s) muestra velocidades horizontales máximas del orden de 0,703 m/s sobre las lamelas, equivalentes a aproximadamente 42,18 m/min, mientras que la literatura técnica y la OPS recomiendan valores de velocidad de arrastre del orden de 0,3 a 0,4 m/min para evitar la resuspensión de lodos (OPS, 2005, p. 48; NB 689, 2004, p. 372). Este contraste evidencia que, aun si la carga superficial de diseño se ubica dentro de los rangos normativos ($60\text{--}120$ m³/(m²·día) para sedimentadores lamelares de alta tasa), la hidráulica interna real es incompatible con un régimen laminar estable, debido a la concentración de energía cinética en el eje central del tanque.
- La interpretación conjunta de las gráficas de velocidad en planta y en cortes longitudinales y transversales confirma que la unidad no opera como un sedimentador de flujo pistón, sino más bien como una cámara de mezcla turbulenta en las zonas críticas, anulando parcialmente la función de las lamelas y favoreciendo el arrastre de flóculos hacia los filtros.
- Respecto a la verificación y calibración del modelo, la imposibilidad de introducir instrumentos de medición (por ejemplo, molinetes) en el interior de la unidad, debido a la

presencia de placas inclinadas, impidió una comparación directa punto a punto entre las velocidades simuladas y mediciones en campo. Esta limitación fue señalada ya en el Capítulo II al justificar el uso de CFD como única herramienta viable para obtener parámetros hidráulicos internos.

En consecuencia, la validación del modelo se realizó de forma indirecta, mediante:

- La comparación de los parámetros de diseño (carga superficial teórica, tiempo de retención hidráulico, geometría de la unidad) con los resultados de la simulación
- La coherencia de los patrones de flujo obtenidos con los mecanismos de falla típicos descritos por la bibliografía especializada para sedimentadores lamelares (cortocircuito, zonas muertas, recirculaciones y resuspensión de lodos) (Arboleda, 2000; Romero Rojas, 2006) y la consistencia entre las tendencias de la simulación y el desempeño real de la planta, evidenciado por los datos de turbiedad y la experiencia operativa de COSAALT.

Adicionalmente, en este tipo de estudios de flujo interno donde no se dispone de mediciones detalladas, no se realiza una calibración clásica del modelo, sino que se trabaja con modelos matemáticos consolidados y contrastados en la literatura para geometrías similares, verificando la coherencia física de los resultados. Este enfoque coincide con la práctica descrita por autores como Anderson (1995) y Osses (2016), quienes enfatizan la importancia de la formulación del modelo, las condiciones de frontera y el análisis crítico de resultados más que la calibración empírica en sistemas de difícil instrumentación.

5.1.1. Diagnóstico de la Eficiencia Hidráulica.

El diagnóstico del modelo actual, simulado en tres escenarios de caudal (Q_{min} , Q_{medio} , Q_{max}), confirman unas condiciones hidráulicas no tan favorables para la sedimentación en el diseño de la zona de entrada y de lodos.

El patrón crítico identificado como Inadecuada Distribución Inicial de Flujo es la causa raíz de la disfunción. La concentración de la energía cinética del flujo en el centro de la unidad, en lugar de una distribución homogénea, genera dos efectos destructivos interrelacionados:

- **Cortocircuito Acelerado:** El flujo centralizado atraviesa la unidad rápidamente, resultando en un tiempo de retención hidráulico (TRH) real significativamente inferior

al TRH teórico, mermando el tiempo necesario para la floculación y sedimentación.

- **Turbulencia y Arrastre:** La energía no disipada en la entrada, se manifiesta como picos de velocidad localizados, que son responsables de la formación de los grandes vórtices de recirculación en los laterales. Esta turbulencia extrema se propaga a la zona de lodos, garantizando la resuspensión de las partículas ya asentadas y la destrucción de nuevos flóculos.

En esencia, la estructura no opera como un sedimentador de flujo laminar ideal, sino como una cámara de mezcla turbulenta en las zonas críticas, volviendo inoperables las lamelas, cuyo principio se basa estrictamente en la estabilidad laminar del flujo.

5.1.2. Valoración del Cumplimiento Normativo (NB 689, OPS y CONAGUA).

La principal evidencia de condiciones hidráulicas desfavorables se cuantifica se verifica al comparar la velocidad de flujo horizontal (V_h) obtenida en las simulaciones con el límite teórico de la Velocidad Crítica de Arrastre (V_a) o de resuspensión. Este límite es el estándar técnico fundamental que define si una unidad de sedimentación es hidráulicamente estable o no.

Tabla 26. Comparación entre parámetros de diseño hidráulico y los valores obtenidos de la simulación CFD.

Parámetro	Valor Máximo Simulado ($Q_{max} = 342L/s$)	Límite Teórico de Diseño (V_a)	Criterio para valorar el cumplimiento	Referencia Cita
Velocidad de Flujo Horizontal Máxima ($V_h \max$)	0,703 m/s	0,005 - 0,007 m/s	100,43 veces	(OPS, 2005, p. 48)
$V_h \max$	42,18 m/min	0,4 m/min	105,45 veces	(OPS, 2005, p. 48)
Criterio No Cumplido	Turbulencia Crítica y Arrastre de Lodos	Régimen de Flujo Laminar	Crítico	(NB 689, 2004, p. 372)

Fuente: Elaboración propia, con base en Rivas Mijares (1978), CEPIS (2005) y resultados de la simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation).

Análisis de la Carga Superficial (CS): Si bien la Carga Superficial de diseño del sedimentador

puede caer dentro del rango amplio de 60 a 120 m³/(m²·d) establecido por la NB 689 (2004, p. 372), la simulación del flujo a nivel micro-estructural demuestra que este valor de diseño es inviable hidráulicamente bajo la configuración actual.

- **Conclusión respecto al cumplimiento:** El inconveniente no radica en el valor nominal de la Carga Superficial, sino en la distribución interna del caudal. El registro de una velocidad de arrastre de 42,18 m/min (más de 100 veces el límite de 0,4 m/min recomendado por la OPS para evitar la resuspensión de lodos) es la prueba irrefutable de que la unidad no es del todo correcta con el requisito fundamental de estabilidad hidráulica para la sedimentación. Esto convierte la operación actual del sedimentador en una fuente de aporte de sólidos al siguiente proceso de tratamiento, invalidando de facto su función principal pero aun así la Planta Potabilizadora De Tabladita alcanza Altas Eficiencias.
- Para valorar el cumplimiento normativo del sedimentador de Tabladita, se compararon los parámetros hidráulicos claves obtenidos mediante simulación CFD (carga superficial, tiempo de retención hidráulico y velocidad de flujo horizontal) con los rangos recomendados por la Norma Boliviana NB 689 y las guías técnicas de la OPS/CEPIS y CONAGUA.
- La NB 689 establece para unidades de sedimentación de alta tasa (lamelares) cargas superficiales en el rango de 60 a 120 m³/(m²·d), con tiempos de retención hidráulicos típicos del orden de 0,5 a 2 h, enfatizando que el control principal se ejerce a través de la carga superficial y la calidad del agua de entrada (NB 689, 2004, p. 372–375). Las guías de la OPS/CEPIS y CONAGUA, por su parte, recomiendan cargas superficiales similares para decantadores laminares y condiciones de baja velocidad en la zona de lodos y sobre las placas, con velocidades horizontales críticas de arrastre del orden de 0,3–0,4 m/min para evitar la resuspensión de sólidos (OPS, 2005, p. 48; CONAGUA, 2015).
- La Tabla 23 (Capítulo V) resume esta comparación entre los valores normativos y los resultados de la simulación. En términos de carga superficial y TRH, el diseño original de Tabladita se sitúa dentro o cerca de los rangos normativos; sin embargo, las velocidades horizontales simuladas superan en más de dos órdenes de magnitud los límites de diseño, alcanzando hasta 42,18 m/min en zonas críticas, frente al máximo de 0,4 m/min

recomendado para no provocar arrastre de lodos.

- En consecuencia, se concluye que la unidad no cumple con el criterio fundamental de estabilidad hidráulica exigido por la NB 689 y las guías internacionales, aun cuando formalmente la carga superficial pueda considerarse aceptable. El problema no radica en el valor global de diseño, sino en la mala distribución interna del caudal, que concentra la energía en el centro del sedimentador, generando cortocircuitos y turbulencia extrema.
- Esta valoración normativo-hidráulica sirve de base para la propuesta de rediseño presentada en los apartados 5.2, 5.3 y 5.4, cuyo objetivo es lograr una redistribución más uniforme del flujo, incrementar el tiempo efectivo de permanencia de los flóculos en las zonas de baja velocidad y reducir la turbiedad a la salida del sedimentador, en coherencia con los criterios de calidad establecidos por NB 689 y NB 512.

5.2. Evaluación experimental de la inclinación de las lamelas (45 – 60°) y su impacto en la turbiedad.

- Con el fin de complementar el análisis numérico y relacionar los parámetros hidráulicos con la calidad del agua, se realizó un ensayo empírico en el laboratorio de la planta potabilizadora de Tabladita, utilizando el agua procedente de la etapa de floculación y replicando en forma simplificada el comportamiento de las placas inclinadas del sedimentador.
- Para ello se fabricaron dos soportes tipo trípode, uno con una inclinación de 45° y otro con 60°, sobre los cuales se dispusieron botellas plásticas cortadas que contenían agua floculada. Ambos ensayos se realizaron con el mismo tiempo de sedimentación, controlado con cronómetro, de aproximadamente 27–30 minutos, observando visualmente la formación del manto de lodos, la clarificación del agua desde la parte superior y el avance de la interfaz sólido-líquido.
- De acuerdo con la teoría de sedimentadores lamelares, la inclinación de las placas influye directamente en la longitud de la trayectoria de sedimentación y en la facilidad de deslizamiento del lodo hacia la parte inferior. La NB 689 recomienda explícitamente inclinaciones del orden de 60° para módulos lamelares de alta tasa, mientras que la CONAGUA, en sus Manuales de Plantas de Tecnología Simplificada, acepta un rango de 45° a 60°, señalando que el incremento hacia 60° puede representar un aumento de

alrededor de 15 % en la eficiencia de remoción respecto a inclinaciones menores (NB 689, 2004, p. 372; CONAGUA, 2015).

- En el ensayo realizado, la muestra correspondiente a 60° presentó una turbiedad de aproximadamente 13,6 NTU al cabo de 27 minutos, mientras que la muestra inclinada a 45°, sometida al mismo tiempo de sedimentación, registró una turbiedad de alrededor de 19 NTU. El hecho de que $13,6 \text{ NTU} < 19 \text{ NTU}$ demuestra que, bajo las mismas condiciones de agua floculada y tiempo de prueba, la inclinación de 60° proporciona una mejor clarificación que la de 45°, coherente con lo planteado por CONAGUA respecto al aumento de eficiencia al incrementar la inclinación.
- Este resultado es especialmente relevante porque vincula la teoría de diseño lamelar con la experiencia operativa de la planta: el operador de Tabladita utiliza rutinariamente el ensayo de jarras, variando dosis de coagulante y pH, para garantizar la formación de flóculos adecuados antes de la sedimentación (Romero Rojas, 2006; Arboleda, 2000). La prueba 45°–60° confirma que, con una floculación adecuada, la configuración actual de lamelas a 60° en el sedimentador es hidráulica y sanitariamente conveniente, siempre y cuando se controlen las velocidades horizontales y las condiciones de entrada y salida, aspectos abordados en las propuestas de mejora de los apartados siguientes.
- En términos metodológicos, este ensayo empírico constituye también una forma de verificación cualitativa del modelo numérico: al observar que la clarificación real mejora en configuraciones coherentes con lo recomendado por la NB 689 y CONAGUA, se refuerza la idea de que los ajustes propuestos en la geometría y la distribución de velocidades (zona de entrada, espejo de agua y colector de salida) tendrán un impacto positivo tanto en la hidráulica interna como en la turbiedad de salida del sedimentador



Figura 37. Ensayo empírico de sedimentación con soportes a 45° y 60° en el laboratorio de la planta de Tabladita.

Fuente: Elaboración propia

El laboratorio de la planta realiza de manera rutinaria ensayos de turbiedad, pH, alcalinidad y cloro residual, así como el test de jarras para ajustar la dosis de coagulante antes de la floculación. Estos controles permiten asegurar que el agua que ingresa al sedimentador presente flóculos con buena capacidad de sedimentación, lo que se refleja en la eficiencia global del proceso (NB 689, 2004, p. 371; NB 512, 2014). De este modo, la propuesta de mejora hidráulica planteada en este capítulo se integra de forma consistente con la gestión de la calidad del agua en laboratorio, reforzando la coherencia entre el diseño hidráulico, la operación y la calidad del agua tratada.

5.3. Propuesta de rediseño hidráulico en la zona de entrada y espejo de agua.

- La primera línea de acción para optimizar el rendimiento del sedimentador de Tabladita consiste en ajustar las condiciones hidráulicas en la zona de entrada y en el espejo de agua. A partir de la experiencia del operador de planta y de los resultados de la simulación CFD, se propone mantener la configuración general de ingreso del agua (dos compuertas o entradas existentes), pero modificar la longitud de la cresta de salida, incrementándola en

aproximadamente 40 cm.

- Desde el punto de vista hidráulico, al aumentar la longitud efectiva de la cresta, el nivel del tirante aguas arriba del vertedero desciende, obligando al agua que sale del sedimentador a recorrer una mayor profundidad antes de alcanzar el vertedero. Este ajuste genera dos efectos principales:
 - Reducción de la velocidad local en la zona superior del sedimentador, al disponer de un mayor espejo de agua y un gradiente de energía menos pronunciado.
 - Incremento del tiempo efectivo de permanencia de los flóculos en la zona de clarificación, dando oportunidad a que los flóculos más livianos terminen de asentarse antes de ser arrastrados hacia la salida.
- Este criterio es coherente con la NB 689, que señala la importancia de mantener velocidades bajas y tiempos de retención adecuados en la zona de clarificación para garantizar la remoción de sólidos antes de la filtración (NB 689, 2004, p. 371–372). Asimismo, coincide con las recomendaciones de la OPS y de autores como Chávez y Maldonado (2004) y Romero Rojas (2006), quienes destacan que, en sedimentadores lamelares, pequeños ajustes en el nivel del espejo de agua pueden tener un impacto significativo en la eficiencia de clarificación y en la reducción de cortocircuitos superficiales.
- Operativamente, el operador de Tabladita indicó que, al bajar la cresta y, por tanto, el nivel de agua, el flóculo “tiene que subir más” antes de alcanzar la salida, lo que se traduce en mayor tiempo de exposición a condiciones de baja velocidad y, por ende, en una mejor separación sólido-líquido. Este razonamiento es consistente con el principio de que el sedimento debe desplazarse hacia el fondo y la fase líquida clarificada hacia la parte superior con el menor gradiente de velocidad posible.
- La modificación propuesta no implica cambios estructurales mayores, sino un ajuste geométrico puntual que resulta técnicamente viable, de bajo costo y compatible con la operación continua de la planta, representando una primera etapa de mejora que puede implementarse de manera relativamente sencilla.

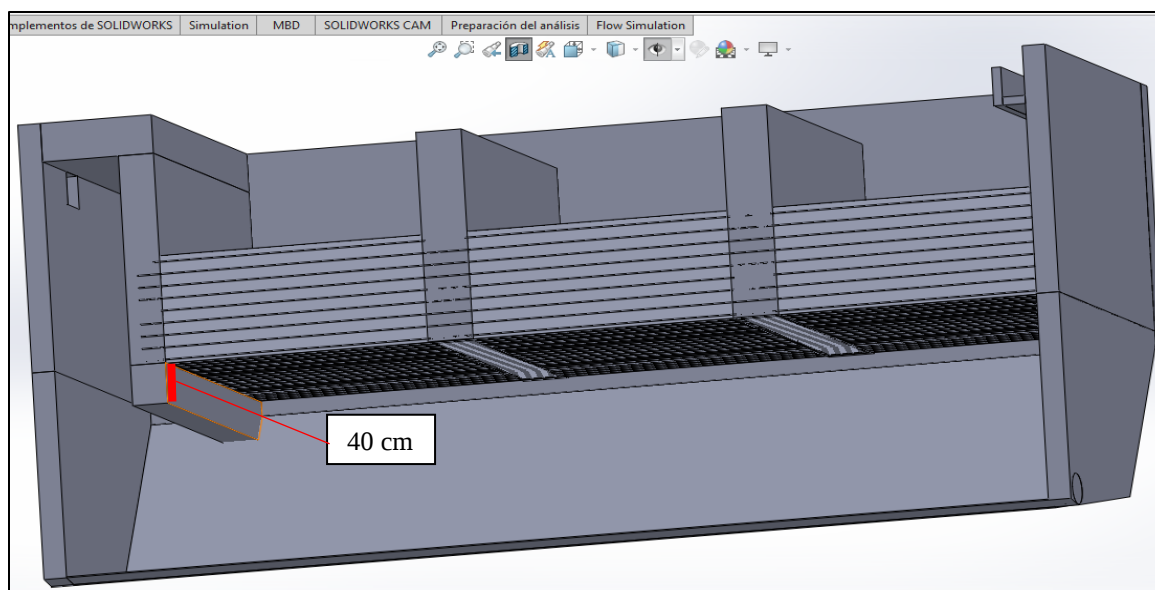


Figura 38. Esquema del ajuste de la cresta de salida (+40 cm de longitud) en el sedimentador de Tabladita (modelo 3D en SolidWorks).

Fuente: Elaboración propia

5.4. Memoria de cálculo y justificación del colector de salida transversal (Propuesta de mejora).

5.4.1. Introducción y objetivo.

- La segunda línea de mejora propone reconfigurar la zona de salida del sedimentador, reemplazando las actuales tuberías longitudinales perforadas por un colector transversal tipo canal/vertedero ubicado en la parte final del tanque, a lo largo de la longitud transversal de 5,51 m. El objetivo es lograr una recolección uniforme del caudal clarificado, minimizar la perturbación del manto de lodos y reducir el riesgo de resuspensión de sólidos, especialmente en condiciones de alta turbiedad del agua bruta.
- El operador de planta señaló que, en Tabladita, los eventos de turbiedad pueden alcanzar valores del orden de 5.000 NTU, con arrastre importante de arena y sólidos pesados. En estas condiciones, la presencia de tuberías con orificios ubicadas en la parte baja del sedimentador favorece el “chisqueto” del lodo, generando enturbiamiento secundario y contaminación del agua clarificada. Este comportamiento es consistente con la teoría, que indica que las unidades con alta carga de sólidos y mantos de lodo grueso son especialmente sensibles a perturbaciones hidráulicas en el fondo (NB 689, 2004; OPS,

2005).

- En cambio, para aguas más claras (turbiedades bajas del orden de 100–200 NTU), podría justificarse el uso de tuberías inferiores, como indican algunas guías de tecnologías simplificadas (CONAGUA, 2015); sin embargo, este no es el caso de Tabladita, por lo que se opta por un sistema de salida que trabaje desde la parte superior, reduciendo la interacción directa con la capa de lodos.

5.4.2. Datos de diseño físicos (medidos).

- Longitud transversal del sedimentador (L): 5,51 m.
- Caudal máximo de diseño en el sedimentador ($Q_{\max}$): 0,0855625 m³/s.
- Rango de turbiedades de entrada: hasta ≈ 5.000 NTU (dato operativo).
- Dimensiones propuestas del canal–vertedero transversal: base de 0,20 m y altura de 0,30 m, ubicadas en el extremo final del sedimentador.
- Condiciones de salida: conducción del agua clarificada hacia los filtros rápidos descendentes, que comparten un canal de distribución con capacidad suficiente de almacenamiento, según diseño de la planta (NB 689, 2004).

5.4.3. Criterios de diseño y justificación.

El diseño del colector transversal se fundamenta en los siguientes criterios:

Uniformidad de recolección del caudal

- El canal–vertedero debe captar el caudal a lo largo de toda la longitud transversal del sedimentador, evitando concentraciones puntuales de velocidad que generen cortocircuitos en la zona de salida. Este principio coincide con lo recomendado por NB 689 y la OPS para vertederos de salida en sedimentadores, donde se busca una distribución lo más uniforme posible del caudal por unidad de longitud de cresta (NB 689, 2004, p. 371; OPS, 2005).

Minimización de la perturbación del manto de lodos

- Al trabajar con un canal ubicado en la parte superior de la zona de clarificación, el flujo de salida se toma desde la región más clara del agua, reduciendo la interacción con la capa de lodos de 0,5–1,0 m de espesor que se acumula en el fondo. De esta manera, se disminuye el riesgo de resuspensión de partículas pesadas que, en condiciones de alta turbiedad,

podrían reingresar al flujo clarificado.

Compatibilidad con la filtración y el canal posterior

- La planta de Tabladita dispone, aguas abajo de la sedimentación, de un sistema de filtros rápidos que comparten un canal de distribución con capacidad adecuada para laminar el flujo. El nuevo colector transversal se dimensiona de modo que su descarga se integre hidráulicamente a este sistema, evitando caídas bruscas de energía y pérdidas localizadas que puedan inducir aireación indeseada o perturbaciones adicionales (NB 689, 2004, p. 103).

Simplicidad constructiva y operativa

- Un canal rectangular de 0,20 m de base y 0,30 m de altura resulta más sencillo de construir, inspeccionar y limpiar que sistemas de tubería perforada, especialmente en un contexto donde se acumulan grandes volúmenes de arena y lodos. Esta simplicidad favorece el mantenimiento rutinario y la sostenibilidad del sistema.

5.4.4. Hidráulica para el diseño propuesto.

Verificación de capacidad del canal

- Se verifica que el canal de $0,20 \times 0,30$ m puede transportar el caudal Q_{max} con una pendiente y tirante tales que la velocidad media se mantenga en un rango compatible con flujo subcrítico y sin riesgo de erosión. Para ello se emplea la ecuación de continuidad y la fórmula de Manning para canales rectangulares (Romero Rojas, 2006; NB 689, 2004).

Comprobación de uniformidad y niveles

- Se analiza el perfil de tirante en el canal para diferentes caudales operativos de la planta (por ejemplo, 160, 215 y 342 L/s), comprobando que el sistema mantiene una distribución uniforme y que la lámina de agua a la salida no produce golpes ni perturbaciones sobre el espejo del sedimentador.

5.4.5. Resultados del diseño del colector transversal

A partir de los criterios y cálculos descritos, se obtiene un colector transversal de salida con las siguientes características:

- Tipo de colector: Canal rectangular tipo vertedero
- Longitud total (L): 5,51 m
- Dimensiones internas: 0,20 m (base) × 0,30 m (altura)
- Caudal máximo manejado (Q_{max}): 0,0855625 m³/s
- Régimen de flujo: subcrítico ($Fr < 1$)

Estos resultados cumplen con los criterios normativos de diseño y con las condiciones operativas de la planta, proporcionando un sistema de salida hidráulicamente estable, de fácil operación y mantenimiento y alineado con el objetivo central de reducir la turbiedad y el arrastre de flóculos hacia los filtros.

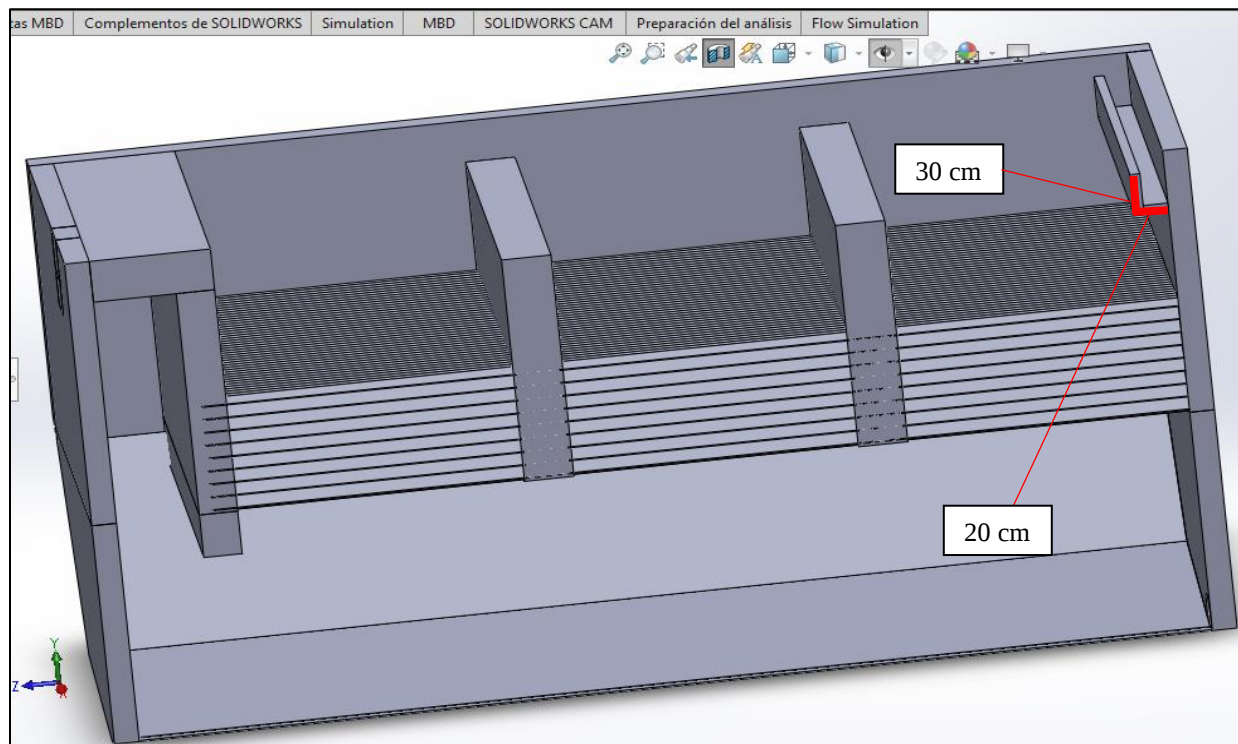


Figura 39. Esquema del ajuste del Canal rectangular tipo vertedero en la zona de salida del sedimentador de Tabladita (modelo 3D en SolidWorks)

Fuente: Elaboración propia

5.5. Validación numérica del rediseño mediante simulación CFD (Modelo mejorado).

Con el objeto de evaluar cuantitativamente el impacto de las modificaciones geométricas propuestas —incremento de 40 cm en la longitud de la cresta de salida y reemplazo del sistema de

tuberías perforadas por un canal–vertedero transversal de $0,20 \times 0,30$ m— se realizará una nueva simulación fluidodinámica computarizada (CFD) en SolidWorks Flow Simulation.

- El objetivo es comparar la distribución de velocidades, líneas de corriente, campos de presión y tiempo efectivo de permanencia (TRH) entre:
 - El modelo original del sedimentador, y
 - El modelo mejorado con las propuestas implementadas.
- Esta comparación permitirá:
 - Verificar si el incremento de cresta produce la reducción esperada de velocidades superficiales.
 - Confirmar si la salida mediante canal transversal reduce la turbulencia y mitiga los cortocircuitos detectados en el modelo original.
 - Evaluar si el rediseño incrementa el tiempo de residencia hidráulica, especialmente en la zona de clarificación superior.
 - Comprobar si los patrones de flujo son coherentes con los criterios normativos de NB 689, OPS y CONAGUA.
- Los resultados se presentarán mediante:
 - Isosuperficies de velocidad, cortes longitudinales y transversales
 - Mapas de velocidad a diferentes profundidades
 - Líneas de corriente y trayectorias de partículas
 - Gráficas comparativas entre modelo original y mejorado

Toda esta información permitirá concluir si las modificaciones planteadas constituyen una optimización hidráulica real y cuantificable, reforzando las recomendaciones finales del presente trabajo.

5.5.1. Distribución de velocidades y líneas de corriente para $Q = 342,25$ L/s (caudal máximo operativo).

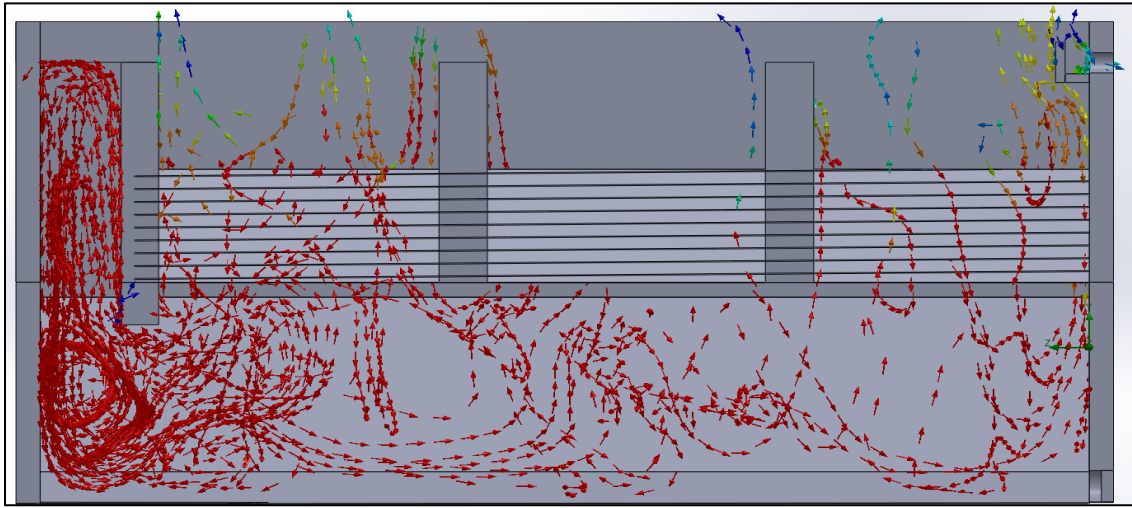


Figura 40. Distribución de líneas de corriente en corte longitudinal por el centro del sedimentador para $Q = 342,25$ L/s

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

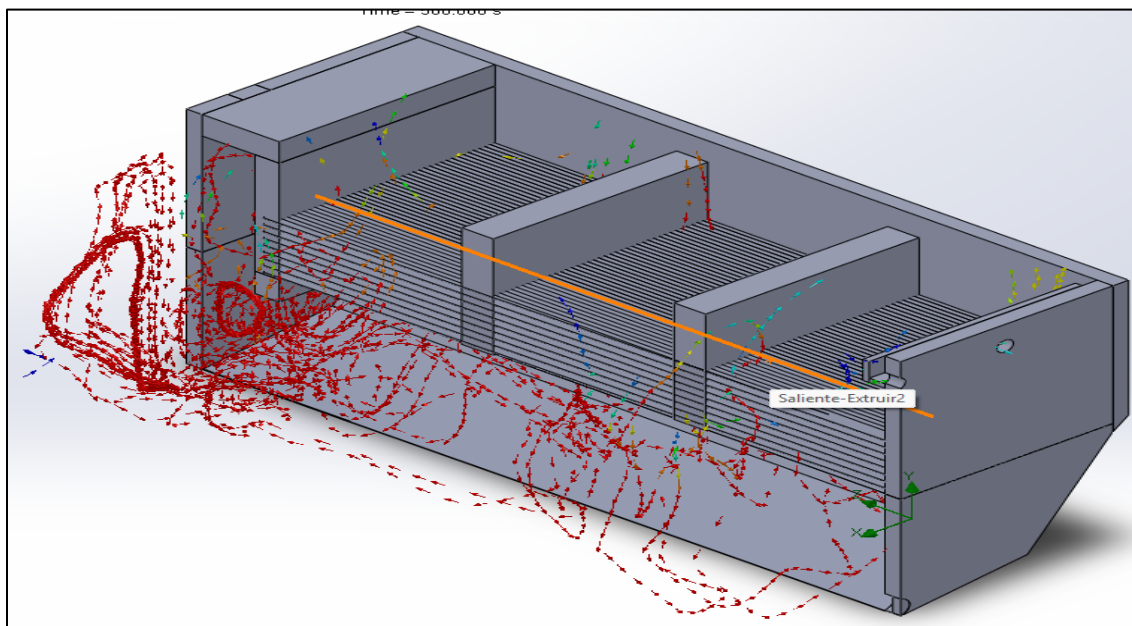


Figura 41. Distribución de líneas de corriente en vista tridimensional para $Q = 342,25$ L/s

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

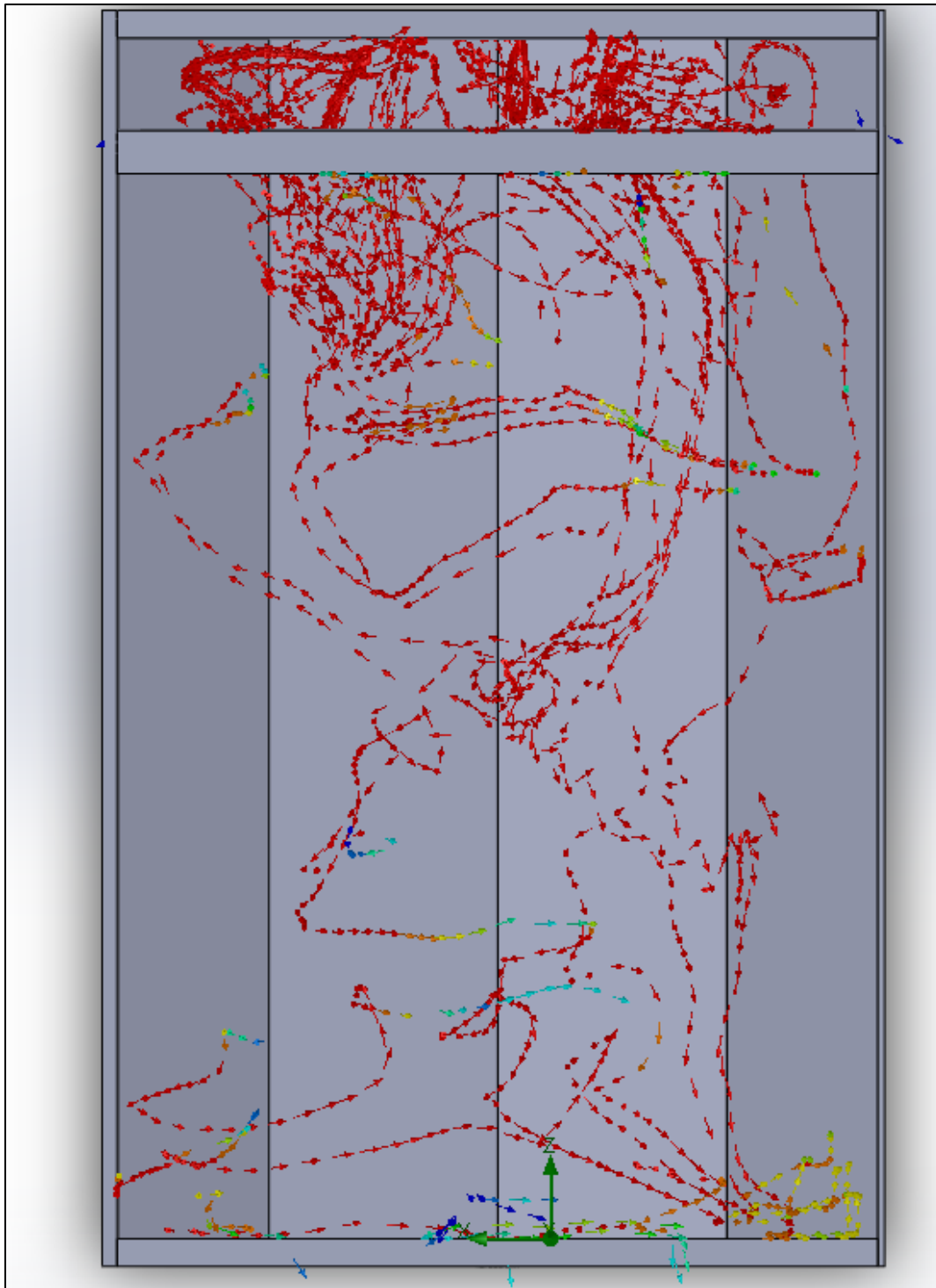


Figura 42. Distribución de líneas de corriente en vista en planta debajo de las lamelas para $Q = 342,25 \text{ L/s}$

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

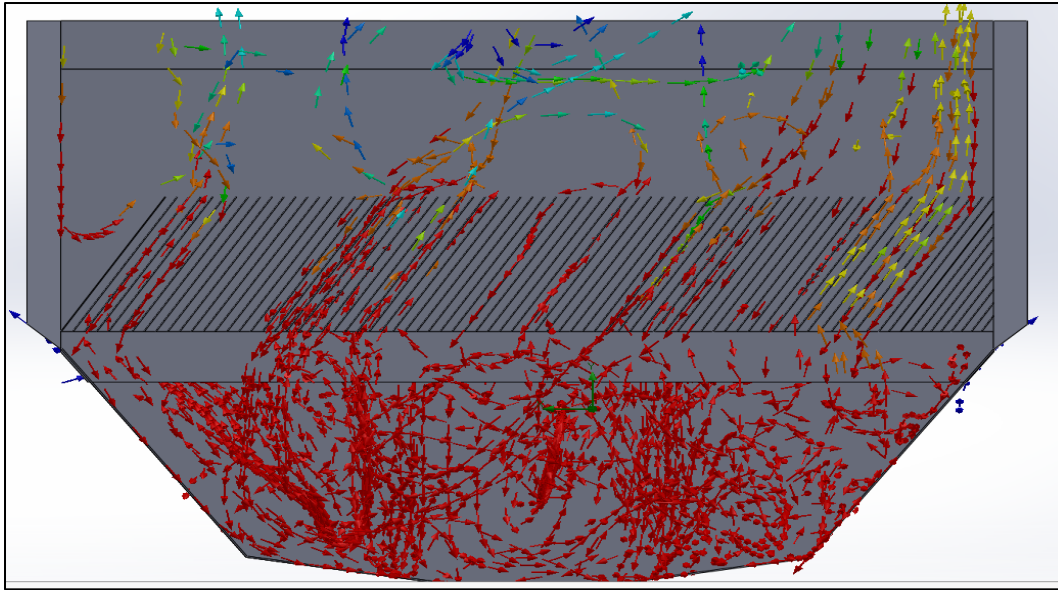


Figura 43. Distribución de líneas de corriente en corte transversal al flujo en el centro del sedimentador para $Q = 342,25 \text{ L/s}$

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

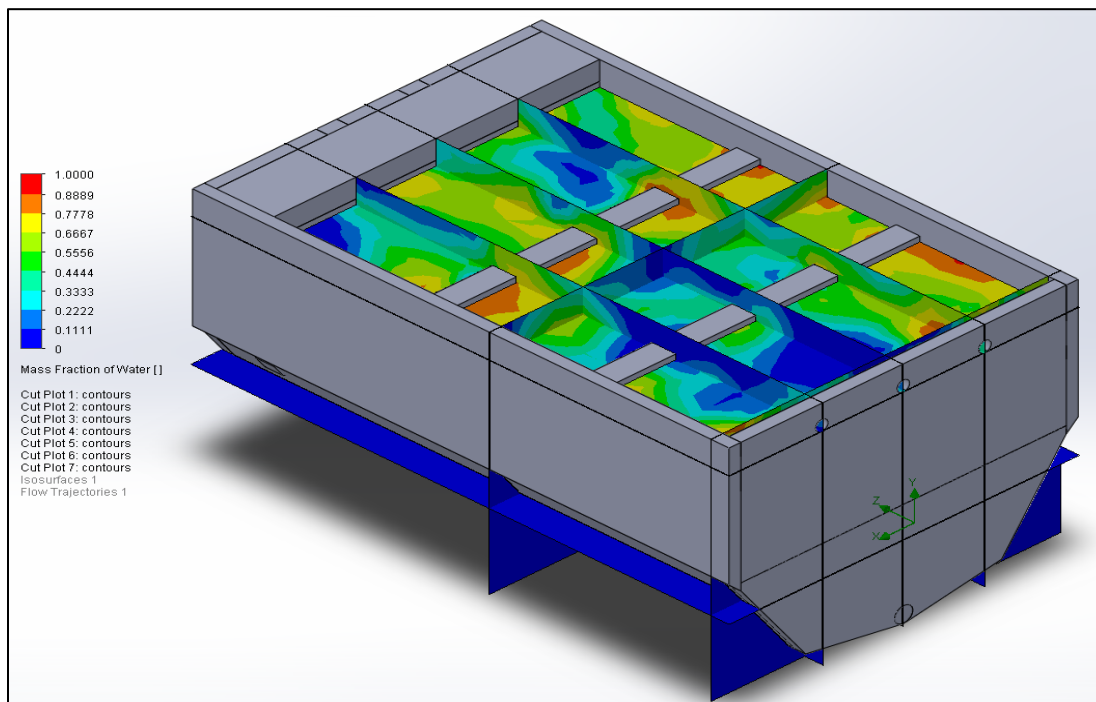


Figura 44. Distribución de velocidades en vista tridimensional para $Q = 342,25 \text{ L/s}$

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

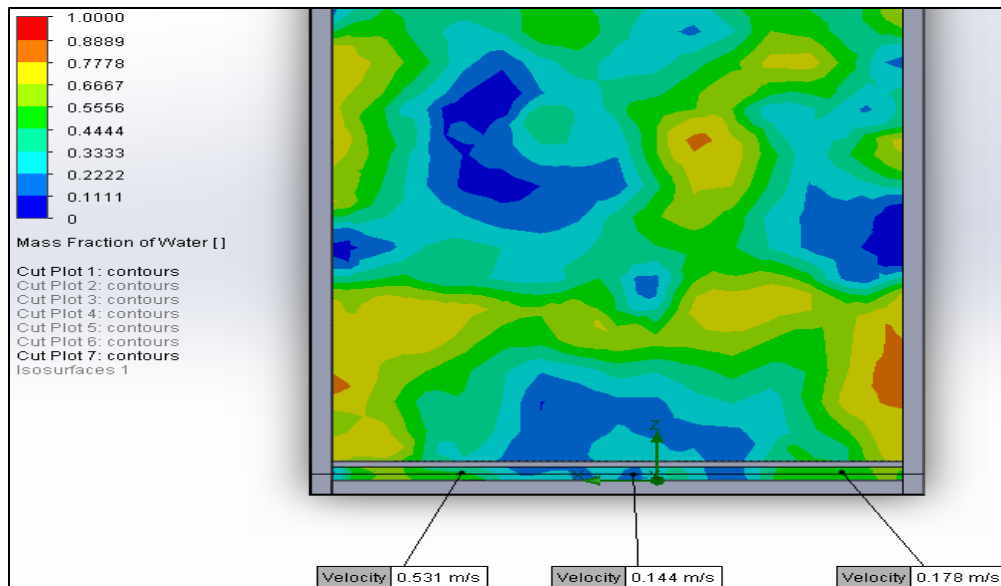


Figura 45. Distribución de velocidades en vista en planta a la altura del Canal rectangular tipo vertedero para $Q = 342,25 \text{ L/s}$

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

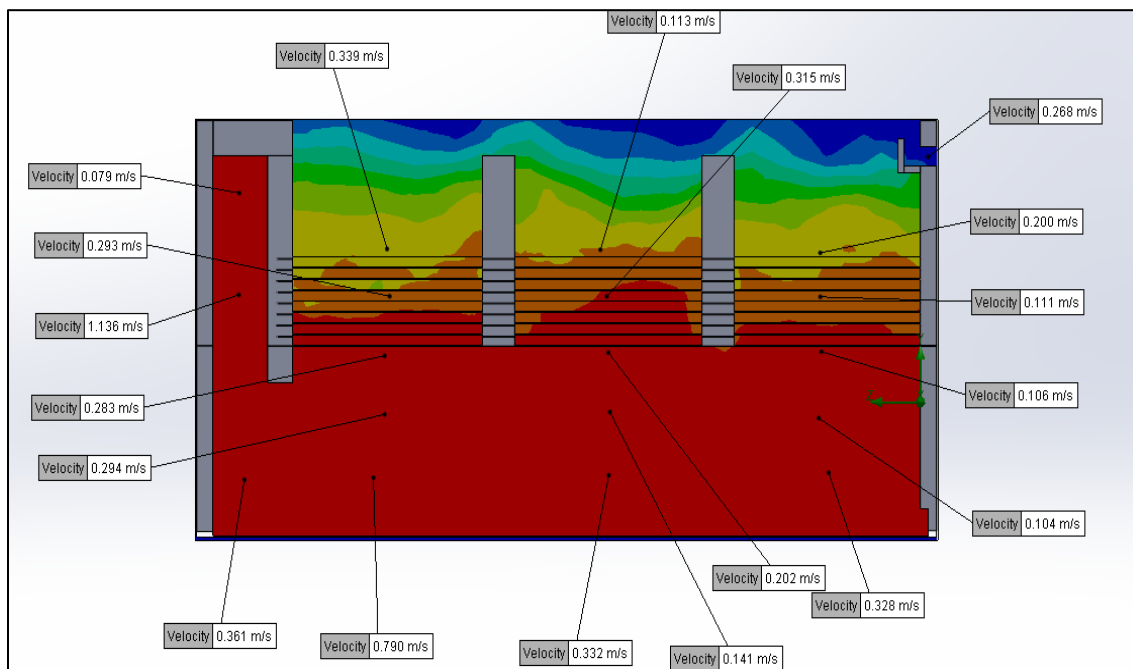


Figura 46. Distribución de velocidades en corte longitudinal por el centro de sedimentador para $Q = 342,25 \text{ L/s}$

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

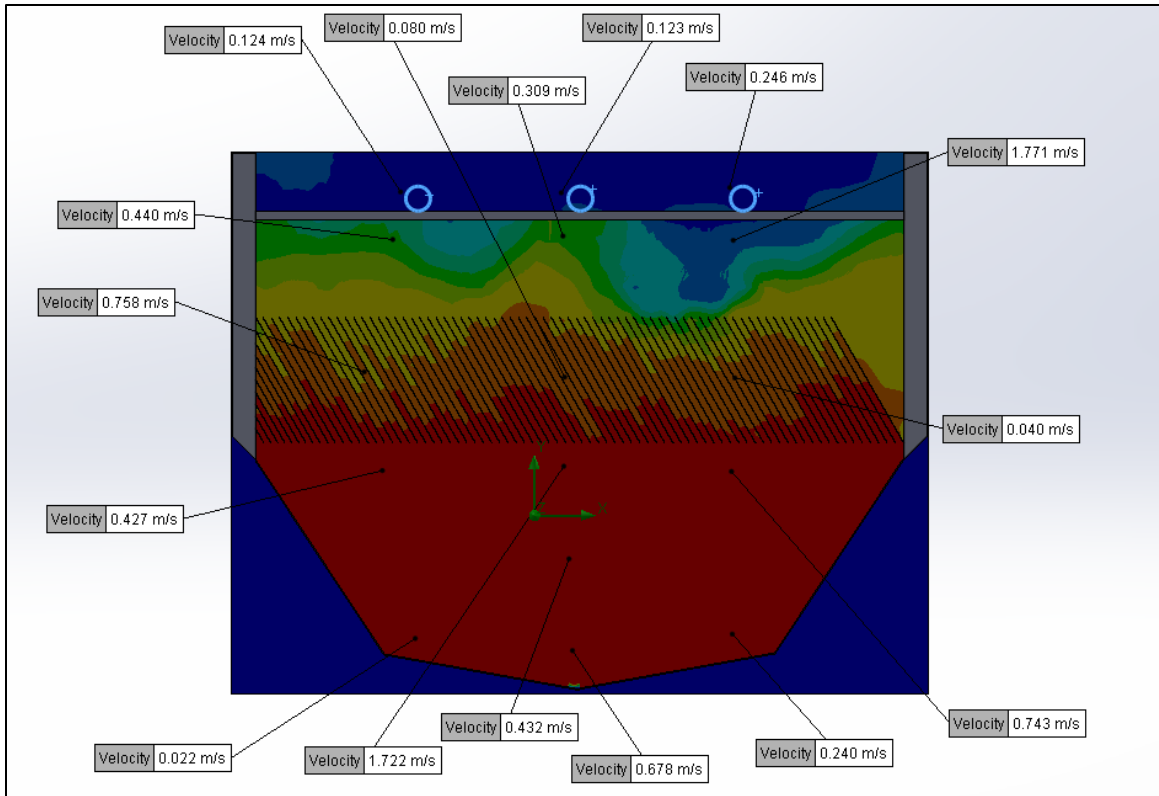


Figura 47. Distribución de velocidades en corte transversal al flujo en el centro del sedimentador para $Q = 342,25 \text{ L/s}$

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Criterios de observación en relacion de la Figura 40 a la 47, podemos indicar lo siguiente::

1. Uniformidad de la velocidad:

- **Observación:**

- Las velocidades presentan una variación amplia, desde valores mínimos de 0,022 m/s en la zona de lodos hasta máximos de 1,722 m/s en la zona de decantación, justo debajo de las lamelas en el corte transversal central.

- **Análisis:**

- Aunque la diferencia entre velocidades sigue siendo significativa, el comportamiento general del flujo muestra una mayor uniformidad relativa respecto del modelo original. En la simulación sin mejoras existían gradientes extremadamente abruptos y zonas de aceleración violenta inmediatamente después

de la entrada, que provocaban pérdidas severas de TRH y arrastre de flóculos. En el modelo mejorado, la variación sigue presente, pero se observa que la mayor parte del volumen fluido se mueve dentro de un rango de velocidades menor que en el diseño original, especialmente en la zona de decantación.

- La mayor uniformidad en regiones medias y superiores del sedimentador indica que las modificaciones hidráulicas (incremento de cresta y canal transversal de salida) contribuyen a distribuir mejor el flujo y reducir el efecto del jet inicial.

2. Variación de la velocidad mínima y máxima (V_{min} y V_{max}):

- **Observación:**

- Las velocidades oscilan entre 0,022 m/s (V_{min}) y 1,722 m/s (V_{max}).

- **Análisis:**

- El valor máximo sigue siendo elevado, pero es importante destacar que ahora el pico de velocidad se concentra en una zona muy puntual, debajo de las lamelas en el corte transversal, y no en grandes extensiones como ocurría en el diseño sin mejoras. La reducción de zonas extensas con velocidades críticas indica que la nueva geometría consigue confinar mejor la energía dinámica del flujo, evitando que esta afecte superficies más amplias del área de sedimentación.
- El valor mínimo de 0,022 m/s, registrado en la zona de lodos, representa una mejora respecto al diseño original, donde las velocidades en esta zona eran muy altas ($\approx 0,343$ m/s), provocando resuspensión constante. Aunque el valor ideal teórico estaría por debajo de 0,015 m/s, el descenso logrado constituye una mejora hidráulica relevante que contribuye a reducir el arrastre de sólidos.

3. Ubicación de la velocidad más fuerte (V_{max}):

- **Observación:**

- La velocidad máxima de 1,722 m/s se encuentra en la zona de decantación, en el corte transversal central, inmediatamente debajo de las lamelas.

- **Análisis:**

- Esta localización es más coherente con la dinámica esperada en sedimentadores lamelares. En el diseño original, el valor máximo estaba ubicado en el primer tercio

longitudinal, inmediatamente después de la entrada, lo cual generaba un chorro de impacto extremadamente destructivo. Ahora, el pico de velocidad se ubica en un punto más interno y menos determinante para la decantación superficial.

- Aunque sigue siendo un valor elevado, su ubicación puntual reduce significativamente su impacto en la eficiencia general. La energía ya no se proyecta longitudinalmente a través de la unidad y ya no penetra directamente hacia la zona de lodos como ocurría antes. Esto evita el cortocircuito hidráulico severo del modelo original.

4. Ubicación de la velocidad más lenta (V_{min}):

- **Observación:**

- La velocidad mínima de 0,022 m/s se observa en la zona de lodos, cerca del fondo del sedimentador.

- **Análisis:**

- La presencia de velocidades bajas en el fondo constituye una mejora importante respecto a los 0,343 m/s registrados originalmente. Aunque aún supera ligeramente el valor teórico sugerido ($< 0,015$ m/s), la disminución obtenida indica que la nueva configuración reduce la resuspensión y permite una acumulación más estable de la capa de lodos.
- Este comportamiento concuerda con la implementación del canal transversal, que evita el tironeo de caudal desde el fondo y dirige la extracción hacia la superficie.

5. Velocidad en puntos clave:

- **Zona de Entrada**

- Superficie cerca de la compuerta: 0,079 m/s
- Un poco más abajo: 1,136 m/s
- Cerca del fondo: 0,361 m/s
- **Análisis:** Aunque todavía existe una aceleración evidente en la zona de ingreso, los valores son menores en comparación con la configuración original, donde el impacto del chorro presentaba velocidades superiores incluso en zonas profundas.

Ahora, el flujo pierde energía más rápidamente y se distribuye de forma más controlada, lo cual contribuye a minimizar el arrastre horizontal.

- **Zona de Decantación (Debajo de las Lamelas – Corte Longitudinal)**

- 1er tercio: 0,283 m/s
- 2do tercio: 0,202 m/s
- 3er tercio: 0,106 m/s
- **Análisis:** Se observa un descenso progresivo de velocidades a medida que el flujo avanza hacia el final del sedimentador. Esto representa una mejora significativa respecto al comportamiento original, donde las velocidades aumentaban hacia el tercer tercio, lo cual era completamente contrario a un diseño de sedimentación eficiente. El patrón decreciente favorece la clarificación.

- **Zona de Decantación (Medio de Lamelas)**

- 1er tercio: 0,293 m/s
- 2do tercio: 0,315 m/s
- 3er tercio: 0,111 m/s
- **Análisis:** Las velocidades en el medio de las lamelas se mantienen controladas, con una ligera elevación en el segundo tercio, pero sin alcanzar valores disruptivos. Al final del recorrido, la caída a 0,111 m/s muestra que el diseño permite un flujo más tranquilo y favorable para la separación sólido-líquido.

- **Zona de Decantación (Encima de Lamelas)**

- 1er tercio: 0,339 m/s
- 2do tercio: 0,113 m/s
- 3er tercio: 0,200 m/s
- **Análisis:** A diferencia del diseño original, en el modelo mejorado la zona encima de las lamelas muestra mayor estabilidad y menor dispersión de velocidades. Los valores del segundo y tercer tercio son adecuados para conservar la lámina de agua

clara antes de la salida.

- **Zona de Lodos**

- 1er tercio: 0,790 m/s
- 2do tercio: 0,322 m/s
- 3er tercio: 0,328 m/s
- **Análisis:** Aunque el primer tercio sigue mostrando valores importantes, los otros dos tercios registran velocidades notablemente menores que en el diseño original. Esto reduce la resuspensión masiva de sólidos. La presencia de velocidades más bajas en sectores centrales y finales permite un mejor comportamiento del manto de lodos.

- **Velocidades Intermedias (entre zona de decantación y zona de lodos)**

- 1er tercio: 0,294 m/s
- 2do tercio: 0,141 m/s
- 3er tercio: 0,104 m/s
- **Análisis:** El escalonamiento decreciente es un claro síntoma de mejora hidráulica. Estas velocidades permiten la transición progresiva del flujo hacia la zona inferior sin generar turbulencia excesiva

- **Zona de Salida – Canal Transversal**

- Dentro del canal: 0,531 m/s, 0,144 m/s y 0,178 m/s
- Debajo del canal (corte transversal): 0,440 / 0,309 / 1,771 m/s
- **Análisis:** El canal transversal está funcionando como amortiguador hidráulico: recoge el flujo de manera más uniforme y evita el tironeo desde el fondo. Aunque en un lateral aparece un valor alto (1,771 m/s), este corresponde a un punto puntual del flujo ascendente previo al vertedero. Lo importante es que los valores dentro del canal se mantienen entre 0,144 y 0,531 m/s, lo cual es adecuado para una salida superficial.

6. Comentario general:

- **Análisis de Síntesis:**

- El comportamiento global del fluido en el modelo mejorado evidencia reducciones significativas de velocidad en zonas críticas, especialmente en:
 - La zona de lodos
 - La zona de decantación media y final
 - La salida del sedimentador
- Asimismo, el flujo muestra una mayor uniformidad y menos cortocircuito hidráulico.
- En el modelo original, el chorro inicial penetraba toda la unidad, atravesando las lamelas y alcanzando violentamente la zona de lodos.
- Ahora, gracias al incremento de la cresta y la instalación del canal transversal, la energía se disipa más progresivamente y se retiene más tiempo dentro del sedimentador.
- El sistema mejorado logra mayor tiempo de retención hidráulico efectivo, menor mezcla interna y un patrón más estable que fomenta la clarificación.
- En términos operativos, esto representa una mejora real, coherente con la experiencia del operador y con el desempeño observado en la planta.

7. Análisis de líneas de corriente:

- **Corte longitudinal**

- Las líneas de corriente se observan:
- Más uniformes
- Menos concentradas
- Con direcciones diversas (subidas, bajadas, diagonales, curvas)
- Con menor turbulencia en la zona de lodos y en la zona de decantación
- El flujo asciende en los primeros dos tercios, pero al no encontrar salida, retorna y se redistribuye, aumentando el TRH. Esto es exactamente lo que se buscaba.

- **Vista en planta**

- Las líneas se concentran más en la zona central, lo cual es correcto dada la forma trapecial del sedimentador. Los extremos muestran menos líneas, pero el flujo

general es más calmado y estable.

- **Corte transversal**

- La distribución es más uniforme:
- En la zona de lodos hay mayor presencia de líneas, pero no violenta
- Bajo las lamelas las líneas ya no forman remolinos caóticos
- Sobre las lamelas se observa ascenso uniforme hacia el vertedero
- Esto confirma que el flujo superficial es más controlado.

8. Concordancia con los criterios teóricos:

- Aunque algunas velocidades siguen siendo superiores a los valores ideales propuestos en NB 689 y OPS, el sistema mejorado sí reduce velocidades críticas respecto al diseño original. Esto es fundamental porque:
 - La planta de Tabladita opera con turbiedades extremadamente variables (hasta 5.000 NTU).
 - A pesar de no cumplir estrictamente ciertos límites teóricos, la planta ha demostrado eficiencia operativa real.
 - Lograr reducciones de velocidad, aunque no sean perfectas, mejora el comportamiento del sedimentador y contribuye al funcionamiento global.
- **Conclusión teórica:** La mejora geométrica logra:
 - Menor turbulencia
 - Mayor uniformidad
 - Mejor TRH
 - Menor resuspensión de lodos
 - Mejor comportamiento laminar en zonas superiores
 - Reducciones claras respecto al modelo original
- Esto demuestra que la propuesta es válida, funcional y coherente con la teoría hidráulica de sedimentadores lamelares.

5.5.2. Distribución de velocidades y líneas de corriente para $Q = 215,03$ L/s (caudal mínimo operativo).

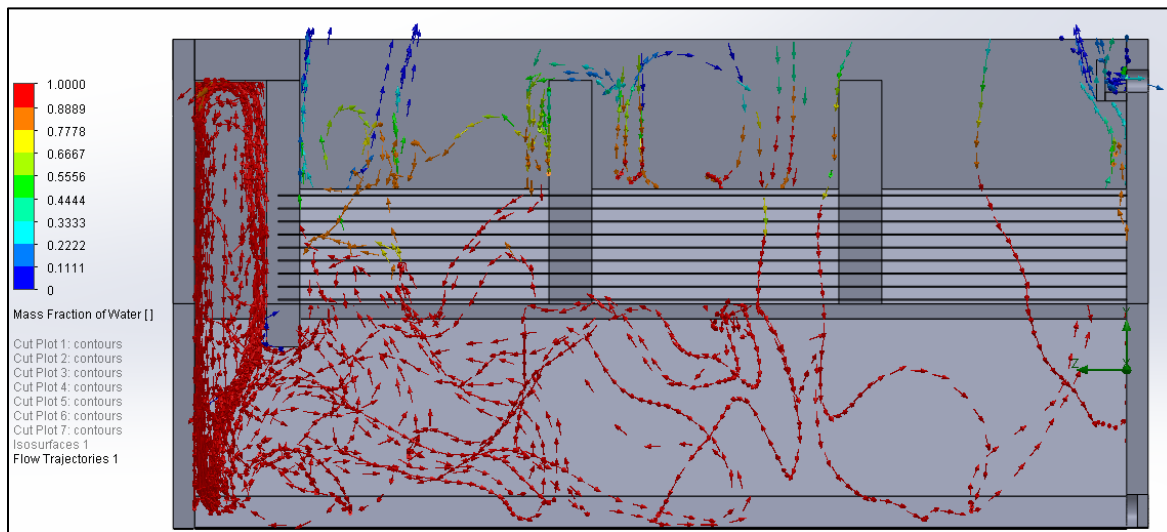


Figura 48. Distribución de líneas de corriente en corte longitudinal por el centro del sedimentador para $Q = 215,03$ L/s

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

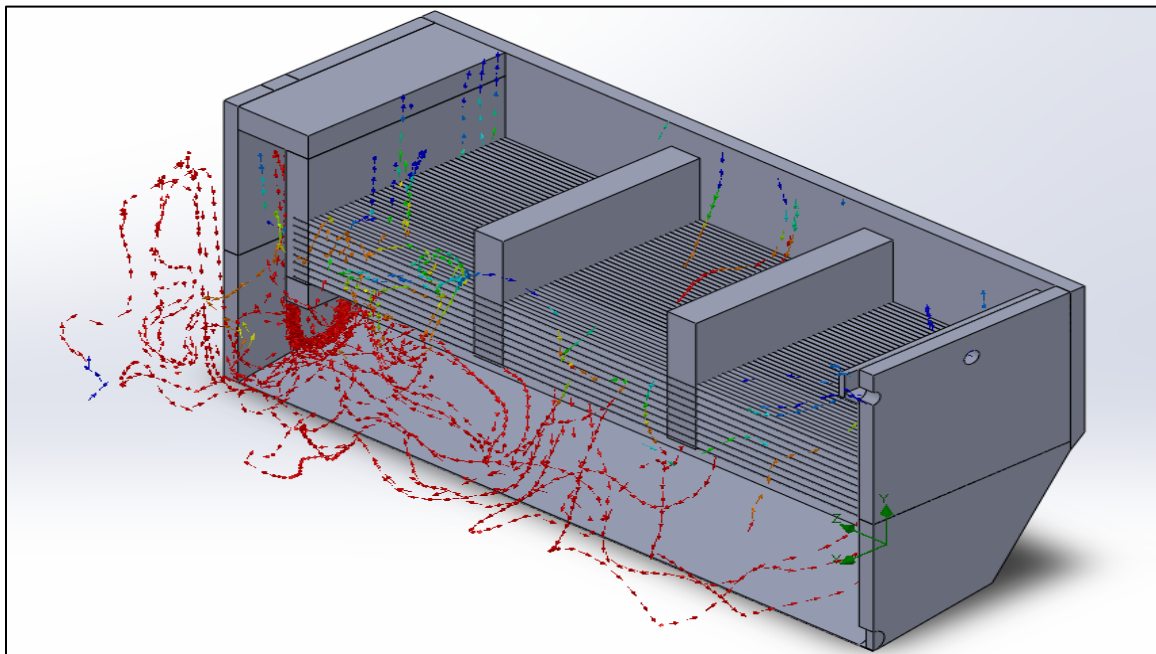


Figura 49. Distribución de líneas de corriente en vista tridimensional para $Q = 215,03$ L/s

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

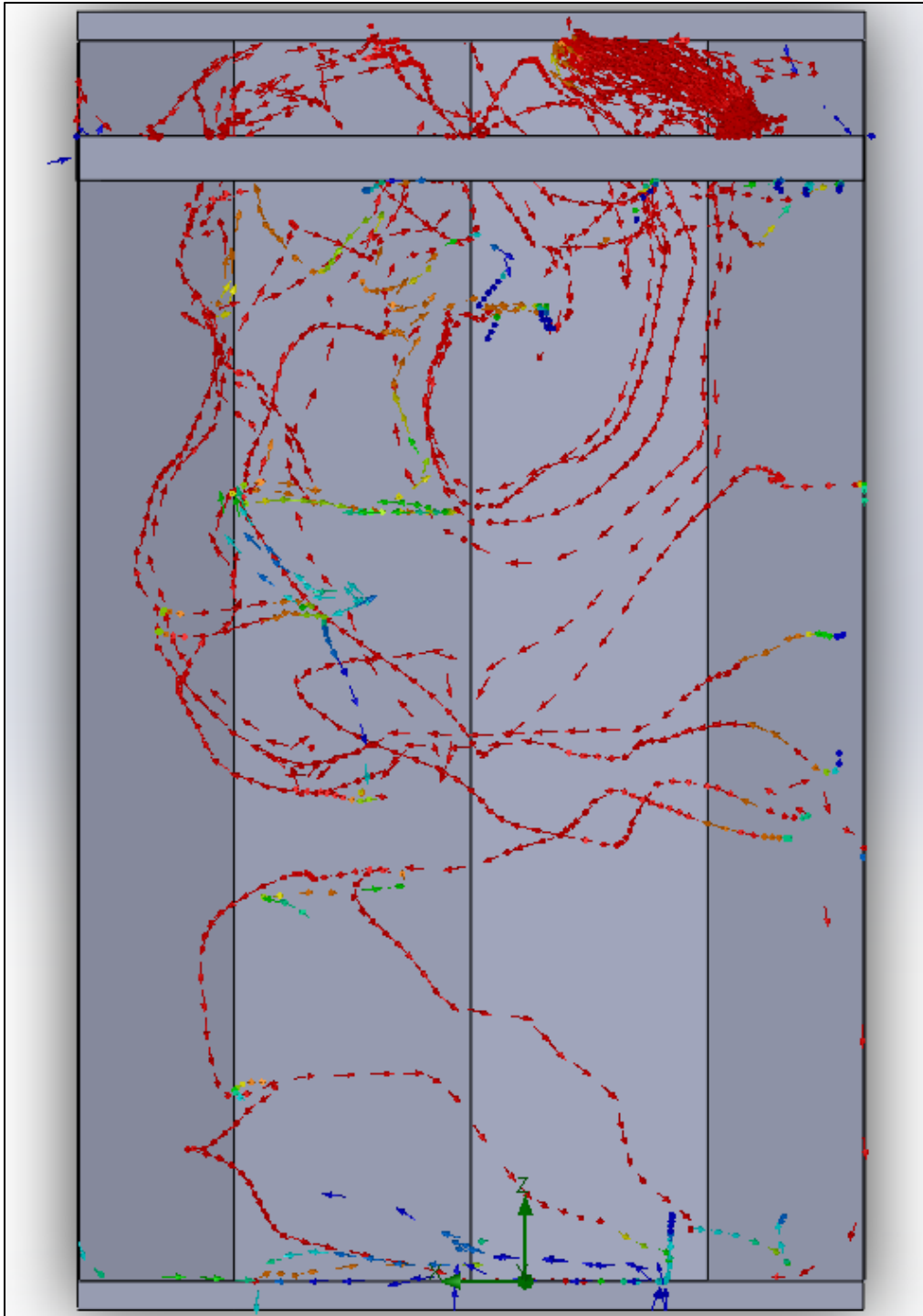


Figura 50. Distribución de líneas de corriente en vista en planta debajo de las lamelas para $Q = 215,03 \text{ L/s}$

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

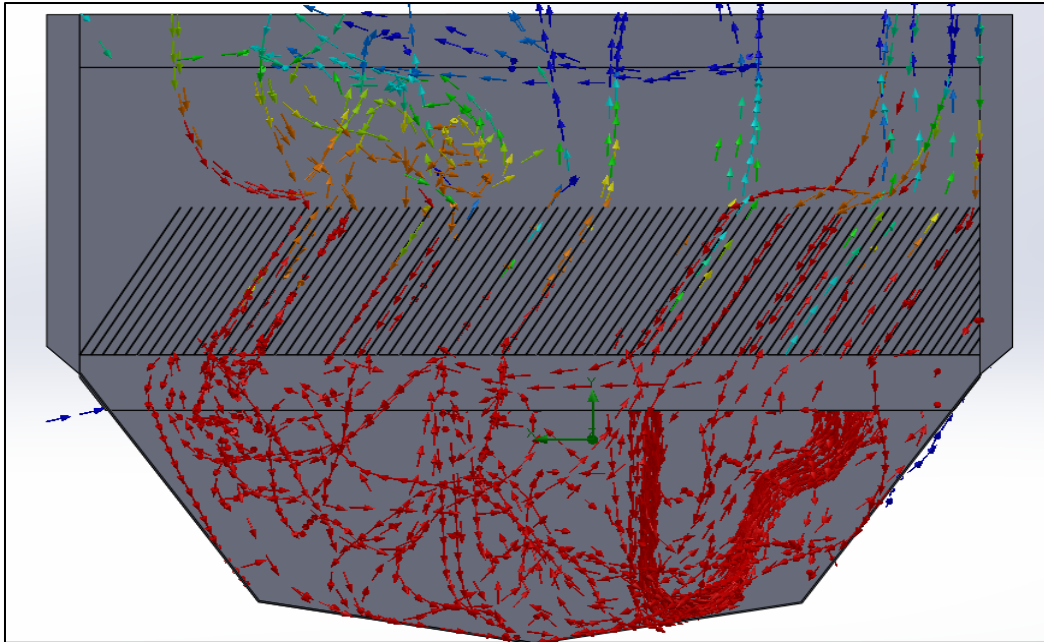


Figura 51. Distribución de líneas de corriente en corte transversal al flujo en el centro del sedimentador para $Q = 215,03 \text{ L/s}$

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

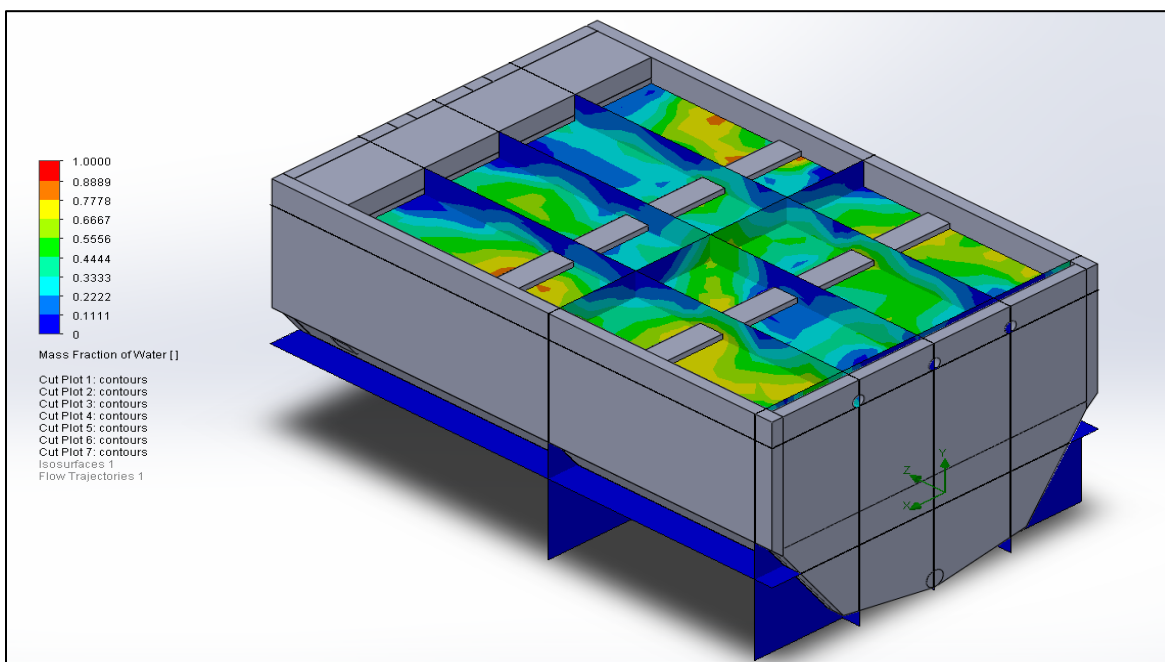


Figura 52. Distribución de velocidades en vista tridimensional para $Q = 215,03 \text{ L/s}$

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

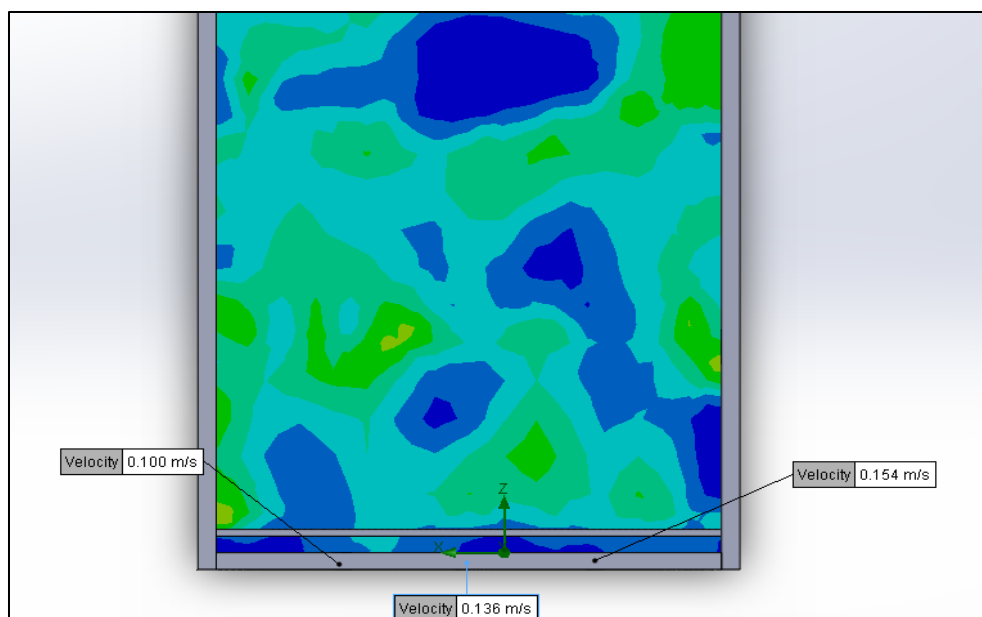


Figura 53. Distribución de velocidades en vista en planta a la altura del Canal rectangular tipo vertedero para $Q = 215,03 \text{ L/s}$

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

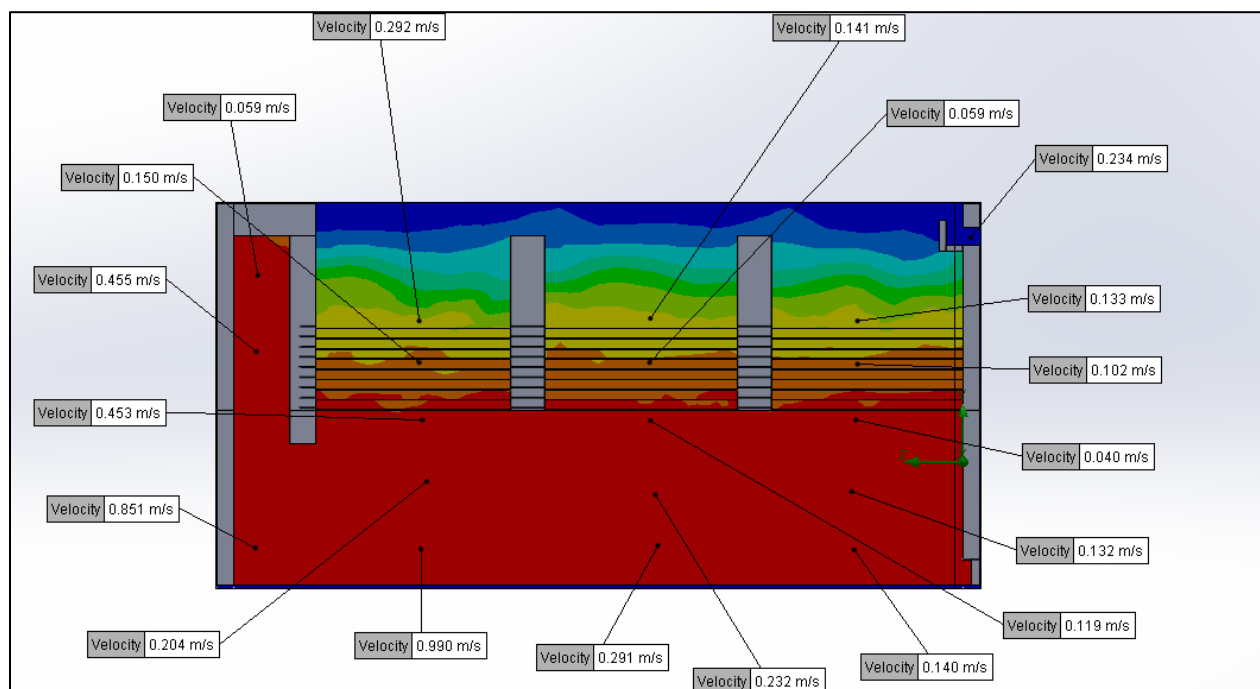


Figura 54. Distribución de velocidades en corte longitudinal por el centro de sedimentador para $Q = 215,03 \text{ L/s}$

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

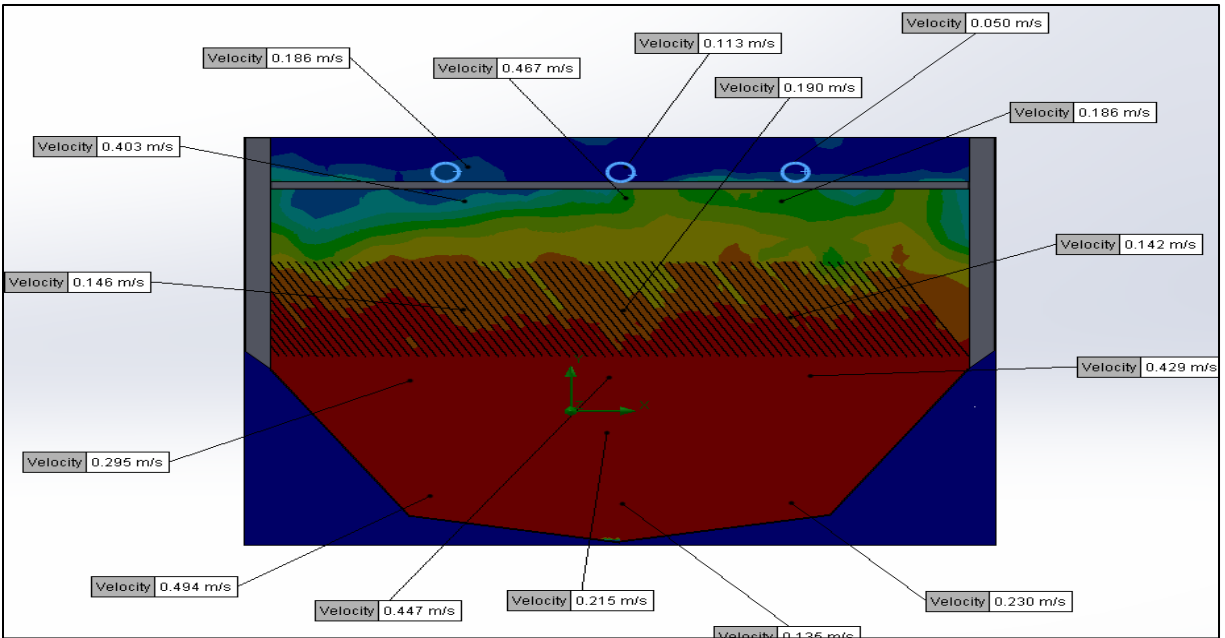


Figura 55. Distribución de velocidades en corte transversal al flujo en el centro del sedimentador para $Q = 215,03 \text{ L/s}$

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Criterios de observación en relación de la Figura 48 a la 55 , podemos indicar lo siguiente::

1. Uniformidad de la velocidad:

- **Observación:** La velocidad del flujo no es completamente uniforme. En el modelo mejorado se registran velocidades desde $0,040 \text{ m/s}$ hasta $0,990 \text{ m/s}$, lo cual muestra un gradiente apreciable dentro de la unidad.
- **Análisis:**
 - A pesar de la variación, la distribución es más homogénea respecto al modelo original. En el diseño sin mejoras existían cambios abruptos e inestabilidad extrema en la transición entrada–decantación–lodos. Aquí, el flujo se comporta de forma más controlada:
 - Las zonas medias muestran velocidades moderadas.
 - La zona de lodos ya no presenta picos descontrolados
 - Las lamelas actúan con mayor estabilidad hidráulica.
 - Esto demuestra que las modificaciones (cresta +40 cm y canal transversal) reparten mejor el caudal, reducen zonas críticas y permiten un patrón de flujo más estable y

favorable a la sedimentación.

2. Variación de la velocidad mínima y máxima (V_{min} y V_{max}):

- **Observación:** La velocidad mínima registrada es 0,040 m/s y la máxima 0,990 m/s.
- **Análisis:** Aunque la diferencia sigue siendo considerable, representa una mejora importante comparada con el caso original, donde las velocidades máximas superaban los 0,7 m/s en zonas de decantación y se acercaban a 1 m/s incluso en la zona de salida, lo cual es inaceptable para sedimentación laminar. En el modelo mejorado:
 - La velocidad máxima está más limitada y más localizada, no distribuida de manera explosiva.
 - La velocidad mínima en la zona de lodos está cerca del rango favorable para evitar resuspensión ($<0,015\text{--}0,03$ m/s).
 - La diferencia $V_{max}\text{--}V_{min}$ es grande, pero mucho menos destructiva que antes.
 - Esto indica que se mitigó el cortocircuito hidráulico y se redujo la fuerza del chorro en zonas críticas.

3. Ubicación de la velocidad más fuerte (V_{max}):

- **Observación:** El valor máximo de 0,990 m/s aparece en la zona de lodos, en el primer tercio longitudinal del sedimentador.
- **Análisis:** En el diseño original, la velocidad máxima se ubicaba encima de las lamelas justo después de la entrada, cortando toda la lámina de agua y anulando la decantación. Aquí, aunque la velocidad máxima sigue siendo alta, su ubicación cambia a una zona de menor impacto hidráulico sobre la clarificación.
 - El pico de velocidad ya no rompe flóculos directamente en la zona de decantación superior.
 - El efecto jet ya no atraviesa al sedimentador de punta a punta.
 - La zona donde se ubica V_{max} es más contenida y más fácil de manejar desde el punto de vista hidráulico.
 - Aunque no es perfecto, sí es una mejora operativa real.

4. Ubicación de la velocidad más lenta (V_{min}):

- **Observación:** La velocidad más baja, 0,040 m/s, se encuentra en el tercer tercio

longitudinal debajo de las lamelas, justo antes de la salida.

- **Análisis:** Esta ubicación es adecuada, ya que los flujos más lentos deben encontrarse en la parte final del sedimentador, donde la clarificación debería estar consolidándose. En el modelo original, los valores más bajos aparecían junto a zonas turbulentas o no aparecían en absoluto debido al arrastre masivo. Ahora:
 - La parte final tiene velocidades bajas y estables.
 - Esto favorece la decantación superficial.
 - El flujo llega “más maduro” al canal transversal, lo cual garantiza que la extracción superficial sea más clara.

5. Velocidad en puntos clave:

- **Vista en planta – Canal rectangular tipo vertedero**
 - Extremo izquierdo: 0,100 m/s
 - Centro: 0,136 m/s
 - Extremo derecho: 0,154 m/s
 - Análisis: El canal transversal muestra velocidades muy uniformes en los tres puntos. Esto confirma su función como distribuidor superficial equilibrado, lo cual fue el objetivo principal del rediseño en la zona de salida
- **Zona de Entrada – Corte longitudinal**
 - Superficie: 0,059 m/s
 - Zona media: 0,455 m/s
 - Casi fondo: 0,851 m/s
 - Análisis: Aunque aún hay aceleración vertical, la magnitud es menor que en el diseño sin mejoras. El flujo pierde energía más rápidamente, lo que reduce el impacto directo en la zona de decantación.
- **Zona de Decantación – Debajo de las Lamelas**
 - 1er tercio: 0,453 m/s

- 2do tercio: 0,119 m/s
- 3er tercio: 0,040 m/s
- Análisis: El patrón es claramente decreciente, lo cual es ideal. Esto no ocurría antes: el diseño original mostraba un incremento hacia el final, lo cual era totalmente desfavorable.
- **Zona de Decantación – Medio de Lamelas**
 - 1er tercio: 0,150 m/s
 - 2do tercio: 0,059 m/s
 - 3er tercio: 0,102 m/s
 - Análisis: Se observa un comportamiento moderado, controlado, con valores mucho más estables que antes.
- **Zona de Decantación – Encima de Lamelas**
 - 1er tercio: 0,292 m/s
 - 2do tercio: 0,141 m/s
 - 3er tercio: 0,133 m/s
 - Análisis: Los valores son adecuados para permitir la clarificación superficial.
 - En el diseño original, esta zona estaba completamente perturbada por el jet de entrada.
- **Zona de Lodos**
 - 1er tercio: 0,990 m/s
 - 2do tercio: 0,291 m/s
 - 3er tercio: 0,140 m/s
 - Análisis: El primer tercio sigue mostrando un valor elevado, pero la reducción en los otros dos tercios es significativa. La disminución en el segundo y tercer tercio evita la remoción continua de la capa de lodo.

- **Velocidades intermedias (Decantación–Lodos)**

- 1er tercio: 0,204 m/s
- 2do tercio: 0,232 m/s
- 3er tercio: 0,132 m/s
- Análisis: Se aprecia un comportamiento estable y sin valores disruptivos.

- **Zona de Salida**

- Antes del canal: 0,234 m/s
- Corte transversal (debajo del canal): 0,403 / 0,467 / 0,186 m/s
- Dentro del canal: 0,186 / 0,113 / 0,050
- Análisis: El vertedero trabaja como un amortiguador de energía, garantizando velocidades bajas en el plano de extracción superficial. El valor de 0,050 m/s en el extremo derecho es particularmente positivo.

6. Comentario general:

- **Análisis de Síntesis:** El modelo mejorado para $Q = 215,03 \text{ L/s}$ muestra un comportamiento mucho más estable y predecible que el modelo original. Las velocidades están más controladas, la zona de decantación presenta gradientes decrecientes, la zona de lodos ya no experimenta turbulencia extrema, y la salida mediante el canal transversal permite un flujo final más sereno. Las modificaciones geométricas lograron:
 - Menor turbulencia interna. y reducción del impacto del jet inicial.
 - Distribución más uniforme.
 - Incremento real del tiempo de retención hidráulico.
 - Menor arrastre de sólidos hacia la salida.
- Todo esto evidencia que la propuesta de mejora sí produjo un impacto positivo en la hidráulica del sedimentador.

7. Análisis de líneas de corriente:

- **Corte longitudinal**

- Gran concentración inicial en la entrada (normal).

- Flujo más uniforme debajo de las lamelas.
- En el 1er y 2do tercio longitudinal las líneas de corriente son numerosas y estables.
- En el 3er tercio disminuyen, indicando flujo más calmado antes de la salida.
- La dirección de líneas es variada: ascensos, descensos, curvas, diagonales → típico de flujo controlado, pero no turbulento extremo.
- Esto confirma que el flujo debe recorrer prácticamente toda la longitud antes de poder subir al vertedero, lo cual incrementa el TRH.
- **Vista tridimensional:** Muestra el mismo patrón: flujo central dominante (por geometría), pero sin turbulencia severa.
- **Vista en planta:** Debajo de las lamelas se observan pocas líneas en los costados y un núcleo central estable. Esto es positivo porque reduce las zonas muertas laterales del diseño original.
- **Corte transversal**
 - En zona de lodos: muchas líneas, pero ordenadas.
 - En decantación: líneas uniformes en debajo/medio/encima de lamelas.
 - En salida: líneas ascendentes suaves → comportamiento superficial adecuado.
 - El rediseño del vertedero está funcionando correctamente.

8. Concordancia con los criterios teóricos:

- Aunque algunas velocidades siguen siendo mayores a los valores ideales teóricos (especialmente en zona de entrada y primer tercio), lo importante es la tendencia de mejora:
 - Disminución de velocidades críticas, Reducción de turbulencia.
 - Mayor área de flujo laminar. Mejor TRH.
 - Mejor distribución superficial.
- La NB 689 y la OPS recomiendan valores bajos, pero la planta Tabladita opera con altas cargas de sólidos y turbiedades extremas, por lo que la comparación debe ajustarse a la realidad operativa.
- **Conclusión teórica:** La implementación de las mejoras produce un comportamiento más estable, más cercano a condiciones laminares y más compatible con sedimentación eficiente. Aunque no se cumplen todos los valores ideales, sí se logró mejorar la hidráulica interna, lo cual es exactamente lo que busca una propuesta de optimización.

5.5.3. Distribución de velocidades y líneas de corriente para $Q = 160 \text{ L/s}$ (caudal de diseño).

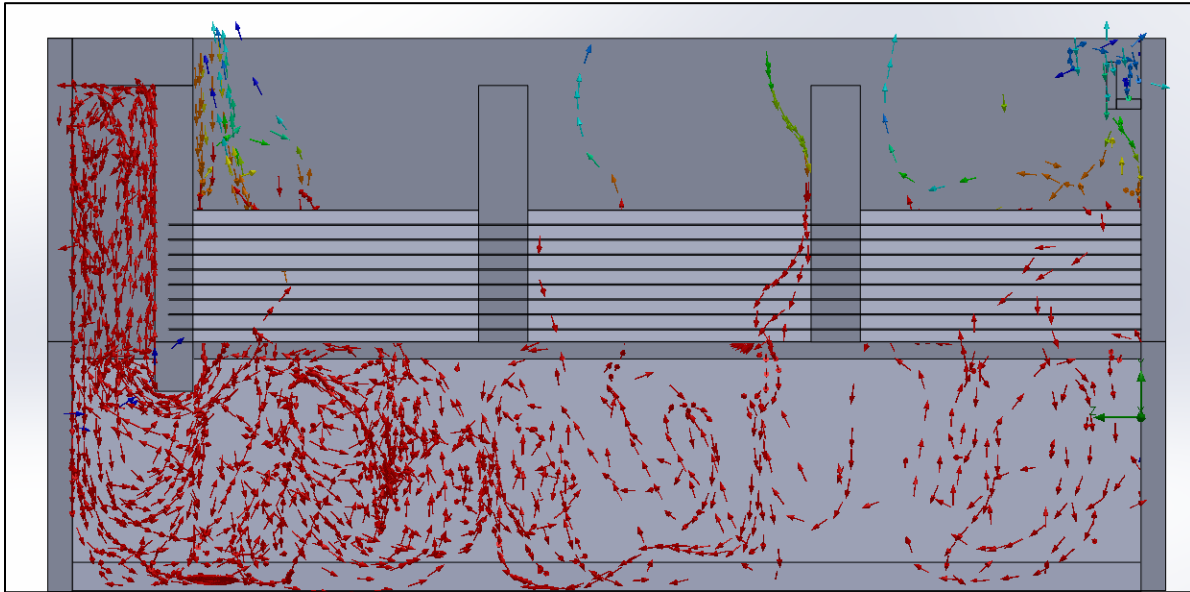


Figura 56. Distribución de líneas de corriente en corte longitudinal por el centro del sedimentador para $Q = 160 \text{ L/s}$

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

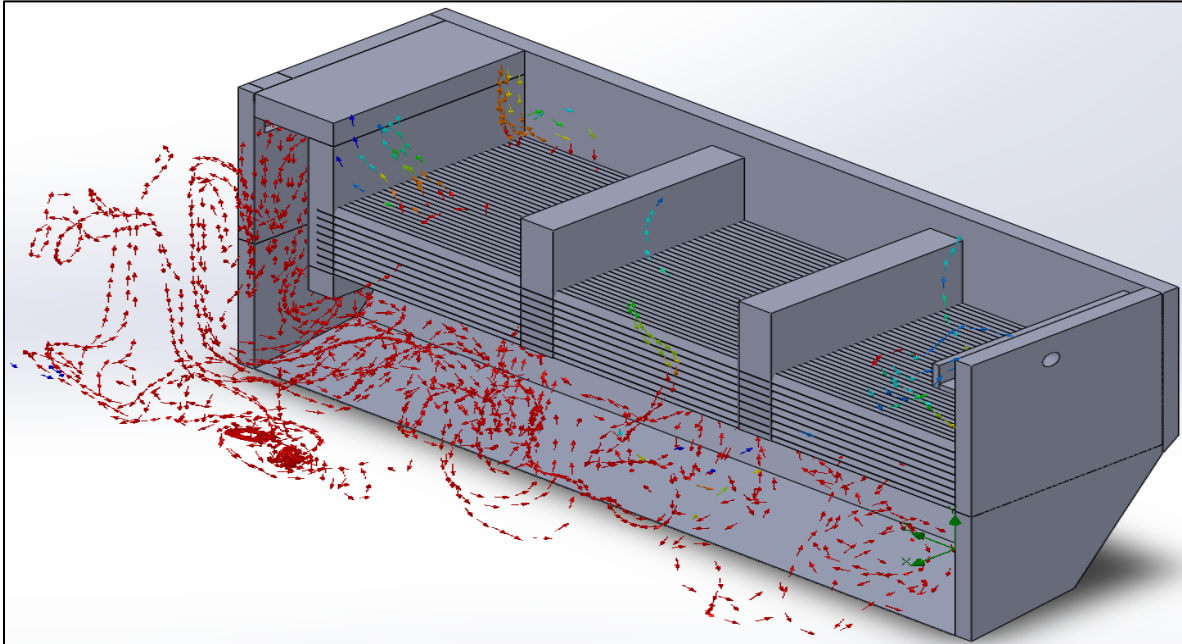


Figura 57. Distribución de líneas de corriente en vista tridimensional para $Q = 160 \text{ L/s}$

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

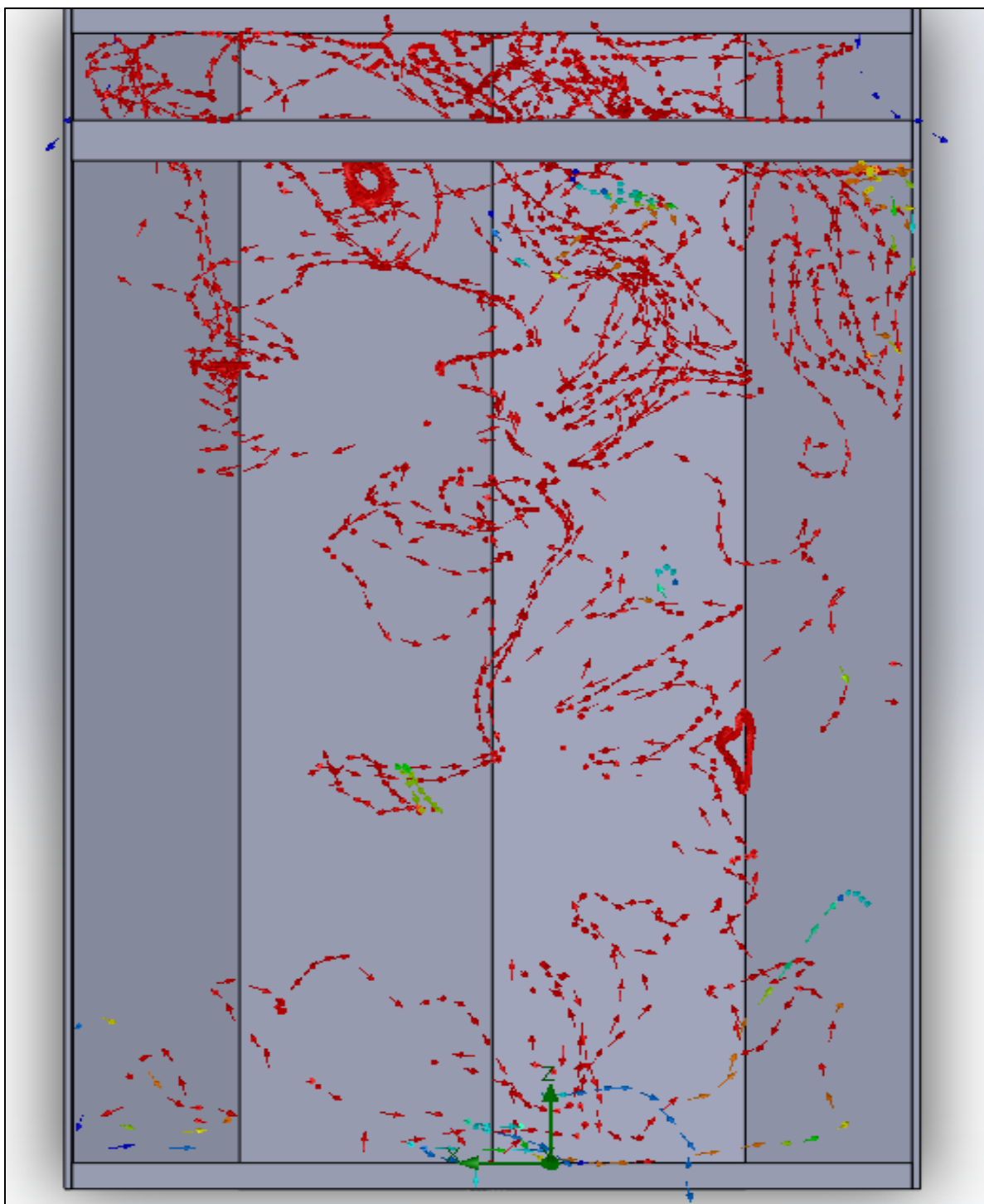


Figura 58. Distribución de líneas de corriente en vista en planta debajo de las lamelas para $Q = 160 \text{ L/s}$

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

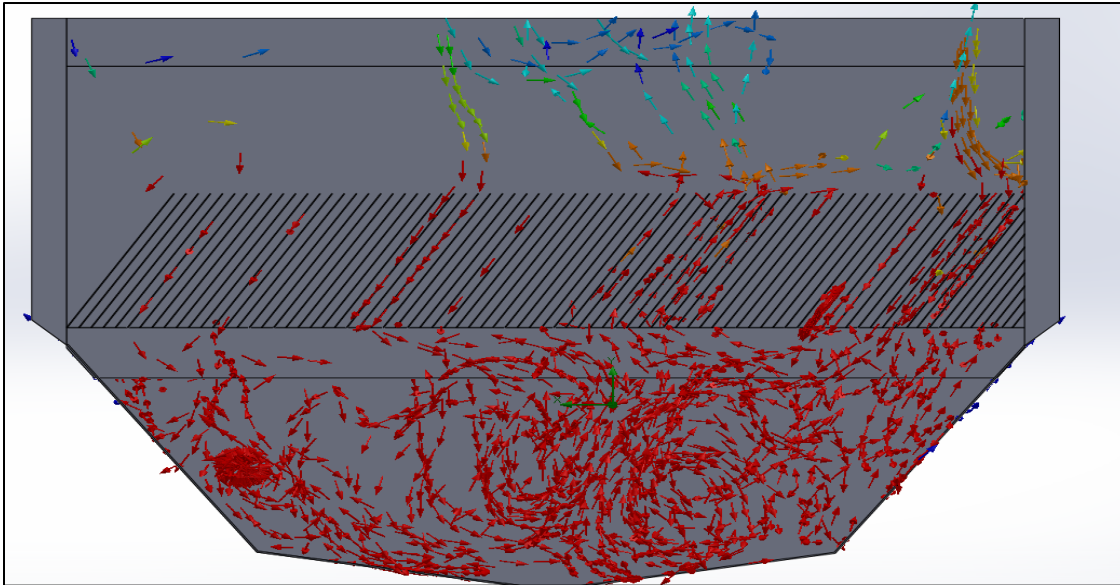


Figura 59. Distribución de líneas de corriente en corte transversal al flujo en el centro del sedimentador para $Q = 160 \text{ L/s}$

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

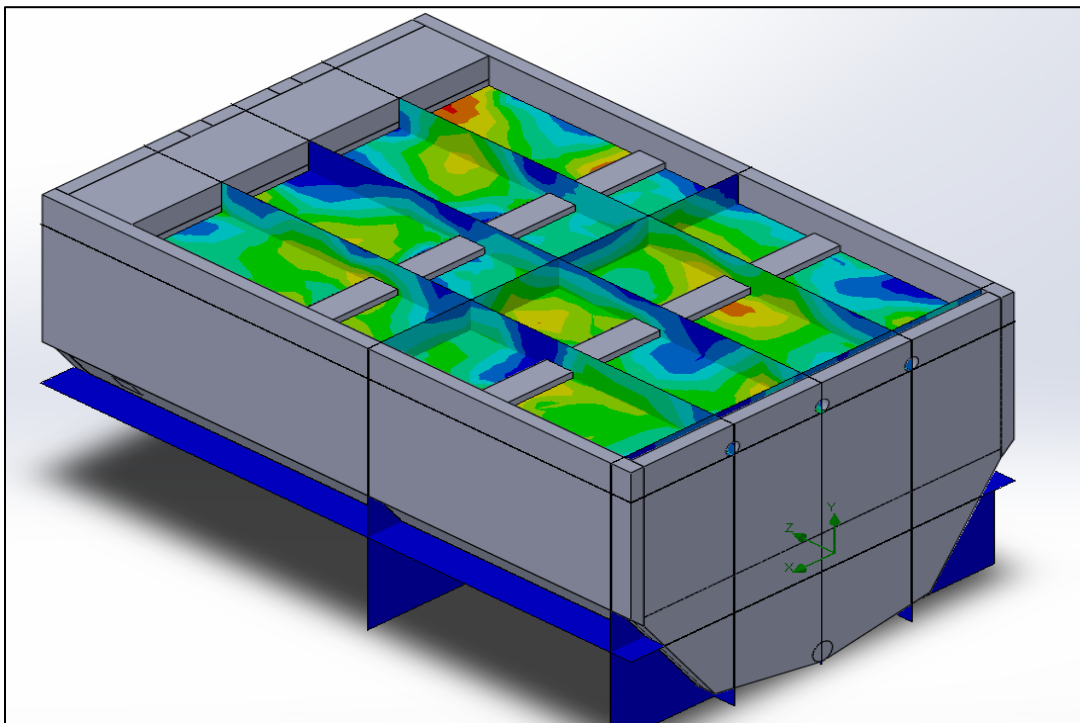


Figura 60. Distribución de velocidades en vista tridimensional para $Q = 160 \text{ L/s}$

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

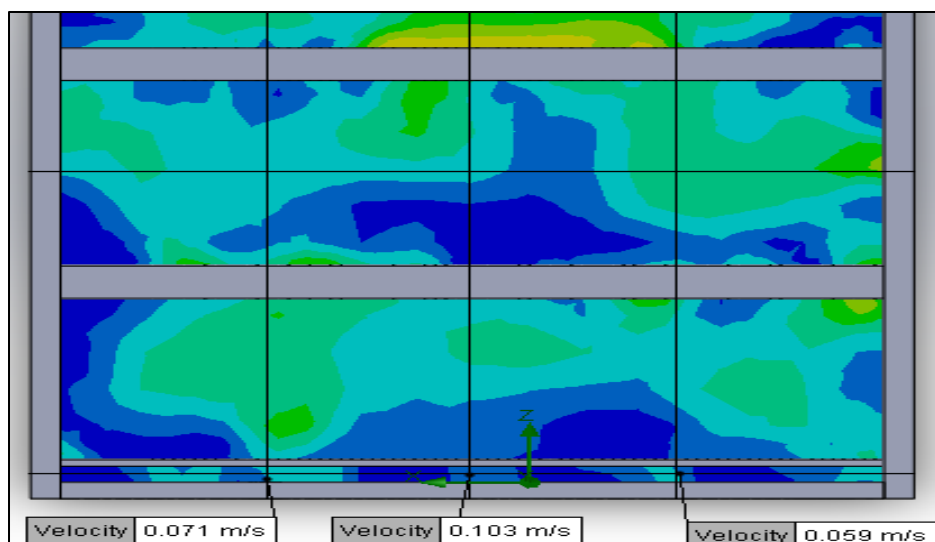


Figura 61. Distribución de velocidades en vista en planta a la altura del Canal rectangular tipo vertedero para $Q = 160 \text{ L/s}$

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

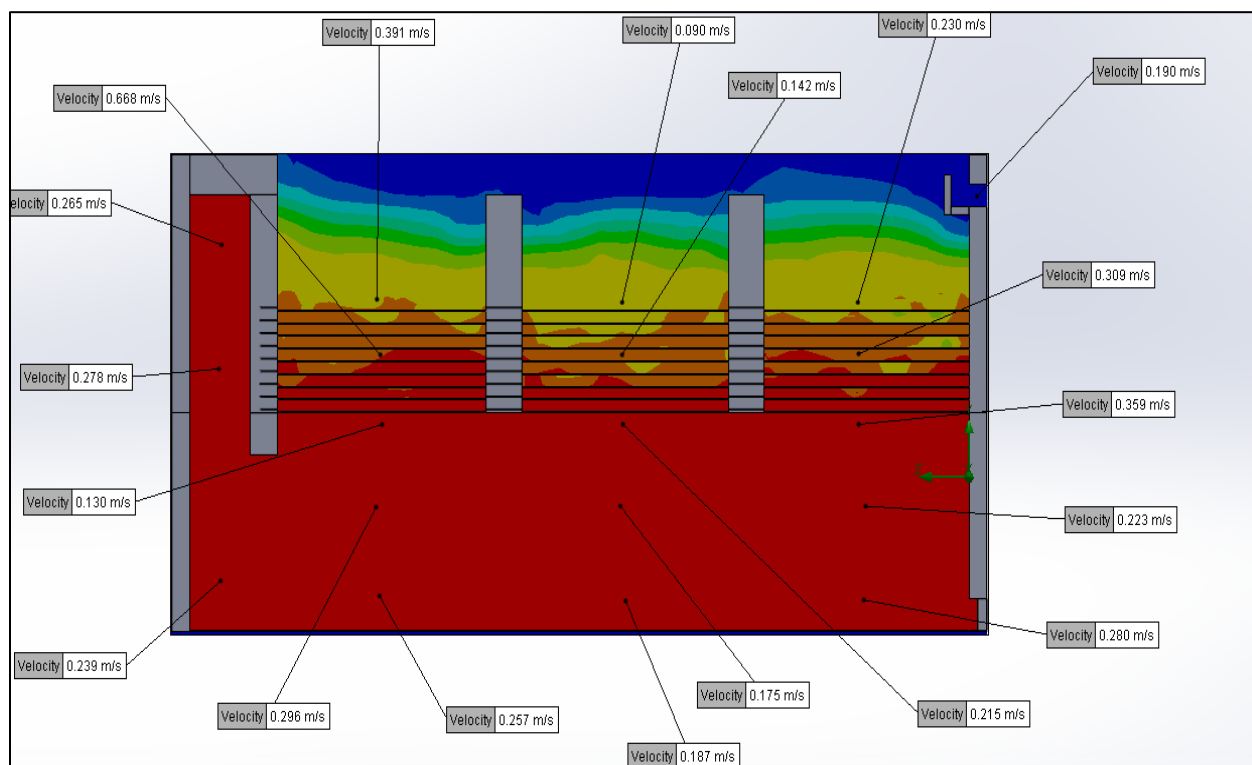


Figura 62. Distribución de velocidades en corte longitudinal por el centro de sedimentador para $Q = 160 \text{ L/s}$

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

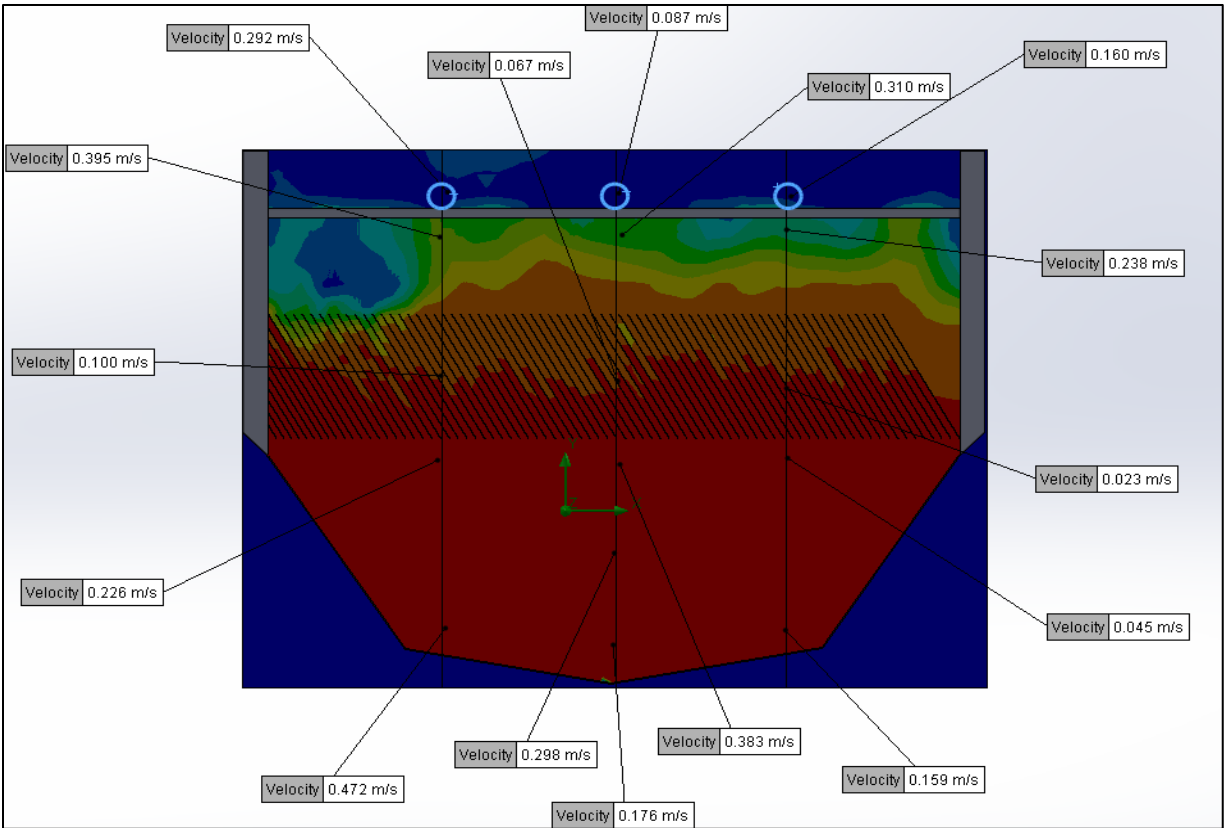


Figura 63. Distribución de velocidades en corte transversal al flujo en el centro del sedimentador para $Q = 160 \text{ L/s}$

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación CFD (SolidWorks Flow Simulation)

Criterios de observación en relacion de la Figura 56 a la 63, podemos indicar lo siguiente::

1. Uniformidad de la velocidad:

- **Observación:** La velocidad no es completamente uniforme. En este caso se registran valores entre 0,023 m/s y 0,668 m/s en el interior del sedimentador.
- **Análisis:** Aunque sigue habiendo variación, el patrón de velocidades es más homogéneo que en los caudales mayores y muchísimo más uniforme que en el modelo original sin mejoras. Las diferencias entre zonas son más suaves, no se observan saltos bruscos ni chorros de alta velocidad atravesando la unidad, y la mayor parte del volumen fluido se mueve en un rango claramente inferior al de los otros dos caudales.
- En resumen, para $Q = 160 \text{ L/s}$ el sedimentador opera con su comportamiento hidráulico

más estable y “tranquilo”, lo cual es coherente con que se trata del caudal de diseño.

2. Variación de la velocidad mínima y máxima (V_{min} y V_{max}):

- **Observación:** La velocidad mínima observada es de 0,023 m/s y la máxima de 0,668 m/s.
- **Análisis:** La diferencia entre V_{min} y V_{max} es menor que en los otros dos caudales (342,25 y 215,03 L/s), lo que confirma que el gradiente de velocidades es más moderado. La velocidad máxima de 0,668 m/s, aunque aún por encima de los valores ideales teóricos para régimen estrictamente laminar, es sustancialmente menor que los picos observados en el modelo original y que los registrados para el caudal máximo operativo. La velocidad mínima de 0,023 m/s se ubica ya muy cerca del rango recomendado para evitar resuspensión en la zona de lodos, por lo que desde el punto de vista de diseño este es el escenario más favorable de los tres.

3. Ubicación de la velocidad más fuerte (V_{max}):

- **Observación:** La velocidad máxima de 0,668 m/s se registra en el corte longitudinal por el centro del sedimentador, en la zona de decantación, en el primer tercio longitudinal, en medio de las lamelas.
- **Análisis:** Que la máxima velocidad se localice en medio de las lamelas del primer tercio y no en la salida ni en el fondo es un cambio importante respecto al comportamiento original. Ya no se trata de un chorro que atraviesa toda la unidad, sino de una zona puntual donde el flujo se acelera al comenzar a ingresar entre las placas. Si bien el valor aún es alto, su localización es más compatible con el funcionamiento lamelar, porque:
 - No corta la lámina de agua en la parte superior.
 - No impacta directamente sobre la zona de lodos.
 - No genera un cortocircuito longitudinal tan severo como antes.

4. Ubicación de la velocidad más lenta (V_{min}):

- **Observación:** La velocidad mínima de 0,023 m/s se encuentra en el corte transversal al flujo, en el centro del sedimentador, en la zona de decantación, en medio de las lamelas, hacia el extremo derecho.
- **Análisis:** Es positivo que el valor mínimo se encuentre en una zona de decantación y no solo en un rincón sin relevancia hidráulica. Ello indica que existen regiones dentro de las

placas donde el agua se mueve muy lentamente, favoreciendo la sedimentación de flóculos finos.

- Esta condición, combinada con las velocidades moderadas en la salida, sugiere que el flujo tiene tiempo suficiente para clarificarse antes de alcanzar el vertedero.

5. Velocidad en puntos clave:

- **Vista en planta – Canal rectangular tipo vertedero**
 - Extremo izquierdo: 0,071 m/s
 - Centro: 0,103 m/s
 - Extremo derecho: 0,059 m/s
 - Análisis: Los valores son bajos y bastante uniformes a lo largo de la cresta. El canal transversal reparte el caudal de forma equilibrada y confirma que la salida superficial trabaja en régimen suave, sin zonas de succión excesiva ni tironeos desde el fondo.
- **Zona de entrada – Corte longitudinal por el centro**
 - Cerca de la superficie (junto a la compuerta): 0,265 m/s
 - Un poco más abajo: 0,278 m/s
 - Cerca del fondo: 0,239 m/s
 - Análisis: El chorro de entrada ya no genera velocidades descontroladas. Se observa un perfil relativamente regular y sin valores extremos. Esto significa que la energía del flujo se disipa con rapidez y no penetra de forma violenta hacia el interior, a diferencia del modelo original.
- **Zona de decantación – Debajo de las lamelas**
 - 1er tercio: 0,130 m/s
 - 2do tercio: 0,215 m/s
 - 3er tercio: 0,359 m/s
 - Análisis: En esta zona hay un ligero incremento hacia el tercer tercio, lo cual indica

que todavía existe cierta aceleración en el tramo final por debajo de las placas. Sin embargo, los valores son mucho menores que los observados originalmente y no alcanzan niveles tan destructivos para la sedimentación como en el caso sin mejoras.

- **Zona de decantación – Medio de las lamelas**

- 1er tercio: 0,668 m/s
- 2do tercio: 0,142 m/s
- 3er tercio: 0,309 m/s
- Análisis: El máximo ya comentado (0,668 m/s) se concentra en el primer tercio; luego las velocidades caen fuertemente en el segundo tercio y se mantienen moderadas en el tercero. Esto muestra que el flujo se estabiliza rápidamente después de entrar al paquete lamelar.

- **Zona de decantación – Encima de las lamelas**

- 1er tercio: 0,391 m/s
- 2do tercio: 0,090 m/s
- 3er tercio: 0,230 m/s
- Análisis: En la zona superior se observa un comportamiento muy favorable: el segundo tercio presenta una velocidad especialmente baja, y el tercero mantiene un valor aceptable. La lámina de agua clarificada sobre las lamelas, por lo tanto, tiene condiciones cercanas a un flujo laminar.

- **Zona de lodos**

- Casi al fondo:
 - 1er tercio: 0,257 m/s
 - 2do tercio: 0,187 m/s
 - 3er tercio: 0,280 m/s
- Velocidades algo más arriba (debajo de lamelas):

- 1er tercio: 0,296 m/s
- 2do tercio: 0,175 m/s
- 3er tercio: 0,233 m/s
- Análisis: Las velocidades en la zona de lodos son sensiblemente menores que en el modelo original y menores que en el caudal máximo. Aunque todavía están por encima de los valores ideales, el riesgo de resuspensión se ha reducido. La capa de lodo puede mantenerse más estable, especialmente en condiciones de operación al caudal de diseño.
- **Zona de salida**
- Antes del canal (corte longitudinal): 0,190 m/s
- Corte transversal, un poco debajo del canal:
 - Extremo izquierdo: 0,395 m/s
 - Centro: 0,310 m/s
 - Extremo derecho: 0,238 m/s
- A la altura del canal:
 - Extremo izquierdo: 0,292 m/s
 - Centro: 0,087 m/s
 - Extremo derecho: 0,160 m/s
- Análisis: Los valores en la salida son moderados y mayormente subcríticos. El centro del canal, con 0,087 m/s, muestra una zona de flujo especialmente calmado, lo que es ideal para la extracción del agua clarificada. Las variaciones laterales son pequeñas y confirman que el canal rectangular funciona como vertedero estabilizador.

6. Comentario general:

- **Análisis de síntesis:** Para $Q = 160 \text{ L/s}$, el sedimentador con mejoras presenta el comportamiento hidráulico más estable y cercano al ideal de los tres escenarios evaluados. Las velocidades son menores en casi todas las zonas relevantes, los gradientes son más

suaves, la zona de lodos está menos perturbada, y la salida superficial mediante el canal transversal trabaja con valores bajos y uniformes. Comparado con el modelo original (Capítulo 4), se aprecia claramente:

- Reducción de los picos de velocidad.
 - Menor turbulencia global.
 - Patrones de flujo más ordenados.
 - Mayor tiempo de permanencia del agua antes de llegar a la cresta.
- En términos prácticos, esto significa que la propuesta de mejora funciona mejor justamente al caudal de diseño, y que bajo esta condición el sedimentador lamelar de Tabladita se acerca mucho más al comportamiento esperado para una unidad de alta tasa.

7. Análisis de líneas de corriente:

- **Corte longitudinal por el centro:** En la entrada se concentran más líneas de corriente, como es lógico. En el primer tercio se observa mayor densidad de líneas debajo de las lamelas hasta el fondo; en el segundo y tercer tercio la cantidad se vuelve bastante uniforme, sin remolinos violentos ni recirculaciones caóticas. En medio de las lamelas las líneas son pocas y ordenadas en los tres tercios, lo que indica un flujo más laminar y calmado a través de las placas. Encima de las lamelas y hacia la salida se ve una distribución armónica: un poco más de líneas en el primer tercio, algo menos en el segundo y ligeramente más en el tercero, siempre sin turbulencia extrema.
- **Vista en planta (debajo de lamelas):** El flujo se concentra en la zona central a lo largo de la longitud, con menor cantidad de líneas en los costados debido a la forma trapecial de la unidad. Lo importante es que, a lo largo del primer, segundo y tercer tercio, la cantidad de líneas es bastante semejante: el flujo en planta se ve continuo, sin zonas muertas ni chorros localizados.
- **Corte transversal:** Debajo de las lamelas y en la zona de lodos se observa una mayor concentración de líneas, lo cual es normal porque por allí circula el grueso del caudal. Al subir, se ve cómo las líneas se ordenan hacia la salida, con una ligera mayor concentración hacia el centro y el extremo derecho, pero finalmente distribuyéndose de forma bastante uniforme sobre las lamelas y en el canal transversal. En general, las líneas de corriente muestran un flujo controlado, sin remolinos dominantes ni torbellinos grandes, muy

distinto al patrón desordenado del modelo original.

8. Concordancia con los criterios teóricos:

- Teóricamente, para sedimentadores lamelares se recomiendan velocidades horizontales muy bajas y condiciones cercanas a flujo laminar. Aunque el modelo mejorado para $Q = 160$ L/s todavía no cumple al 100 % los valores ideales de las normas, se acerca mucho más que el diseño original:
 - Las velocidades máximas disminuyen de forma importante.
 - La zona de lodos ya no presenta valores totalmente incompatibles con la sedimentación.
 - La salida superficial trabaja con velocidades bajas y bastante uniformes.
 - El flujo a través de las lamelas es claramente más laminar y estable.
- Desde la teoría y desde la práctica, esto significa que la propuesta de mejora aumenta la viabilidad hidráulica del sedimentador, reduce el riesgo de arrastre de flóculos y mejora las condiciones para alcanzar turbiedades bajas a la salida, especialmente cuando la planta trabaja cerca del caudal de diseño.

5.6. Comparación de Velocidades de Recolección.

Respecto a la rotura del flóculo, se centra en la velocidad excesiva que puede ocurrir tanto en la entrada del sedimentador como en la zona de recolección. La velocidad de ingreso al sistema colector debe ser lo suficientemente baja para no generar cizallamiento en la masa de agua clarificada. La siguiente tabla compara los rangos de velocidad en el punto de contacto entre el agua clarificada y el sistema de recolección en los dos escenarios.

Tabla 27. Comparación del Rango de Velocidades de Ingreso a la Zona de Recolección

Q unit. (L/s)	Escenario Actual			Diseño Mejorado
	Valor De Distribución De Velocidades (m/s)			
	Tubería lateral izquierda (1)	Tubería central (2)	Tubería lateral derecha (3)	Canal rectangular tipo vertedero
De Diseño (40)	0,169	0,134	0,139	0,059

Mínimo Operativo (53,76)	0,047	0,067	0,093	0,100
Máximo Operativo (85,56)	0,069	0,189	0,107	0,144

Fuente: Elaboración propia en base a resultados de la modelación numérica CFD (2025)

Comentario: La velocidad máxima de 0,189 m/s del sistema original es significativamente alta para una zona de recolección, pudiendo romper los flóculos más débiles antes de su paso a los filtros. El diseño del vertedero garantiza que las velocidades sean uniformes y mucho más bajas, minimizando la energía de cizallamiento.

5.6.1. Verificación del Caudal de Recolección en las Tuberías Originales.

Para validar la coherencia de los resultados de velocidad obtenidos en la simulación CFD (SolidWorks), se realiza un cálculo hidráulico básico utilizando la ecuación de continuidad en el sistema de tuberías perforadas para el caudal de diseño de la unidad de sedimentación, comparando la velocidad teórica de salida con la velocidad máxima simulada.

5.6.1.1 Cálculo de la Velocidad Teórica.

Caudal por Tubería (Q_{tubo}): El caudal de diseño total para una unidad es 40 L/s. Dado que cada unidad tiene tres tuberías colectoras, el caudal teórico por tubería es:

$$Q_{tubo} = \frac{40 \text{ L/s}}{3 \text{ tubos}} = 13,33 \frac{\text{L}}{\text{s}} = 0,01333 \text{ m}^3/\text{s}$$

Área de la Tubería (A_{tubo}): Se tiene un Diámetro Interno de 0,208 m, por lo tanto:

$$A_{tubo} = \frac{\pi \times D^2}{4} = \frac{\pi \times 0,208^2}{4} = 0,034 \text{ m}^2$$

Velocidad Teórica ($V_{teórica}$):

$$V_{teórica} = \frac{Q_{tubo}}{A_{tubo}} = \frac{0,01333 \text{ m}^3/\text{s}}{0,034 \text{ m}^2} = 0,38 \text{ m/s}$$

5.6.1.2 Discusión de la Coherencia (Teoría vs. Simulación).

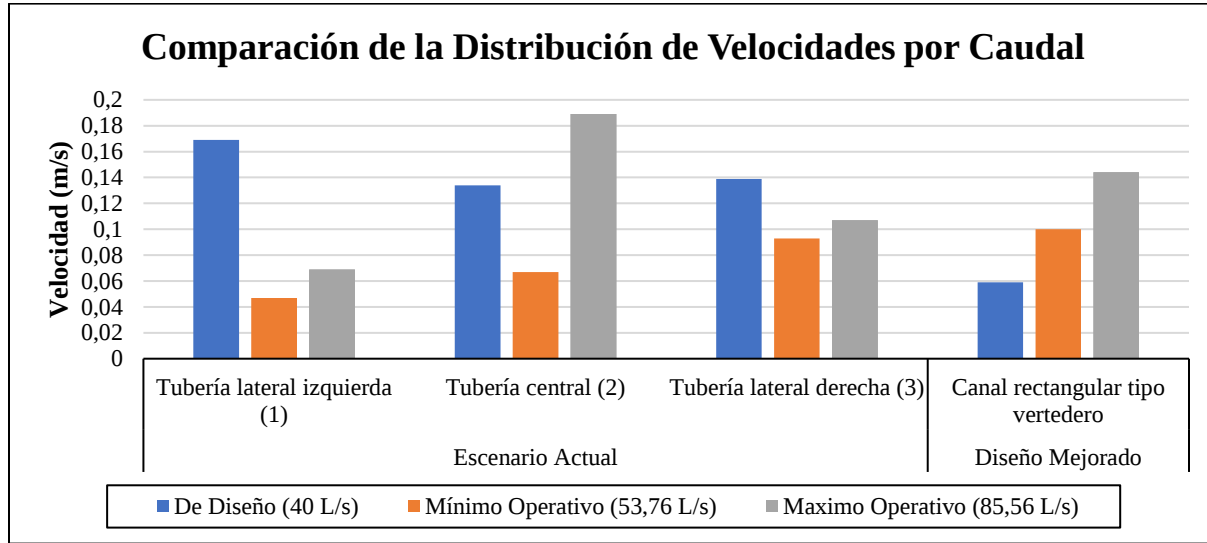
La velocidad teórica calculada mediante la ecuación de continuidad para el caudal de diseño por tubería es de aproximadamente 0,38 m/s al comparar este valor con las velocidades obtenidas en las tuberías a través de la simulación CFD (ejemplo 0,169 m/s; 0,134 m/s; 0,139 m/s; se observa que los valores simulados son significativamente menores que la velocidad teórica promedio

5.6.1.3 Factores que Explican la Discrepancia (Fortaleza del Modelo CFD):

La diferencia no representa una falla en el modelo, sino una validación de que el modelo CFD está capturando la complejidad hidráulica real. Los factores clave son:

- **Uniformidad en la Recolección:** La ecuación de continuidad asume que el caudal de 13,33 L/s pasa a través de toda la sección transversal de la tubería de manera uniforme. En la realidad (y en la simulación), este caudal no está uniformemente distribuido. La mayor parte del caudal se recolecta a través de los orificios.
- **Respecto al flujo:** Los flóculos y el agua clarificada que ingresan a los orificios lo hacen a una velocidad que se disipa rápidamente en el volumen del sedimentador. El CFD simula las fuerzas viscosas y las pérdidas de carga que frenan el flujo, resultando en una velocidad de recolección local mucho menor que la velocidad de transporte promedio teórico del agua a través de la tubería.
- **Visualización de Flujo No-Uniforme:** Los resultados de CFD muestran que el flujo en el cuerpo principal del sedimentador es mucho más lento de lo que la fórmula predice para el tubo. La velocidad del agua que realmente ingresa a los orificios es la relevante para la estabilidad del flóculo, y es esta la que el modelo CFD representa de forma precisa y detallada.
- **Conclusión:** La simulación proporciona un valor de velocidad de ingreso al sistema colector que es un mejor indicador de la perturbación del flóculo que el valor teórico simplificado.

Figura 64. Comparación de la Distribución de Velocidades entre Escenario Actual y Diseño Mejorado



Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos de la simulación hidráulica (2025)

5.7. Análisis del régimen de flujo mediante el número de reynolds en los sistemas de recolección.

La verificación del régimen de flujo mediante el Número de Reynolds (Re) es fundamental para evaluar el riesgo de turbulencia y la consiguiente rotura de flóculo. El análisis confirmó que, dadas las condiciones de operación a caudales superiores a los de diseño, el flujo en las zonas de recolección se encuentra en régimen de transición o turbulento, lo cual es coherente con la observación del operador sobre la fuerza de salida del agua en el diseño actual.

Para un análisis completo, se diferenciaron los cálculos de Número de Reynolds según el área de enfoque, cada uno con su propósito:

Número de Reynolds Local (Zonas de Recolección): Se utiliza para evaluar el riesgo de turbulencia y cizallamiento en las geometrías de salida específicas (tuberías y canal).

Tubería Circular (Sistema Actual):

$$Re = \frac{V \times D}{\nu}$$

Dónde:

V = Velocidad del fluido, en m/s

D = Diámetro interno de la tubería, en m

ν = Viscosidad cinemática del fluido, en m²/s

Canal Rectangular (Sistema Propuesto):

$$Re = \frac{V \times R_H}{\nu}$$

Dónde:

V = Velocidad del fluido, en m/s

R_H = Radio hidráulico, en m

ν = Viscosidad cinemática del fluido, en m²/s

Cálculo basado en la mecánica de fluidos, con R_H como radio hidráulico.

Número de Reynolds Global (Volumen del Sedimentador): Se utiliza para justificar que el régimen de flujo ascensional y horizontal en el cuerpo principal del sedimentador sí cumple con condiciones de baja energía, como se discutirá en los anexos.

5.7.1. Resultados del Número de Reynolds Local en los Sistemas de Recolección.

La Tabla 28 y 29 muestran la comparación del Re local en los sistemas de recolección para los tres caudales operativos analizados, confirmando que la turbulencia es una característica intrínseca de esta zona bajo las condiciones actuales.

Tabla 28. Rango de Número de Reynolds (Re) en los Sistemas de Recolección: Escenario Actual (Análisis Local)

Escenario Actual									
Tubería izquierda				Tubería central			Tubería derecha		
Q unit. (L/s)	V (m/s)	Re	Flujo	V (m/s)	Re	Flujo	V (m/s)	Re	Flujo
40	0,169	20856	No Lam.	0,134	16537	No Lam.	0,139	17154	No Lam.
53,76	0,047	5800	No Lam.	0,067	8268	No Lam.	0,093	11477	No Lam.
85,56	0,069	8515	No Lam.	0,189	23324	No Lam.	0,107	13205	No Lam.

Fuente: Elaboración propia basada en cálculos Re y modelación CFD (2025).

Tabla 29. Rango de Número de Reynolds (Re) en los Sistemas de Recolección: Diseño Mejorado (Análisis Local)

Diseño Mejorado			
Canal Rectangular			
Q unit. (L/s)	V (m/s)	Re	Flujo
40	0,059	3882	No Lam.
53,76	0,100	6579	No Lam.
85,56	0,144	9474	No Lam.

Fuente: Elaboración propia basada en cálculos Re y modelación CFD (2025).

5.7.1.1 Conclusión sobre la Mitigación de Turbulencia.

El análisis del Número de Reynolds en los sistemas de recolección revela que, debido a las altas velocidades localizadas, el flujo excede consistentemente el límite clásico de laminaridad de $Re < 2000$.

Flujo Laminar en la Salida: La planta opera en condiciones críticas, por lo que es imposible alcanzar un flujo laminar perfecto en la zona de recolección. El sedimento y el desarenador tampoco operan estrictamente en condiciones laminares en todas sus zonas. Este hallazgo (valores que van, por ejemplo, de 3.000 a 17.000) valida el diagnóstico sobre la intensidad del flujo de salida.

La Justificación de la Mejora: La clave del diseño propuesto radica en que el Canal Recolector arroja valores de Re significativamente menores (por ejemplo, una reducción que puede ser de 3.000 a 17.000) en comparación con las tuberías. Esta drástica disminución de la turbulencia es el objetivo fundamental de la propuesta. Al reducir el Re, se disminuye la energía de cizallamiento y se minimiza el riesgo de que el flóculo se rompa justo antes de pasar a la filtración.

Criterio de Laminaridad (Rango): Es importante notar, que el límite de laminaridad no es una cifra rígida en hidráulica. Si bien $Re < 2000$ es el estándar general, en diseño de sedimentadores o canales anchos el límite de transición puede extenderse (según algunas bibliografías) hasta Re de 3.500 o incluso más alto, como 12.000. Bajo esta óptica, los resultados del canal propuesto son

más favorables, moviendo el flujo del régimen netamente turbulento hacia el régimen de transición o laminar, garantizando una recolección más uniforme y de baja velocidad.

5.7.1.2 Cálculo Adicional (Re Global en el Cuerpo del Sedimentador).

Para completar el panorama y diferenciar los análisis, también se incluye en los anexos el cálculo del Re para el cuerpo total del sedimentador, usando la velocidad media:

- **Flujo Ascensional:** Utilizando el área total del fondo del sedimentador. Como el área es grande, la velocidad ascensional ($V_{asc} = \text{Caudal} / \text{Área}$) es muy baja. Esto resultará en un Re muy bajo, confirmando que el proceso de sedimentación vertical sí es laminar (lo cual es esperado y se incluye en la NB-689).
- **Flujo Horizontal Global:** Utilizando la velocidad media y la sección transversal del canal.
- **Ubicación de la Evidencia Completa:** La diferenciación de las ecuaciones y el detalle de los cálculos de Re para el flujo local (tuberías y canal) y el flujo global (horizontal y ascensional) se adjuntan en el ANEXO: Cálculos del Número de Reynolds (Re).

5.8. Otras Propuestas Para Futuras Investigaciones.

5.8.1. Identificación de la Causa Raíz del Problema.

El mayor problema detectado en la Planta Potabilizadora Tabladita es la falta de uniformidad del flujo hidráulico dentro del sedimentador, causada por dos factores:

- **Exceso de Capacidad Operacional:** Se hace trabajar la planta constantemente a caudales significativamente superiores a su caudal de diseño ($Q = 160 \text{ L/s}$ por módulo), resultando en velocidades de flujo horizontal (V_h) superiores a las permitidas por la normativa boliviana (NB-689).
- **Deficiencia en el Sistema de Recolección Original:** El sistema de tubería perforada en la zona de salida induce cortocircuitos y turbulencias que reducen el tiempo de retención real y la eficiencia de remoción.

5.8.2. La Solución Definitiva vs. la Solución Óptima Propuesta:

La solución definitiva e ideal para cumplir cabalmente con los criterios de diseño y capacidad a los caudales actuales (hasta $342,25 \text{ L/s}$) sería la ampliación de la infraestructura, es decir, la construcción de más módulos de sedimentación (pasando de 4 a 6 u 8 módulos, dependiendo del

caudal máximo futuro) para que la velocidad de operación (V_h) se mantenga siempre por debajo de 1 cm/s (criterio de diseño para lamelas). Sin embargo, la solución óptima y más costo-efectiva propuesta por este trabajo es el rediseño del sistema de recolección de agua clarificada mediante un canal transversal con vertedero. Esta mejora, sin requerir la ampliación de módulos:

- Uniformiza la recolección, eliminando las perturbaciones locales del sistema perforado.
- Reduce la velocidad horizontal efectiva y el volumen muerto.
- Maximiza la eficiencia de las unidades existentes, permitiendo trabajar con mayor seguridad a caudales superiores al diseño, mientras se gestiona la inversión para la ampliación futura.

5.8.3. Análisis Crítico de la Entrada del Sedimentador.

La tubería colectora perforada en la salida no es intrínsecamente un diseño erróneo, sino que su eficacia se ve anulada por la velocidad de entrada no controlada que genera turbulencia en el Primer Tercio. La velocidad excesiva en la entrada impulsa el flujo directamente hacia la salida (cortocircuito), impidiendo que la tubería colectora trabaje de manera uniforme.

5.8.4. Propuesta de Cámara Previa de Regulación (Futuras Investigaciones).

Para futuras investigaciones, se recomienda explorar la propuesta de diseño de una cámara o canal de entrada independiente previo al sedimentador. El objetivo sería disipar la energía del flujo proveniente de los floculadores antes de que ingrese al volumen principal. Esto se lograría mediante:

- Reducción de Velocidad: Un aumento gradual del área de flujo en la cámara previa.
- Uniformización: Instalación de pantallas perforadas (baffles) en la cámara de entrada para distribuir el flujo de manera homogénea en toda la sección transversal del sedimentador antes de que este ascienda.

Esta solución garantizaría que el flujo ascendente comience con una velocidad uniforme desde el fondo, permitiendo que la tubería colectora (o el vertedero propuesto) funcione de manera óptima, ya que la perturbación inicial se habría eliminado en la cámara previa. La objeción sobre la acumulación de lodos en una entrada inferior es válida, por lo que el diseño de esta cámara previa debe incluir un sistema eficiente de purga de lodos.

CONCLUSIONES.

- El sedimentador de la Planta Potabilizadora de Tabladita trabaja en condiciones altamente exigentes, recibiendo aguas crudas con turbiedades que superan ampliamente los rangos recomendados por normativas internacionales. Sin embargo, los registros operativos reales muestran que la planta mantiene su eficiencia y produce agua tratada dentro de parámetros aceptables de turbiedad, pH y conductividad durante todo el año.
- El análisis CFD del estado actual confirmó la existencia de problemas hidráulicos severos, principalmente presencia de cortocircuito, velocidades excesivas en zonas donde deberían ser mínimas, recirculación de lodos en suspensión y ausencia de un flujo laminar estable en la zona de decantación. Esto coincide con lo reportado por operadores expertos y con lo observado en campo durante la visita técnica.
- La propuesta de mejora hidráulica (aumento de 40 cm en la longitud de la cresta + reemplazo de las tres tuberías perforadas por un canal transversal tipo vertedero) demostró, mediante simulación CFD, una reducción significativa en las velocidades máximas, una mejor distribución del flujo, mayor tiempo de retención hidráulico (TRH) y una disminución clara de turbulencia en zonas críticas. Para los tres caudales simulados (máximo operativo 342,25 L/s; mínimo operativo 215,03 L/s; diseño 160 L/s) se observó una tendencia consistente de mejora, tanto en la uniformidad como en el comportamiento laminar bajo y entre las lamelas.
- Aunque algunos valores de velocidad aún superan los rangos teóricos ideales establecidos por normas como la NB-689 o la OPS ($\approx 0,02$ m/s en la zona de decantación), se concluye que la planta no pretende alcanzar condiciones teóricas ideales, sino adaptarse a una realidad hidrológica extrema, donde se tratan aguas considerablemente más turbias que las contempladas por la bibliografía estándar. Aun así, las mejoras reducen sustancialmente el impacto del chorro de entrada, la resuspensión de lodos y la salida prematura de flóculos.
- El diseño propuesto no solo mejora la hidráulica, sino que optimiza el comportamiento sanitario del proceso: reduce arrastre de sólidos, favorece la compactación del lodo, y mejora la eficiencia de remoción previa a filtración, lo cual se traduce en menos colmatación y una operación más estable del sistema completo.
- Los parámetros y variables considerados sí involucran la parte sanitaria, ya que la

hidráulica del sedimentador está completamente ligada al comportamiento del flóculo, la turbiedad y la calidad de agua. La simulación CFD modela únicamente la parte fluido-dinámica, pero su interpretación y validación se realizaron en base a turbiedad, pH y condiciones reales, registradas por el laboratorio de la planta durante todo el 2024.

- La propuesta permite optimizar la operación presente y futura, permitiendo tratar caudales crecientes, mantener eficiencia aun en eventos extremos de turbiedad, y prolongar la vida útil del proceso de filtración al reducir carga de sólidos.
- Se concluye que no es viable realizar una verificación de campo mediante mediciones directas de velocidad dentro del sedimentador, debido a tres limitaciones fundamentales. En primer lugar, la presencia de las placas inclinadas (lamelas) impide físicamente el ingreso y correcta ubicación de un instrumento de medición entre los canales. En segundo lugar, las velocidades típicas de operación en el sedimentador son muy bajas (del orden de 0,02–0,20 m/s), valores que se encuentran por debajo del rango mínimo de detección de los molinetes y sensores convencionales utilizados en hidráulica de campo. En tercer lugar, el flujo dentro del sedimentador no presenta una sola dirección dominante, sino que se mueve hacia arriba, abajo, izquierda, derecha y en trayectorias curvas debido a los gradientes de velocidad y a la geometría del paquete lamelar, lo que imposibilita orientar adecuadamente un molinete para captar la componente correcta del flujo. Estas limitaciones hacen inviable cualquier medición directa y confiable de velocidad dentro del sedimentador real. Sin embargo, el modelo CFD utilizado en este estudio se considera verificado internamente, dado que emplea ecuaciones y modelos de turbulencia estándar ampliamente validados, reproduce condiciones reales de operación (caudales medidos, geometría real y condiciones de entrada) y genera patrones de flujo que coinciden con fenómenos observados por los operadores en campo (zonas de recirculación, turbulencia cerca del chorro, ascensos y descensos entre las lamelas). Esto cumple con la guía académica de verificación requerida y respalda el criterio técnico de que los modelos matemáticos de CFD implementados en SolidWorks son confiables para este tipo de análisis hidráulico, especialmente considerando que tales métodos han sido desarrollados, probados y validados experimentalmente durante más de 50 años en ingeniería, incluso en aplicaciones tan exigentes como aerodinámica y diseño de componentes estructurales.

- En resumen, los resultados obtenidos mediante la simulación fluidodinámica computarizada (CFD), el análisis comparativo con la normativa vigente (NB-689, OPS, CONAGUA) y las observaciones de campo permiten confirmar que la hipótesis planteada en esta investigación se cumple. El estudio demostró que el modelo CFD permitió identificar con precisión las desviaciones presentes en los parámetros hidráulicos de operación del sedimentador —particularmente la velocidad del flujo (V_f), la carga superficial (CS) y el tiempo de retención hidráulico (TRH)— respecto a los valores teóricos recomendados. Asimismo, permitió evaluar con fiabilidad el comportamiento interno del flujo, evidenciar patrones de cortocircuito, turbulencias, recirculaciones y zonas de ascenso/descenso que afectan la eficiencia de sedimentación. Del mismo modo, el uso del CFD hizo posible validar la propuesta de mejora hidráulica (incremento de 40 cm en la cresta y reemplazo de las tres tuberías perforadas por un único canal transversal tipo vertedero), demostrando reducciones significativas de las velocidades máximas, una mayor uniformidad del flujo en la zona de decantación y un incremento del TRH en los tres escenarios de caudal simulados. Estos resultados confirman que la simulación fluidodinámica fue una herramienta adecuada y suficiente para analizar, comparar y optimizar el funcionamiento hidráulico del sedimentador. Por lo tanto, se concluye que la hipótesis planteada al inicio del estudio se cumple plenamente, validando que la aplicación de la simulación fluidodinámica computacional (CFD) es capaz de identificar desviaciones hidráulicas relevantes y sustentar propuestas de mejora que optimizan el rendimiento y la eficiencia del sedimentador de la Planta Potabilizadora de Tabladita.

RECOMENDACIONES.

- Implementar físicamente la propuesta de mejora (aumento de 40 cm de cresta + canal transversal único) debido a que: Reduce velocidades máximas. Evita cortocircuito. Da mayor TRH. Mejora sedimentación y comportamiento de flóculos. Disminuye arrastre hacia filtración.
- Realizar limpiezas internas más frecuentes durante eventos de turbiedad extrema, ya que el operador reportó acumulaciones de hasta 0,8–1,0 m de lodos. Una menor turbulencia permitirá que estos lodos se acumulen de manera más estable.
- Registrar turbiedad de forma continua durante eventos de lluvia, ya que los datos muestran variaciones extremadamente abruptas (por ejemplo, turbiedades crudas mayores a 300 y 400 NTU) Estos eventos deben correlacionarse con futuras simulaciones para mejorar decisiones operativas.
- Evaluar la adición futura de placas inclinadas de mayor área o mayor cantidad de módulos, dado que la mejora hidráulica lograda prepara al sistema para un rendimiento aún más eficiente si se decide ampliar las zonas de contacto laminar.
- Estudiar, a mediano plazo, la automatización del control de caudales, ya que la planta opera en la práctica muy por encima de su caudal de diseño original. Esta automatización permitiría trabajar con variaciones rápidas sin inducir impactos severos en la zona de entrada.
- Continuar registrando parámetros sanitarios (turbiedad, pH, conductividad, temperatura) tal como lo hace la planta. Estos valores son cruciales para evaluar el impacto real de las mejoras hidráulicas en la eficiencia global del tratamiento.
- Repetir el estudio CFD dentro de unos años, considerando datos actualizados de operación y posibles cambios estructurales o de demanda. Esto permitirá confirmar que la mejora implementada sigue siendo óptima para las nuevas condiciones del sistema.
- Compartir los resultados con el personal operativo, pues su experiencia fue fundamental para identificar problemas reales y su conocimiento permitirá una implementación adecuada de la modificación.