

## **1. Generalidades.**

### **1.1 Introducción.**

En el campo de la ingeniería hidráulica-sanitaria, la eficacia de las infraestructuras como los desarenadores en las plantas de tratamiento de agua potable es esencial para garantizar un suministro de agua óptimo y sostenible. En la ciudad de Tarija, donde se ubican múltiples plantas de tratamiento y desarenadores que son fundamentales para el sistema, existe la necesidad de evaluar y comprender el comportamiento del flujo dentro de estas estructuras.

La presente investigación se enfoca en modelar el comportamiento de la variable velocidad en un desarenador ya que este es el parámetro hidráulico más importante que se usa para el diseño de los mismos, este parámetro afecta directamente al tamaño del desarenador.

Con la modelación vamos a verificar si la velocidad es homogénea en todo el desarenador o es variable.

Aplicando la modelación se buscará pruebas viables de modificación y/o ajuste en la forma de los desarenadores que tenga una distribución de velocidades más homogénea y que este dentro de los rangos recomendados por la bibliografía sobre diseño de desarenadores.

La modelación se efectuará aplicando dinámica de fluidos computacional, donde se estudiará la aplicación práctica del software Solidworks.

Como parte de la investigación se realizará de mediciones de velocidad horizontal en el desarenador para comparar con los valores recomendados por la bibliografía y con los valores obtenidos de la modelación.

La ubicación del desarenador corresponde al sistema de provisión de agua potable de la ciudad de Tarija, ubicado en el tramo de aducción entre obra de toma La Vitoria y la planta potabilizadora del barrio tabladita, de la provincia cercado del departamento de Tarija.

El presente trabajo es un aporte que espera contribuir a la necesidad de aumentar conocimiento sobre el funcionamiento y el diseño de los desarenadores ya que son un componente esencial de los sistemas de agua potable, riego, generación de energía eléctrica y otros, Su correcto funcionamiento asegura la eficiencia y sostenibilidad de estos sistemas al prevenir el desgaste y la acumulación de sedimentos que pueden causar daños severos y disminución de la eficiencia en los procesos y equipos involucrados aguas abajo del desarenador.

## **1.2 Antecedentes.**

Molina Céspedes (2016) documentó la existencia de un desarenador cerca de la planta de tratamiento Tabladita, a aproximadamente un kilómetro de distancia. Este desarenador, reacondicionado en 1988 con financiamiento del BID, tiene una estructura rectangular de 14m de largo por 5m de ancho, construido con mampostería de piedra revestida con mortero. El agua tratada en este desarenador se transporta a la planta de Tabladita mediante una tubería FFD de 16 pulgadas.

El Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (2004) estableció criterios específicos para el diseño de desarenadores en el país. Estos criterios incluyen parámetros como la velocidad de sedimentación, expresada como carga superficial, considerada para un régimen en transición con número de Reynolds entre 1 y 50. Además, se introdujo el concepto de velocidad de sedimentación crítica, que toma en cuenta factores como las diferencias de temperatura y las deficiencias en los puntos de entrada y salida. Estas normas son fundamentales para el diseño y operación de desarenadores en Bolivia.

Mogollón (2018) realizó un estudio significativo sobre la aplicación de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en el análisis de flujos turbulentos. Su investigación destaca la importancia de la resolución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes para predecir con precisión el comportamiento de flujos turbulentos. Mogollón empleó una formulación en régimen permanente y no permanente, utilizando el modelo Volumen de Fluido (VOF) para la representación del flujo multifásico. Este enfoque proporciona una base sólida para la aplicación de CFD en el diseño y análisis de desarenadores.

En el ámbito del software de simulación, Solidworks Flow Simulation (2017) se ha posicionado como una herramienta valiosa para la modelación de fluidos. Esta herramienta utiliza el Método de Volumen Finito (FVM) para calcular el rendimiento del producto, permitiendo a los ingenieros realizar estudios de "qué pasaría si" y optimizar diseños basados en los resultados obtenidos. La capacidad de Solidworks Flow Simulation para modelar y simular el comportamiento de fluidos lo convierte en un recurso importante para el desarrollo de productos, incluyendo el diseño de desarenadores.

Romero Rojas (2006) proporcionó una descripción detallada de los elementos fundamentales que conforman un desarenador. Su investigación identifica cuatro zonas principales: la zona de entrada, la zona de desarenación, la zona de salida, y la zona de depósito y eliminación de arena

sedimentada. Este análisis estructural es crucial para comprender el funcionamiento y diseño eficiente de los desarenadores.

Arboleda Valencia (2000) complementó este conocimiento al desglosar la estructura de un desarenador en sus componentes principales, incluyendo la cámara de aquietamiento, el canal de desarenación, el sistema de extracción de arena, el vertedero de salida y la compuerta de lavado. Su investigación proporciona una base sólida para el diseño y operación de desarenadores eficientes.

### **1.2.1 Planteamiento del Problema.**

En la última década, el crecimiento urbano de Tarija ha generado una mayor demanda de agua tratada, evidenciando problemas en la eficiencia del desarenador del canal de despacho del Rincón de la Vitoria. Esta situación afecta tanto a la población que depende de este sistema como a la empresa local de servicios de agua y saneamiento.

Hasta ahora, los intentos de solución han sido principalmente reactivos, basados en mantenimientos periódicos y ajustes operativos sin un análisis profundo de la dinámica de fluidos. Los estudios existentes se han limitado a parámetros bidimensionales, ignorando la complejidad tridimensional del flujo.

La falta de investigaciones detalladas sobre la distribución de velocidades en tres dimensiones en el desarenador impide una comprensión integral de las dinámicas internas del flujo de agua. Esto resulta en una eliminación ineficiente de arenas, formación de zonas muertas y áreas de alta velocidad que pueden erosionar la estructura o interferir con la sedimentación.

Estas deficiencias no solo comprometen la calidad del agua tratada, sino que también incrementan los costos de mantenimiento. La ausencia de un modelo preciso basado en Dinámica de Fluidos Computacional o sus siglas en inglés (CFD) dificulta la optimización del diseño y operación del sistema.

Se requiere urgentemente un análisis exhaustivo de la distribución tridimensional de velocidades para desarrollar soluciones más efectivas que mejoren el proceso de desarenado en Tarija.

### **1.2.2 Formulación del Problema.**

¿Como será la distribución de velocidades en el desarenador, del sistema de agua potable de la ciudad de Tarija aplicando modelación (CFD) y que modificaciones será necesario realizar, para que el desarenador pueda tratar caudales mayores al de diseño?

### **1.3 Objetivos.**

#### **1.3.1 Objetivo General.**

Desarrollar una propuesta de diseño optimizado para el desarenador del canal de despacho del Rincón de la Vitoria de la ciudad de Tarija, que permita manejar caudales superiores al de diseño actual, mediante el análisis de la distribución de velocidades utilizando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

#### **1.3.2 Objetivos Específicos.**

- Medir y analizar las características geométricas del desarenador del canal de despacho del Rincón de la Vitoria para su modelado en SolidWorks.
- Simular la distribución de velocidades en el desarenador mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) bajo las condiciones actuales de operación.
- Determinar las modificaciones necesarias en el diseño del desarenador mediante el análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones CFD.
- Proponer y evaluar un nuevo diseño del desarenador que optimice su desempeño hidráulico, considerando caudales mayores al de diseño y comparando con el diseño actual.

### **1.4 Hipótesis.**

La modelación (CFD) permite visualizar y analizar la distribución de velocidades en el desarenador del sistema de agua potable de la ciudad de Tarija y sus resultados nos indicarán las modificaciones que será necesario realizar, para que el desarenador pueda tratar caudales mayores al de diseño.

### **1.5 Justificación de la Investigación.**

#### **1.5.1 Justificación Técnica.**

En el diseño de los desarenadores no se analiza a detalle la forma del desarenador, ni la distribución de velocidades en todos los sentidos (x, y, z) tanto en la entrada, en el interior y en la salida. Este conocimiento es fundamental para verificar y ajustar los valores teóricos utilizados en los cálculos tradicionales. La implementación de herramientas avanzadas de simulación permite realizar ajustes precisos en los aspectos geométricos y operacionales antes de la construcción, incluyendo modificaciones en forma, tamaño, orientación y configuración de entradas y salidas de agua. Este nivel de detalle en la fase de diseño es vital para prevenir problemas como la erosión, sedimentación excesiva y formación de vórtices, que afectan la operación y mantenimiento del sistema a largo plazo.

### **1.5.2 Justificación Económica.**

Con un buen análisis de las velocidades se logrará que la forma y dimensiones del desarenador sean óptimas, por lo tanto, el costo de esta estructura será más económica.

### **1.5.3 Justificación social.**

El país, en gran porcentaje, aprovecha las aguas superficiales de ríos. Los desarenadores deben de funcionar bien para evitar daños a los componentes aguas abajo como ser: estructuras de tratamiento, tuberías, accesorios, goteros, aspersores, turbinas, etc.

De esta manera se aporta al buen uso de los recursos económicos minimizando el mantenimiento y alargando la vida útil de estos componentes.

## **1.6 Límites y Alcances.**

### **1.6.1 Límites.**

Esta investigación se enfocará en la modelación del desarenador del sistema de agua potable de la ciudad de Tarija, utilizando software especializado como Solidworks, entre otros. El estudio se limitará a la distribución de velocidades, sin considerar otras variables hidráulicas. La recolección de datos para analizar dicha distribución estará sujeta a limitaciones de tiempo, lo que podría influir en la profundidad y extensión del análisis realizado. Es importante mencionar que, durante la fase de modelación, no se tomarán en cuenta factores externos como la disponibilidad de materiales o la viabilidad económica.

### **1.6.2 Alcances.**

- Medir el caudal y velocidades mediante un molinete electromagnético OTT MF pro.
- Analizar la situación actual del desarenador, incluyendo: caudales de operación, dimensiones y condiciones hidráulicas.
- Crear un modelo digital del desarenador existente mediante software de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) utilizando Solidworks.
- Realizar simulaciones para los siguientes caudales:
  - Caudal actual: 93 l/s.
  - Caudal de diseño: 160 l/s.
  - Caudal máximo: 339 l/s (según la capacidad máxima del canal).
- Generar gráficas y tablas que describan la distribución de velocidades para cada simulación, aplicando (CFD).
- Comparar los resultados de las velocidades simuladas para los diferentes caudales.

- Proponer un diseño optimizado de un nuevo desarenador capaz de tratar un caudal máximo de 339 l/s, basado en los resultados de las simulaciones.
- Incorporar en la propuesta de diseño:
  - Mejoras en la dirección del flujo.
  - Reducción de velocidades críticas en zonas específicas.
  - Realizar un análisis comparativo entre el diseño actual y el diseño propuesto, evaluando su desempeño mediante simulaciones (CFD).

## **2. Marco Metodológico.**

El presente capítulo describe las bases metodológicas utilizadas para desarrollar la investigación, detallando el enfoque, diseño, técnicas de recolección y análisis de datos, así como las herramientas computacionales empleadas para modelar la dinámica de fluidos en el desarenador del sistema de agua potable de la ciudad de Tarija. Esto permitirá analizar la distribución de velocidades y proponer mejoras en su diseño, con el fin de optimizar su rendimiento hidráulico y adaptarlo a caudales mayores al de diseño.

### **Generalidades del Estudio**

El estudio se centra en el análisis del desarenador ubicado en el canal de despacho del sistema de agua potable de la ciudad de Tarija, específicamente en la zona conocida como Rincón de la Victoria. Este análisis tiene como objetivo visualizar y comprender la distribución de velocidades en el desarenador aplicando simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD), para posteriormente proponer modificaciones en su diseño que permitan tratar caudales superiores al original.

### **2.1 Enfoque de la Investigación.**

La investigación adopta un enfoque mixto, integrando elementos cuantitativos y cualitativos, que se complementan para obtener una comprensión integral del problema y proponer soluciones respaldadas por evidencia técnica:

#### **Enfoque Cuantitativo.**

Este enfoque se centró en la recolección y análisis de datos numéricos, tales como:

Dimensiones estructurales: Largo, ancho, altura y otras características físicas del desarenador.

Velocidades y caudales: Datos de caudales proporcionados, junto con mediciones in situ realizadas mediante instrumentos de alta precisión, como el molinete electromagnético OTT MF pro.

Resultados de simulaciones: Datos obtenidos del software Solidworks, evaluando la distribución de velocidades y el comportamiento del flujo a lo largo del sistema.

Estos datos fueron fundamentales para profundizar la comprensión del funcionamiento del desarenador y respaldar las decisiones tomadas durante el proceso de diseño de modificaciones.

La integración de información cuantitativa permitió una mejor optimización del sistema, asegurando que las modificaciones fueran tanto efectivas como adecuadas a las condiciones operativas del desarenador.

## **Enfoque Cualitativo**

El componente cualitativo incluyó la observación directa del comportamiento del flujo dentro del desarenador, así como el análisis de posibles problemas estructurales o funcionales. Este enfoque permitió identificar visualmente áreas problemáticas, como zonas de turbulencia, sedimentación excesiva o una distribución no uniforme de las velocidades del flujo.

La integración de este enfoque cualitativo con el análisis cuantitativo proporcionó una visión integral y detallada del funcionamiento del desarenador, lo que permitió abordar tanto los aspectos visibles como los numéricos del proceso de sedimentación y optimizar su desempeño.

### **2.2 Diseño de la Investigación.**

El diseño de la investigación se estructuró como un estudio de caso de carácter descriptivo y aplicado, con el objetivo de analizar en profundidad un problema específico y proponer soluciones prácticas basadas en datos cuantitativos y cualitativos. A continuación, se detallan los tres enfoques principales de la investigación:

Estudio de caso: El enfoque se centró en el análisis exhaustivo de un único objeto de estudio: el desarenador del canal de despacho del Rincón de la Vitoria. Este enfoque permitió explorar en detalle las características particulares del desarenador, sus procesos operativos y los problemas específicos que enfrentaba, facilitando la identificación de áreas de mejora.

Descriptivo: La investigación tuvo un enfoque descriptivo, lo que implicó un análisis detallado de las dimensiones estructurales del desarenador, las condiciones operativas actuales y la distribución de velocidades dentro del sistema. Este tipo de estudio proporcionó una comprensión clara y precisa del funcionamiento del desarenador, permitiendo observar patrones, identificar problemas y establecer un diagnóstico técnico.

Aplicado: El diseño de la investigación también fue de carácter aplicado, ya que tuvo como objetivo resolver un problema práctico. A través de la formulación de propuestas de mejora, basadas en simulaciones computacionales y análisis técnico, se buscó optimizar el rendimiento del desarenador. Las soluciones propuestas no solo abordaron problemas teóricos, sino que también estuvieron orientadas a mejorar la eficiencia operativa y la calidad del proceso de sedimentación.

#### **2.2.1 Justificación del Diseño.**

El diseño metodológico se justifica debido a su capacidad para abordar de manera sistemática y estructurada el problema planteado, permitiendo un análisis detallado del desarenador. La

utilización de herramientas técnicas avanzadas, como la dinámica de fluidos computacional (CFD), fue clave para simular y validar los resultados obtenidos, lo que brindó una visión precisa del comportamiento hidráulico dentro del sistema. Este enfoque permitió no solo identificar las áreas problemáticas del desarenador, sino también proponer soluciones concretas y viables basadas en datos objetivos y simulaciones precisas.

El empleo de (CFD) resultó esencial para evaluar de forma más realista las condiciones operativas del desarenador, considerando factores como la distribución de velocidades, el comportamiento del flujo y la sedimentación. Esta metodología permitió realizar ajustes y optimizaciones en el diseño sin necesidad de realizar costosos ensayos físicos, ahorrando tiempo y recursos. En conjunto, el diseño metodológico proporcionó una base sólida para tomar decisiones informadas y desarrollar propuestas de mejora con el fin de optimizar el rendimiento.

### **2.3 Procedimientos de Recolección de Datos.**

La recolección de datos se desarrolló en tres etapas principales: recopilación de información preliminar, trabajo de campo y levantamiento de datos in situ.

#### **Recopilación de Información Preliminar.**

En esta etapa inicial, se obtuvo información clave sobre el desarenador para facilitar la planificación y análisis posterior. Se llevó a cabo lo siguiente:

Solicitud de información técnica: Se solicitó a COSAALT, la entidad responsable del desarenador, los registros de operación, los caudales históricos y los planos estructurales del sistema. Esta información fue crucial para entender el funcionamiento y las características del desarenador desde un enfoque técnico.

Registros históricos de caudales: Se revisaron los caudales medios mensuales de los últimos cuatro años, lo que permitió identificar patrones de operación y determinar posibles variaciones estacionales o excepcionales en los flujos. Este análisis ayudó a contextualizar las condiciones operativas del desarenador en diferentes períodos y prever posibles picos o caudales elevados.

Análisis preliminar: Se realizó una evaluación inicial de las dimensiones físicas y las características hidráulicas del desarenador, lo que incluyó el análisis de su capacidad, las velocidades del flujo y las condiciones estructurales. Este análisis permitió identificar aspectos que requerían un estudio más detallado en las siguientes etapas y sirvió como base para las simulaciones computacionales.

Esta primera etapa proporcionó los datos fundamentales para comprender el contexto y el estado

actual del desarenador, sirviendo como base para las siguientes fases de recolección y análisis más específicos.

### **2.3.1 Trabajo de Campo.**

Las actividades de medición in situ fueron planificadas y organizadas para garantizar la recolección de datos precisos y relevantes para el análisis del desarenador. Las actividades se estructuraron de la siguiente manera:

**Identificación de parámetros a medir:** Se definieron los parámetros clave a medir, que incluían las velocidades en diferentes puntos del desarenador y el caudal en la entrada, así como las dimensiones estructurales de la instalación. Estos datos fueron necesarios para evaluar tanto las condiciones operativas como las características físicas del desarenador.

**Selección de instrumentos:** Para medir las velocidades del flujo, se optó por el molinete electromagnético OTT MF pro, un dispositivo de alta precisión que permite realizar mediciones exactas en condiciones operativas. Para las dimensiones estructurales del desarenador, se utilizaron un flexómetro para las partes más pequeñas y una wincha para las dimensiones más amplias, lo que permitió obtener mediciones completas y detalladas de la estructura.

**Coordinación de fechas y permisos:** Se coordinó con el jefe del departamento de producción y tratamiento, Ing. Pedro Almazán, y con el operador del desarenador para obtener los permisos y establecer las fechas de visita. La coordinación fue necesaria para garantizar el acceso al desarenador durante las visitas y no interferir con su funcionamiento normal.

### **2.3.2 Levantamiento de Datos In Situ.**

Se realizaron tres visitas al desarenador para obtener datos precisos y completos sobre las condiciones operativas y las características estructurales. Las visitas se desarrollaron de la siguiente forma:

**Primera visita:** Durante esta visita, se ubicó el desarenador y se determinó su altitud con la ayuda de Google Earth. Se midieron todas las dimensiones accesibles del desarenador, sin embargo, debido a la presencia de agua, algunas áreas no pudieron ser medidas. Estas mediciones se dejaron para la siguiente visita, cuando se tendría mejor acceso.

**Segunda visita:** Esta visita se aprovechó para realizar una observación directa del desarenador y tomar mediciones complementarias durante las actividades de mantenimiento. Una vez que el desarenador fue vaciado, se pudo completar la información de las mediciones iniciales. Durante esta visita también se identificó que, para la tercera visita, sería necesario utilizar un andamio

de 6 metros de largo para medir las velocidades sin perturbar el flujo del agua.

**Tercera visita:** En la tercera visita, se definieron los puntos de aforo y se establecieron las secciones de control a lo largo de la estructura del desarenador. Se seleccionaron 8 secciones distribuidas a lo largo del desarenador para medir la variación de las velocidades del flujo. En cada una de estas secciones, se realizaron mediciones de velocidades del agua utilizando el molinete electromagnético OTT MF pro, lo que permitió obtener un análisis de las condiciones del flujo en diferentes puntos del desarenador.

El levantamiento de datos in situ en estas tres visitas proporcionó información que permitió realizar un análisis profundo del comportamiento del desarenador y optimizar el diseño de las posibles modificaciones.

## **2.4 Procesamiento y Análisis de Datos.**

Los datos recolectados fueron procesados y analizados en varias etapas para garantizar la precisión y utilidad de los resultados. A continuación, se detallan las fases del procesamiento y análisis:

### **Procesamiento de Datos.**

Organización de las mediciones estructurales: Las mediciones estructurales obtenidas durante las visitas al desarenador fueron organizadas. Esta organización facilitó la creación de un modelo tridimensional preciso del desarenador, permitiendo una representación visual detallada de sus dimensiones y características.

Creación de un modelo digital en Solidworks: Utilizando las mediciones estructurales organizadas, se desarrolló un modelo digital del desarenador en Solidworks. Este modelo permitió replicar la geometría exacta del desarenador y sirvió como base para realizar análisis más complejos, como la simulación del comportamiento del flujo y la distribución de velocidades dentro de la estructura.

Representación de la distribución de velocidades y caudales: A través de las simulaciones computacionales en el modelo digital, se representó la distribución de velocidades y caudales a lo largo del desarenador. Estas representaciones gráficas ayudaron a identificar patrones en el flujo y a evaluar cómo se comporta el agua dentro del sistema en condiciones operativas.

### **Análisis de Datos.**

Comparación de mediciones in situ con simulaciones: Las mediciones obtenidas durante las visitas al desarenador fueron comparadas con los resultados de las simulaciones

computacionales realizadas en Solidworks. Esta comparación permitió verificar la precisión de las simulaciones y ajustar el modelo digital para reflejar mejor las condiciones reales del desarenador.

Identificación de áreas críticas: Con base en los resultados de las simulaciones y las mediciones reales, se identificaron áreas críticas dentro del desarenador donde se producen turbulencias o velocidades excesivas que podrían afectar la eficiencia del proceso de sedimentación. Estas áreas fueron analizadas con más detalle para proponer posibles soluciones de mejora y optimización.

El procesamiento y análisis de los datos recolectados proporcionaron una comprensión del comportamiento hidráulico del desarenador y permitieron desarrollar propuestas fundamentadas para mejorar su rendimiento.

#### **2.4.1 Herramientas para el Procesamiento de Datos.**

##### **Instrumentos de Medición.**

Wincha y Flexómetro: Se utilizó la wincha y el flexómetro para realizar mediciones precisas de las dimensiones estructurales. Estos instrumentos permitieron obtener medidas con una alta exactitud, con un margen de error de  $\pm 1$  mm, lo que fue útil para asegurar la correcta ejecución del trabajo en campo.

Molinete electromagnético OTT MF pro: Este instrumento electromagnético se utilizó para medir las velocidades de flujo en todas las secciones ya establecidas. Gracias a su precisión permitió obtener datos confiables y detallados sobre el comportamiento del flujo, siendo fundamental en la recopilación de información para análisis técnicos y simulaciones.

##### **Recursos Computacionales.**

Hardware: Para el procesamiento de datos y modelado, se utilizó una computadora portátil HP equipada con un procesador Intel Core i5, 20 GB de memoria RAM y una tarjeta gráfica NVIDIA GeForce GTX de 4 GB. Esta configuración permitió ejecutar aplicaciones de diseño y simulación de manera eficiente, facilitando el trabajo con grandes volúmenes de datos y la ejecución de software exigente en términos de recursos.

Software: Para la creación de modelos digitales y simulaciones avanzadas, se utilizó Solidworks. Este software especializado en diseño asistido por computadora (CAD) me permitió elaborar modelos precisos y realizar simulaciones complejas, se pudo optimizar los diseños y validar su comportamiento en condiciones controladas.

### **2.4.2 Modelado y Simulación Computacional.**

El modelado y la simulación computacional se llevaron a cabo utilizando Solidworks, un software especializado en diseño asistido por computadora, que permitió crear representaciones digitales precisas y realizar simulaciones de dinámica de fluidos (CFD). El proceso siguió una serie de pasos detallados, que se describen a continuación:

#### **Creación del Modelo Digital.**

Se elaboró un modelo tridimensional del desarenador, el cual incorporó todas sus dimensiones y características estructurales relevantes. Este modelo digital sirvió como base para las simulaciones y permitió representar de manera precisa la geometría del desarenador, garantizando que los resultados de las simulaciones fueran lo más fieles posibles a la realidad. Durante esta fase, se tuvieron en cuenta todos los detalles importantes, como las conexiones, las superficies y los conductos involucrados en el proceso de sedimentación.

#### **Configuración de Parámetros.**

Los parámetros utilizados para las simulaciones fueron configurados de acuerdo con las condiciones reales del desarenador y la información disponible:

**Caudal de entrada:** El caudal de entrada utilizado en las simulaciones fue de 93 l/s, dato obtenido mediante el molinete electromagnético OTT MF pro, un instrumento electromagnético de alta precisión. Este valor representó el caudal real con el que opera el desarenador.

**Rugosidad:** La rugosidad de las superficies internas del desarenador se estimó observando su estado físico, tomando en cuenta las condiciones estructurales y el desgaste visible de los materiales. Este parámetro fue esencial para simular el comportamiento del flujo y su interacción con las superficies del desarenador.

**Elevación:** La elevación del desarenador se determinó en función de su ubicación física y su configuración topográfica, lo cual fue relevante para entender la influencia de la gravedad en el flujo del agua dentro del sistema.

#### **Ejecución de Simulaciones**

Se realizaron tres simulaciones principales para evaluar el desempeño del desarenador bajo diferentes condiciones de operación:

**Condiciones actuales:** Esta simulación se basó en las condiciones operativas actuales del desarenador, con un caudal de entrada de 93 l/s, para evaluar su funcionamiento en su estado actual.

Caudal máximo: En esta simulación, se analizó el comportamiento del flujo con un caudal máximo de 339 l/s, lo que permitió identificar cómo el desarenador respondería ante situaciones de flujo elevado y si podría manejar eficientemente estos caudales sin perder eficiencia.

Diseño mejorado: Se simuló un diseño optimizado del desarenador con el objetivo de mejorar su funcionamiento. El diseño mejorado consideró modificaciones en la geometría del sistema para mejorar la distribución de las velocidades y facilitar la sedimentación.

### **Validación y Calibración**

Para validar la precisión de las simulaciones, se compararon los resultados obtenidos en las simulaciones con los datos medidos directamente en el desarenador. Estos datos fueron recolectados in situ y sirvieron para calibrar el modelo, ajustando los parámetros de simulación y garantizando que el modelo digital representara fielmente las condiciones reales de operación. La calibración permitió mejorar la exactitud de los resultados y asegurar que las simulaciones fueran representativas de los fenómenos físicos observados.

El análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones se centró en varios aspectos clave:

Comparación de velocidades: Se compararon las velocidades simuladas del flujo con las mediciones realizadas directamente en el desarenador. Esto permitió identificar discrepancias y áreas en las que las simulaciones podrían requerir ajustes.

Identificación de áreas críticas: Se identificaron zonas del desarenador donde ocurrían problemas, como sedimentación inadecuada o velocidades de flujo no uniformes, lo que afectaba la eficiencia del proceso.

También se evaluaron tanto el diseño actual como el diseño mejorado en términos de distribución de velocidades, observando cómo el flujo se distribuía a lo largo del desarenador y cómo esto influía en la capacidad de sedimentación.

### **2.4.3 Elaboración de Propuestas de Mejora.**

A partir del análisis de los resultados obtenidos, se desarrolló una propuesta para optimizar el funcionamiento del desarenador:

Modificaciones estructurales: Se propusieron cambios en la geometría del desarenador, con el objetivo de mejorar la distribución de las velocidades. Estas modificaciones incluían ajustes en el ángulo de las superficies y la incorporación de nuevas estructuras que facilitarían un flujo más uniforme.

Optimización hidráulica: Se hicieron ajustes en la dirección del flujo y la reducción de las

velocidades en zonas críticas donde se presentaban problemas de sedimentación. Esto permitiría mejorar el proceso de sedimentación.

Diseño de nuevo desarenador: Finalmente, se propuso el diseño de un desarenador completamente nuevo, capaz de operar con caudales superiores al de diseño sin comprometer su rendimiento. Este nuevo diseño contemplaba una optimización en la forma, materiales y disposición de los componentes para lograr una mayor eficiencia en el tratamiento del flujo de agua.

### **3. Marco teórico.**

#### **3.1 Desarenadores.**

Los desarenadores son estructuras hidráulicas esenciales en los sistemas de aprovechamiento de agua, diseñadas para remover partículas de arena y otros sedimentos del flujo. Su importancia radica en la protección de equipos e infraestructuras aguas abajo, como turbinas, bombas, canales y tuberías, mejorando así la eficiencia y longevidad de los sistemas hidráulicos. El principio de funcionamiento de estas estructuras se basa en la reducción de la velocidad del flujo, permitiendo que las partículas en suspensión se sedimenten por acción de la gravedad (Krochin, 1968).

Los componentes principales de un desarenador típicamente incluyen una zona de entrada diseñada para distribuir uniformemente el flujo, una cámara de sedimentación donde se reduce la velocidad del agua y ocurre la deposición de partículas, una zona de salida que recolecta el agua limpia sin perturbar el proceso de sedimentación, y un sistema de purga que permite la eliminación periódica de los sedimentos acumulados. Existen varios tipos de desarenadores, incluyendo los de lavado intermitente, lavado continuo, flujo horizontal y flujo vertical, cada uno con características específicas adaptadas a diferentes condiciones de operación y requerimientos de diseño (Krochin, 1968).

El mantenimiento regular y el monitoreo de sedimentos son aspectos operativos cruciales para mantener la eficiencia del desarenador a lo largo del tiempo. Además, la adaptabilidad a variaciones de caudal es importante para mantener la eficiencia en diferentes condiciones de operación. Desde la publicación de Krochin en 1968, se han realizado avances significativos en el diseño de desarenadores, incluyendo el uso de modelación CFD para optimizar la geometría, la implementación de sistemas automatizados de purga y monitoreo, el desarrollo de desarenadores compactos para aplicaciones con espacio limitado, y la integración de tecnologías de separación adicionales para mejorar la eficiencia en la remoción de partículas finas.

Los desarenadores también juegan un papel importante en la protección del medio ambiente al reducir la carga de sedimentos en los cuerpos de agua receptores y minimizar la necesidad de dragados frecuentes en embalses y canales. En conclusión, los desarenadores son componentes críticos en los sistemas de aprovechamiento de agua, cuyo diseño y operación eficientes son fundamentales para garantizar la sostenibilidad y eficacia de la infraestructura hidráulica.

### 3.1.1 Zonas y componentes del desarenador.

Un desarenador típico se compone de varias zonas, cada una con una función específica en el proceso de remoción de sedimentos. Ramos Orellana (2019) describe estas zonas de la siguiente manera:

**Zona de entrada:** Es una estructura de transición que conecta el canal de llegada con el desarenador propiamente dicho. Su función principal es distribuir uniformemente el flujo en toda la sección transversal del desarenador. Puede incluir dispositivos como pantallas deflectoras o vertederos para lograr este objetivo.

**Zona de sedimentación:** Es el cuerpo principal del desarenador, donde ocurre la deposición de las partículas. Su diseño debe proporcionar condiciones hidráulicas que favorezcan la sedimentación de las partículas objetivo.

**Zona de salida:** Constituida por una estructura que recoge el agua ya desarenada sin provocar resuspensión de los sedimentos. Generalmente incluye un vertedero de rebose que mantiene un nivel constante en el desarenador.

**Zona de almacenamiento de lodos:** Es la parte inferior del desarenador, diseñada para acumular los sedimentos removidos del flujo. Su capacidad debe ser suficiente para almacenar los sedimentos entre operaciones de limpieza.

**Sistema de limpieza:** Comprende los mecanismos y estructuras necesarios para la remoción periódica de los sedimentos acumulados. Puede ser manual o automatizado, e incluye compuertas, canales de purga y sistemas de drenaje.

Según (Netto, 1977): recomienda los siguientes valores de la velocidad teórica de sedimentación  $U_s$  (cm/s) en función del tamaño  $d$  (mm de las partículas, para  $T = 20$  °C de temperatura del agua y peso específico de la partícula de arena  $\gamma = 2650$  kg/m<sup>3</sup>).

**Tabla: 1: Velocidades teóricas recomendadas.**

<b>d (mm)</b>	<b><math>U_s</math> (cm/s)</b>	<b><math>U_s</math> (m/s)</b>	<b><math>m^3/m^2 \cdot d</math></b>
0,3	4,3	0,043	3175,2
0,2	2,4	0,024	2073,6
0,1	0,9	0,009	777,6
0,01	0,01	0,0001	8,64

**Fuente:** Netto,(1977).

### **3.1.2 Clasificación de Desarenadores.**

Los desarenadores pueden clasificarse según diversos criterios. Krochin (1968) y Ramos Orellana (2019) proponen las siguientes clasificaciones:

Por el número de unidades:

Desarenadores simples: Consisten en una sola unidad.

Desarenadores dobles: Dos unidades en paralelo, permitiendo la operación continua durante el mantenimiento.

Desarenadores múltiples: Más de dos unidades, ofreciendo mayor flexibilidad operativa.

Por la velocidad de escurrimiento:

De baja velocidad ( $v < 1$  m/s): Típicos en sistemas de abastecimiento de agua potable.

De alta velocidad ( $v > 1$  m/s): Comunes en sistemas de riego y centrales hidroeléctricas.

Por la forma de evacuación de sedimentos:

De lavado intermitente: Los sedimentos se remueven periódicamente, interrumpiendo la operación.

De lavado continuo: La remoción de sedimentos se realiza sin interrumpir el flujo.

Por la disposición de los desarenadores:

En serie: Las unidades se colocan una después de otra.

En paralelo: Las unidades operan simultáneamente, dividiendo el caudal.

### **3.1.3 Criterios Generales.**

Los desarenadores se diseñan bajo criterios específicos para garantizar su eficacia en la remoción de partículas. Según la Organización Panamericana de la Salud (OPS, 2005), estos dispositivos deben ser capaces de remover partículas de tamaño superior a 0,2 mm, con una densidad relativa de 2,65 o mayor. Este criterio se basa en la premisa de que partículas más pequeñas generalmente no causan problemas significativos en los sistemas de distribución o tratamiento de agua.

Krochin (1968) enfatiza que el principio fundamental de operación de los desarenadores es la reducción de la velocidad del flujo, permitiendo que las partículas más pesadas se sedimenten. Este autor propone que la velocidad horizontal del flujo en el desarenador debe mantenerse lo suficientemente baja para permitir la sedimentación, pero lo suficientemente alta para evitar la deposición de material orgánico.

Los criterios de diseño para desarenadores incluyen consideraciones sobre la velocidad de flujo,

que debe ser lo suficientemente baja para permitir la sedimentación pero no tanto como para favorecer la deposición de material orgánico; el tiempo de retención, que depende del tamaño de las partículas a remover y las características del flujo; la relación longitud-ancho, que influye en la eficiencia de sedimentación y la distribución del flujo; y la profundidad, que afecta el tiempo de caída de las partículas y el volumen de almacenamiento de sedimentos. La eficiencia de un desarenador bien diseñado puede alcanzar hasta el 90% en la remoción de partículas mayores a 0,2 mm de diámetro (Krochin, 1968).

Proaño Procél (2013) añade que el diseño de un desarenador debe considerar no solo la eficiencia en la remoción de partículas, sino también la facilidad de operación y mantenimiento. Esto incluye la incorporación de sistemas de limpieza que permitan la remoción periódica de los sedimentos acumulados sin interrumpir el funcionamiento del sistema.

#### **3.1.4 Consideraciones para el Diseño.**

El diseño efectivo de un desarenador requiere la consideración de múltiples factores. La OPS (2005) y Proaño Procél (2013) destacan las siguientes consideraciones:

**Características del agua cruda:** Incluye el caudal de diseño, la distribución del tamaño de partículas, y la variación estacional de estos parámetros.

**Velocidad de sedimentación de las partículas:** Se determina en función del tamaño y densidad de las partículas a remover, utilizando las fórmulas de Stokes, Allen o Newton según corresponda.

**Tiempo de retención hidráulica:** Debe ser suficiente para permitir la sedimentación de las partículas objetivo. Típicamente varía entre 20 segundos y 3 minutos, dependiendo del tamaño de las partículas y la aplicación.

**Velocidad horizontal del flujo:** Debe mantenerse por debajo de la velocidad de arrastre de las partículas sedimentadas. Krochin (1968) recomienda velocidades entre 0,1 y 0,4 m/s.

**Relación longitud/ancho del desarenador:** Influye en la eficiencia de sedimentación. Valores típicos están entre 4:1 y 20:1.

**Dispositivos de entrada y salida:** Deben diseñarse para minimizar la turbulencia y distribuir uniformemente el flujo.

**Pendiente del fondo:** Facilita la limpieza y el movimiento de sedimentos hacia la zona de evacuación. Se recomiendan pendientes entre 2% y 6%.

**Capacidad de almacenamiento de lodos:** Debe ser suficiente para acumular sedimentos entre

operaciones de limpieza, considerando la carga de sedimentos esperada.

### **3.1.5 Diseño del Desarenador.**

El proceso de diseño de un desarenador implica una serie de cálculos y decisiones basadas en las consideraciones mencionadas anteriormente. Proaño Procél (2013) y Ramos Orellana (2019) detallan los siguientes pasos:

Cálculo de la velocidad de sedimentación:

Se utiliza la fórmula apropiada según el tamaño de las partículas:

Fórmula de Stokes para partículas  $< 0,1$  mm.

Fórmula de Allen para partículas entre 0,1 y 1 mm.

Fórmula de Newton para partículas  $> 1$  mm.

Determinación del área superficial:

$$A_s = Q / V_s$$

Donde:  $A_s$  = Área superficial,  $Q$  = Caudal de diseño,  $V_s$  = Velocidad de sedimentación

Cálculo de dimensiones:

Longitud (L): Se determina en función de la velocidad horizontal y el tiempo de retención.

Ancho (B): Se calcula a partir del área superficial y la longitud, considerando la relación L/B recomendada.

Profundidad (H): Se establece considerando la carga hidráulica y el volumen de almacenamiento de sedimentos requerido.

Verificación de la velocidad horizontal:

$$V_h = Q / (B * H)$$

Se debe cumplir que  $V_h < V_r$  (velocidad de resuspensión)

Diseño de estructuras complementarias:

Vertederos de entrada y salida: Se diseñan para distribuir uniformemente el flujo y mantener condiciones hidráulicas estables.

Canal de limpieza: Se dimensiona para permitir la evacuación eficiente de sedimentos.

Compuertas: Se seleccionan según el caudal y las condiciones de operación.

Cálculo del volumen de almacenamiento de lodos:

Se determina en función de la carga de sedimentos esperada y la frecuencia de limpieza prevista.

Krochin (1968) enfatiza la importancia de considerar las condiciones locales y realizar ajustes en el diseño según sea necesario. Además, recomienda la validación del diseño mediante

modelos físicos o numéricos, especialmente en proyectos de gran envergadura.

### **3.2 Dinámica de Fluido Computacional.**

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es un campo que utiliza ordenadores y métodos numéricos para resolver problemas relacionados con el movimiento de fluidos y fenómenos asociados, como la transferencia de calor o las reacciones químicas. Esta disciplina integra diversas áreas científicas, incluyendo matemáticas, programación, física e ingeniería, con el propósito de desarrollar software capaz de resolver ecuaciones de flujo. El objetivo principal de la CFD es crear programas informáticos que, aprovechando la capacidad de cálculo de los ordenadores modernos, puedan simular detalladamente el comportamiento de los fluidos mediante la resolución de ecuaciones matemáticas que describen sus leyes fundamentales (Fernández de Oro, 2012)

Las ecuaciones diferenciales parciales son fundamentales para modelar matemáticamente el movimiento de los fluidos. No obstante, para obtener soluciones aplicables, es crucial implementar un método conocido como discretización. Este proceso transforma estas complejas ecuaciones en un conjunto limitado de puntos discretos.

Los científicos han ideado diversas estrategias para efectuar esta discretización. Entre las más prominentes se encuentran el método de diferencias finitas (FDM), el método de elementos finitos (FEM) y el método de volúmenes finitos (FVM).

Cabe resaltar que la precisión de los resultados obtenidos depende principalmente de dos factores: la sofisticación de las herramientas computacionales utilizadas y la eficiencia del método de discretización elegido. Para asegurar la confiabilidad de los resultados, es esencial aplicar estas aproximaciones numéricas en dominios espaciales y temporales relativamente reducidos.

#### **3.2.1 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  $\Phi$ . Dicha ecuación es presentada debajo:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV}_{\text{Tiempo}} + \underbrace{\oint_A \rho \phi \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A}}_{\text{Advección}} = \underbrace{\oint_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\mathbf{A}}_{\text{Difusión}} + \underbrace{\int_V S_\phi dV}_{\text{Fuente}} \quad (2.1)$$

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  $\Phi$ , el coeficiente de difusión  $\Gamma$ , y la fuente  $S$ . Por ejemplo, para la ecuación de conservación de masa (o continuidad), la variable  $\Phi$  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)

### 3.2.1.1 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 de la siguiente manera:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = -\frac{\nabla P}{\rho} \quad (2.2)$$

Donde:

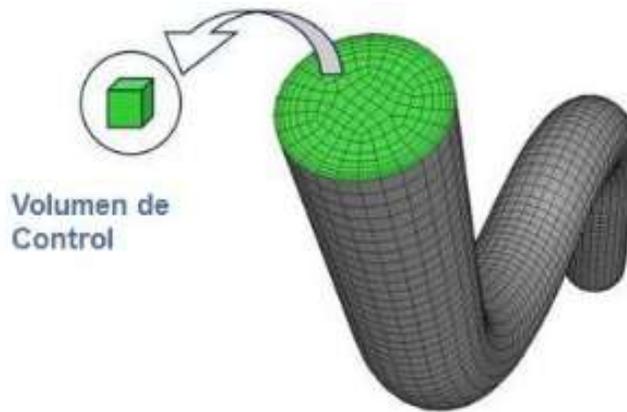
- u representa la velocidad del fluido (vector)
- P es la presión del fluido
- $\rho$  es la densidad del fluido
- $\nu$  es la viscosidad cinemática
- $\nabla$  es el operador laplaciano

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).

### **3.2.2 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 abajo.



**Figura 3.1 El dominio es discretizado en pequeños volúmenes y la ecuación algebraica es resuelta para cada uno de esos elementos.**

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)

### **3.2.2.1 Método de Volúmenes Finitos.**

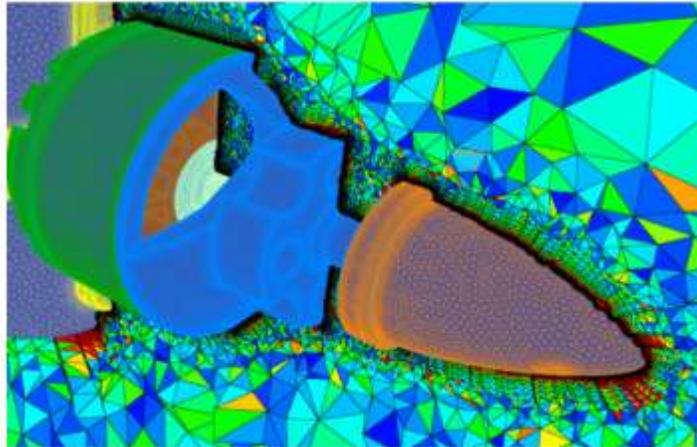
Osses (2016) señala que las ecuaciones de Navier-Stokes solo han podido resolverse analíticamente para flujos en geometrías simples bajo condiciones ideales. Por esta razón, el uso de métodos numéricos se ha vuelto esencial para abordar flujos reales en geometrías complejas. El autor destaca que el método 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.

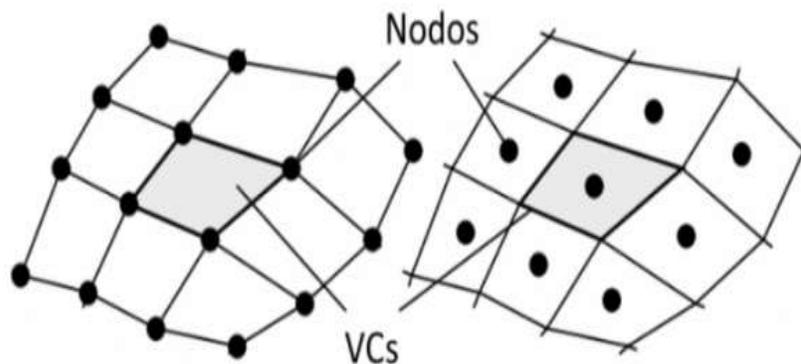


**Figura 3.2 Mallas superficial coloreada por la razón de aspecto de la celda.**

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 (Fig. 3.2). Estos nodos, según ilustra, pueden ubicarse en los vértices de la malla o en los centros de los volúmenes (Fig. 3.3). 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 3.3 Nodos en los vértices de los VCs (izquierda) y nodos en los centros VCs (derecha) para una grilla cuadrilátera.**

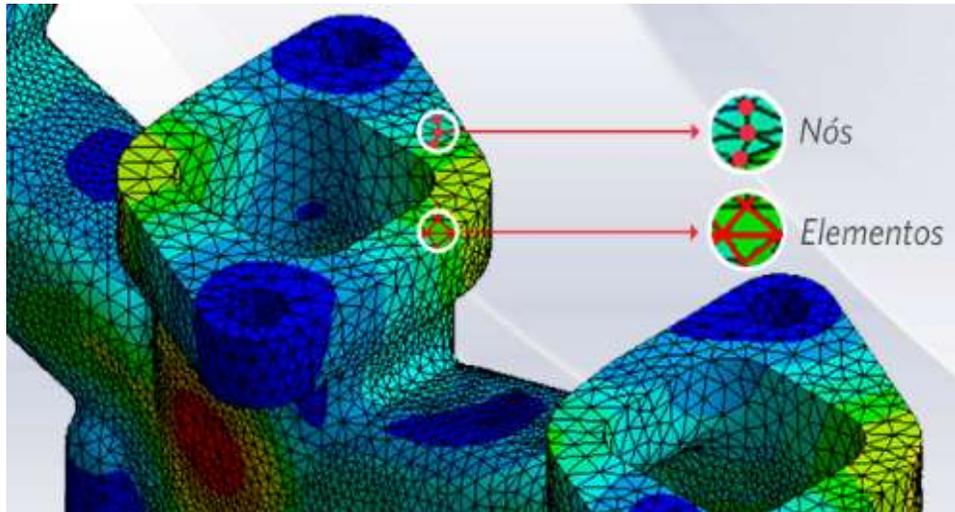
Fuente: Osses, (2016).

### 3.2.2.2 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 3.4 Nodos y elementos de una malla.**

**Fuente:** Mirlisenna, (2016).

### **3.3 Modelación (CFD).**

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, 2012).

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, 2012).

### **3.4 (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).

### **3.5 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.

#### 4. Aplicación Práctica.

##### 4.1 Diagnostico técnico del desarenador.

El presente diagnóstico técnico evalúa las condiciones actuales del desarenador ubicado en el canal de despacho del Rincón de la Vitoria, considerando los aspectos estructurales e hidráulicos que determinan su estado funcional.

##### 4.1.1 Ubicación y características del desarenador del Rincón de la Vitoria.

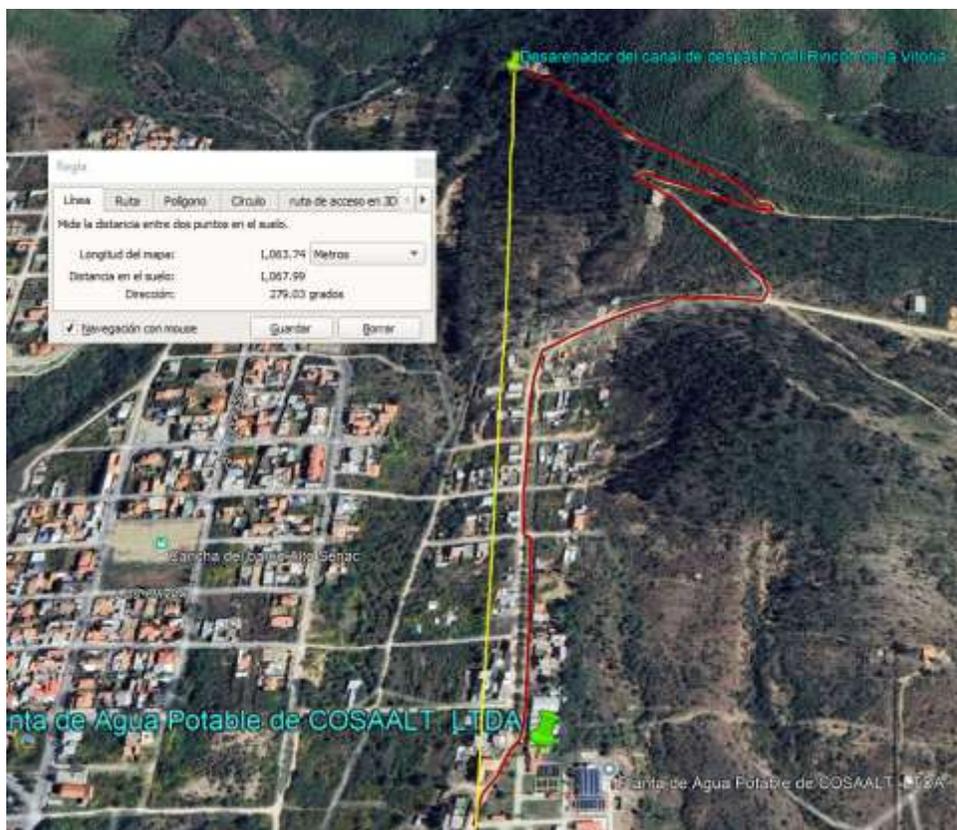
El desarenador del canal de despacho del Rincón de la Vitoria se encuentra ubicado en el Departamento de Tarija, aproximadamente a 1 kilómetro de la planta de agua potable de COSAALT R.L., situada en el barrio Tabladita.

Coordenadas geográficas:

Latitud: 21°31'45,92"

Longitud: 64°46'40,71"

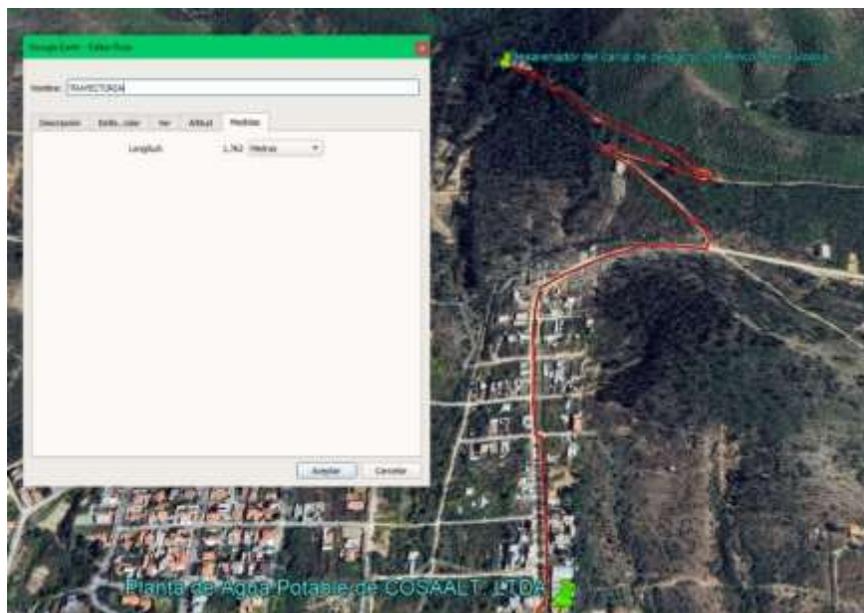
Altitud: Aproximadamente 2008 msnm.



**Figura 4.1 Ubicación del desarenador en relación con la planta de agua potable de COSAALT R.L.**

Fuente: Google Earth.

El acceso al desarenador se realiza a través de un camino de tierra que recorre aproximadamente 1,6 kilómetros desde la planta mencionada.



**Figura 4.2 Acceso al desarenador.**

**Fuente:** Google Earth.

El canal de aducción del Rincón de la Vitoria se abastece del río La Vitoria, el cual dispone de tres estructuras de captación: dos son de tipo directo y una es subterránea. Una de las captaciones se realiza a través de un vertedero lateral, mientras que la otra es una toma directa; la tercera se trata de una galería filtrante. El desarenador tiene una forma rectangular, con dimensiones de 15,5 metros de largo y 5 metros de ancho, ambas medidas en luz libre. Está construido con mampostería de piedra, recubierto con un mortero de cemento en sus paredes, y cuenta con un sistema de bypass que facilita las labores de operación y mantenimiento.

### **Características técnicas del desarenador.**

#### **Tipo de Desarenador**

- Clasificación: Desarenador de flujo horizontal convencional
- Número de unidades: Una unidad
- Sistema de operación: Incluye bypass para mantenimiento

#### **Dimensiones Principales**

- Largo total: 17,00 metros
- Ancho total: 6,50 metros

- Relación largo/ancho: 3,4:1
- Espesor de muros: 75 centímetros

### **Componentes Estructurales**

#### a) Zona de Entrada

- Canal de aproximación:
  - Sección rectangular: 85 cm × 60 cm
  - Base cóncava semicircular: 94 cm de desarrollo
  - Transición hidráulica: 85 cm de longitud
- Sección de reboce:
  - Ancho: 50 cm
  - Alto: 0,30 cm
- Pantalla difusora:
  - Altura: 1,10 metros
  - Ancho: 12 cm
  - Orificios: 10 unidades de 22 cm de diámetro

#### b) Zona de Sedimentación

- Longitud efectiva: 13,90 metros
- Configuración: Rectangular con base cóncava
- Pendiente longitudinal: Diseñada para evacuación de sedimentos

#### c) Sistema de Recolección

- Canal recolector de hormigón armado:
  - Dimensiones: 77 cm × 105 cm
  - Espesor de paredes: 12 cm
  - Longitud: 5,00 metros
  - Posición: 37 cm desde muro lateral
  - Nivel: 40 cm bajo corona de muros
  - Conducto de salida: Tubería de 16 pulgadas
  - Base: Semicircular de 1,50 m × 5,00 m

### **4.1.2 Evaluación del Estado Físico.**

#### **Estado Estructural**

##### a) Rejilla Superior:

- Deterioro severo por corrosión
- Fallas en uniones soldadas
- Reducción de sección efectiva
- Riesgo estructural: Alto potencial de colapso parcial

b) Muros y Paredes:

- Material: Mampostería de piedra con recubrimiento de mortero de cemento
- Patologías identificadas:
- Grietas en zona de conexión con canal recolector
- Posibles infiltraciones
- Deterioro localizado del hormigón

c) Riesgos Estructurales:

- Prioridad alta: Reemplazo de rejilla superior
- Prioridad media: Reparación de grietas en muros
- Prioridad baja: Mantenimiento general del recubrimiento

#### **4.1.3 Evaluación del Funcionamiento Hidráulico.**

##### **Capacidad y Caudales**

- Caudal de diseño: 160 L/s
- Caudal máximo registrado: 339 L/s
- Tirante hidráulico máximo del canal: 80 cm
- Tirante crítico de operación: 78-80 cm

##### **Operación y Mantenimiento**

a) Rutina de Limpieza:

- Frecuencia normal: Cada 3-4 semanas
- Frecuencia en época de lluvia: Según demanda
- Indicador visual: Acumulación visible de sedimentos

b) Control Operativo:

- Monitoreo de niveles
  - Coordinación con estaciones aguas arriba
  - Gestión de caudales excedentes

#### **4.1.4 Evaluación de Eficiencia.**

##### **Eficiencia Operativa del Desarenador**

Según el operador del sistema, el desarenador funciona eficientemente en periodos secos o cuando los caudales se mantienen por debajo de los 160 l/s, que corresponde a su caudal de diseño. En estas condiciones:

- El agua tratada presenta claridad visual.
- La frecuencia de limpieza es moderada y manejable.

Sin embargo, durante los meses de lluvia, los caudales tienden a superar este límite, lo que genera:

- Un incremento en la turbidez del agua tratada.
- Un mayor arrastre de sedimentos, reflejado en la necesidad de limpiezas más frecuentes.

Esto indica que el desarenador es efectivo dentro de su rango de diseño, pero su eficiencia disminuye significativamente cuando enfrenta caudales superiores, lo que sugiere la necesidad de ajustes o rediseño para manejar estos escenarios.

##### **Elementos Complementarios**

- Malla superficial para retención de material flotante
- Efectividad en retención de hojas y ramas

#### **4.1.5 Recomendaciones Técnicas.**

##### a) Mejoras Estructurales

- Reemplazo completo de la rejilla superior.
- Reparación de grietas y fisuras.
- Impermeabilización de zonas afectadas.

##### b) Optimización Operativa

- Implementación de sistema de medición de caudales.
- Mejora del sistema de limpieza.
- Instalación de elementos de control automatizado.

##### c) Monitoreo y Control

- Implementación de programa de monitoreo de eficiencia.
- Registro sistemático de operación y mantenimiento.
- Establecimiento de indicadores de desempeño.

## 4.2 Recolección de Datos.

El desarenador del Rincón de la Vitoria carecía de planos técnicos originales, lo que hizo necesario realizar un levantamiento de sus dimensiones in situ. Utilizando un flexómetro y una wincha, se llevaron a cabo mediciones precisas de todos los elementos estructurales relevantes. Estas mediciones incluyeron la longitud, ancho y profundidad totales del desarenador, así como las dimensiones de las cámaras de sedimentación, canales de entrada y salida, y otros componentes críticos.

Con base en estos datos recabados en campo, se elaboró un plano arquitectónico detallado del desarenador. Este plano no solo sirvió como registro actualizado de la estructura existente, sino que también fue fundamental para la fase posterior del estudio. La precisión de estas mediciones y el plano resultante fueron cruciales para crear un modelo geométrico, permitiendo así realizar una simulación (CFD) en condiciones que reflejan la realidad del desarenador.

### 4.2.1 Mediciones de Campo.

Este enfoque metodológico, que parte de mediciones directas para la creación de un modelo digital, aseguró que la simulación se basara en las dimensiones y características actuales de la estructura, proporcionando así una base sólida para el análisis y la mejora del diseño del desarenador.



**Figura 4.3** Medición de las dimensiones del desarenador.

**Fuente:** Elaboración propia.

### 4.2.2 Aforo con el Molinete electromagnético OTT MF pro.

Se realizó el aforo de velocidad empleando un molinete electromagnético OTT MF pro, en ocho secciones estratégicamente seleccionadas del desarenador. La distribución de los puntos de medición responde a la necesidad de control hidráulico en zonas críticas de la estructura,

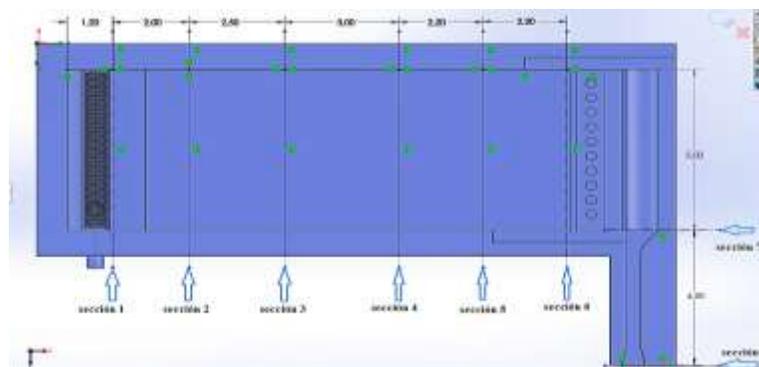
abarcando el canal de entrada en régimen laminar, la zona de transición a la entrada del desarenador y la sección próxima al canal de salida. La metodología de aforo implementada estableció una matriz de medición sistemática para cada sección transversal, compuesta por 6 puntos de medición en el eje horizontal y 3 niveles de profundidad en el eje vertical, totalizando 18 puntos de control por sección, lo que permite obtener un perfil detallado de velocidades que caracteriza el comportamiento hidráulico del flujo en cada zona evaluada.



**Figura 4.4 Medición de velocidades en secciones de control.**

Fuente: Elaboración propia.

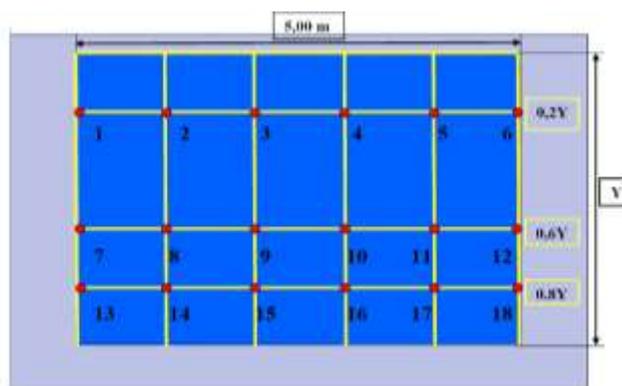
Para ejecutar las mediciones ilustradas en la Figura 4.5, se implementó una estructura de acceso consistente en un andamio de 6 metros de longitud, dimensionado específicamente para cubrir el ancho total del desarenador de 5 metros. Esta plataforma temporal fue esencial para garantizar la accesibilidad y seguridad durante el proceso de aforo, permitiendo realizar las mediciones de manera precisa en todos los puntos establecidos de la sección transversal.



**Figura 4.5 Plano vista planta con secciones de control.**

Fuente: Elaboración propia..

La determinación de los puntos de aforo se estableció mediante un análisis in situ de las condiciones hidráulicas del desarenador, identificando secciones críticas para el control de velocidades. Los criterios de selección se basaron en la observación del comportamiento del flujo en zonas estratégicas: la transición del canal de entrada al desarenador, el canal de aproximación donde se evidencia un flujo estabilizado, y la proximidad al canal de salida. El espaciamiento entre secciones se definió considerando las variaciones en el régimen de flujo, priorizando aquellas zonas donde las características hidráulicas presentaban cambios significativos.



**Figura 4.6 Sección con puntos de aforo.**

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de velocidades se efectuó siguiendo el protocolo establecido en la guía de laboratorio de hidráulica, estableciendo tres puntos de medición en la vertical ( $2y$ ,  $6y$  y  $8y$ ), donde "y" representa el tirante hidráulico en cada sección. Esta metodología de medición se aplicó sistemáticamente en las 8 secciones transversales definidas, cuyos resultados se presentan detalladamente en las Tablas (2 a 9). Este método de distribución vertical permite caracterizar el perfil de velocidades desde el fondo hasta la superficie del flujo, proporcionando una representación comprehensiva de la distribución de velocidades en cada sección de control.

**Velocidades leídas in situ con ayuda del molinete electromagnético OTT MF pro.**

**Tabla: 2: Velocidades en la sección 1.**

Tirante "y"	3,05m	SECCIÓN 1					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad leída en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6

0,2 y	0,61	0,08	0,005	0,004	0,006	0,009	0,007
0,6 y	1,83	0,01	0,012	0,003	0,007	0,006	0,002
0,8 y	2,44	0,024	0,008	0,003	0,003	0,007	0,09

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla: 3: Velocidades en la sección 2.**

Tirante "y"	2,73m	SECCIÓN 2					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad letrada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,546	0,001	0,003	0,005	0,003	0,005	0,008
0,6 y	1,638	0,016	0,004	0,005	0,004	0,004	0,054
0,8 y	2,184	0,011	0,002	0,003	0,003	0,005	0,157

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla: 4: Velocidades en la sección 3**

Tirante "y"	3,05m	SECCIÓN 3					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad letrada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,61	0,009	0,004	0,018	0,012	0,01	0,008
0,6 y	1,83	0,017	0,006	0,027	0,001	0,011	0,019
0,8 y	2,44	0,018	0,011	0,011	0,016	0,016	0,018

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla: 5: Velocidades en sección 4.**

Tirante "y"	2,68m	SECCIÓN 4					
		1	2	3	4	5	6

Distancia de pared (m) horizontal		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad letrurada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,536	0,02	0,014	0,009	0,028	0,017	0,02
0,6 y	1,608	0,032	0,009	0,022	0,007	0,006	0,014
0,8 y	2,144	0,032	0,014	0,033	0,055	0,068	0,014

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla: 6: Velocidades en sección 5.**

Tirante "y"	2,625m	SECCIÓN 5					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad letrurada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,525	0,023	0,006	0,013	0,017	0,028	0,008
0,6 y	1,575	0,025	0,003	0,026	0,019	0,02	0,018
0,8 y	2,1	0,011	0,009	0,011	0,02	0,089	0,04

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.6: Velocidades en sección 6.**

Tirante "y"	2,56m	SECCIÓN 6					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad letrurada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,512	0,004	0,008	0,008	0,014	0,015	0,011
0,6 y	1,536	0,015	0,006	0,021	0,013	0,021	0,011
0,8 y	2,048	0,01	0,014	0,017	0,03	0,02	0,014

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla: 7: Velocidades en sección del canal de entrada con una transición.**

Tirante "y"	0,27m	SECCIÓN DE ENTRADA CON TRANSICIÓN "85cm"				
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5
		0,14 m	0,28 m	0,42 m	0,56 m	0,71 m

Profundidad (m)		velocidad leída en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad				
		1	2	3	4	5
0,6 y	0,162	1,107	0,672	0,496	0,426	0,115

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla: 8: Velocidades en la sección del canal de entrada principal.**

Tirante "y"	0,34m	CANAL DE ENTRADA "60cm"				
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5
			0,10 m	0,20 m	0,30 m	0,40 m
Profundidad (m)		velocidad leída en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad				
		1	2	3	4	5
0,6 y	0,18	0,673	0,742	0,652	0,492	0,419

Fuente: Elaboración propia.

La medición del caudal en el canal de entrada se realizó mediante aforo con molinete electromagnético OTT MF pro, obteniéndose un caudal medio de 93 l/s (0,093 m<sup>3</sup>/s). Este valor se determinó a través de la integración de las velocidades puntuales registradas por el instrumento, siguiendo el método de área-velocidad, lo cual proporciona un alto grado de confiabilidad en la medición del flujo volumétrico en la sección de control.

### Dirección del flujo

Durante las mediciones realizadas con el molinete electromagnético OTT MF pro, en el desarenador, se registraron valores de velocidad negativos en varios puntos de control. Estas velocidades negativas no representan errores en la medición, sino que responden al comportamiento hidráulico del flujo en el interior del desarenador, donde las bajas velocidades y las características geométricas del canal generan zonas de recirculación, turbulencia y cambios locales en la dirección del flujo. El molinete electromagnético OTT MF pro, mide la velocidad considerando un sistema de referencia unidimensional, con la dirección positiva definida según el flujo principal. Por lo tanto, cualquier cambio momentáneo en la dirección del flujo, como ocurre en zonas cercanas a las paredes, esquinas o áreas de estancamiento, es registrado como un valor negativo. Es importante destacar que estas velocidades negativas no implican una reducción de la magnitud del flujo, sino simplemente un cambio en su orientación respecto al eje principal del desarenador. Para fines de análisis y presentación de resultados, y con el objetivo de garantizar una adecuada comparación con la simulación numérica realizada en

Solidworks Flow Simulation, donde las velocidades se representan como magnitudes positivas, se ha optado por tomar el valor absoluto de las velocidades medidas. Este tratamiento es válido, ya que el interés principal radica en analizar la magnitud del flujo y su distribución en las diferentes secciones del desarenador, sin que la dirección momentánea del flujo afecte los objetivos del análisis. No obstante, se deja constancia de que las velocidades presentadas en la tabla originalmente incluían valores negativos, producto de las condiciones mencionadas, y que estos se han transformado únicamente para facilitar la interpretación y comparación de los resultados.

### **4.3 Simulación y Modelado en Condiciones Actuales.**

#### **4.3.1 Elaboración de la Geometría.**

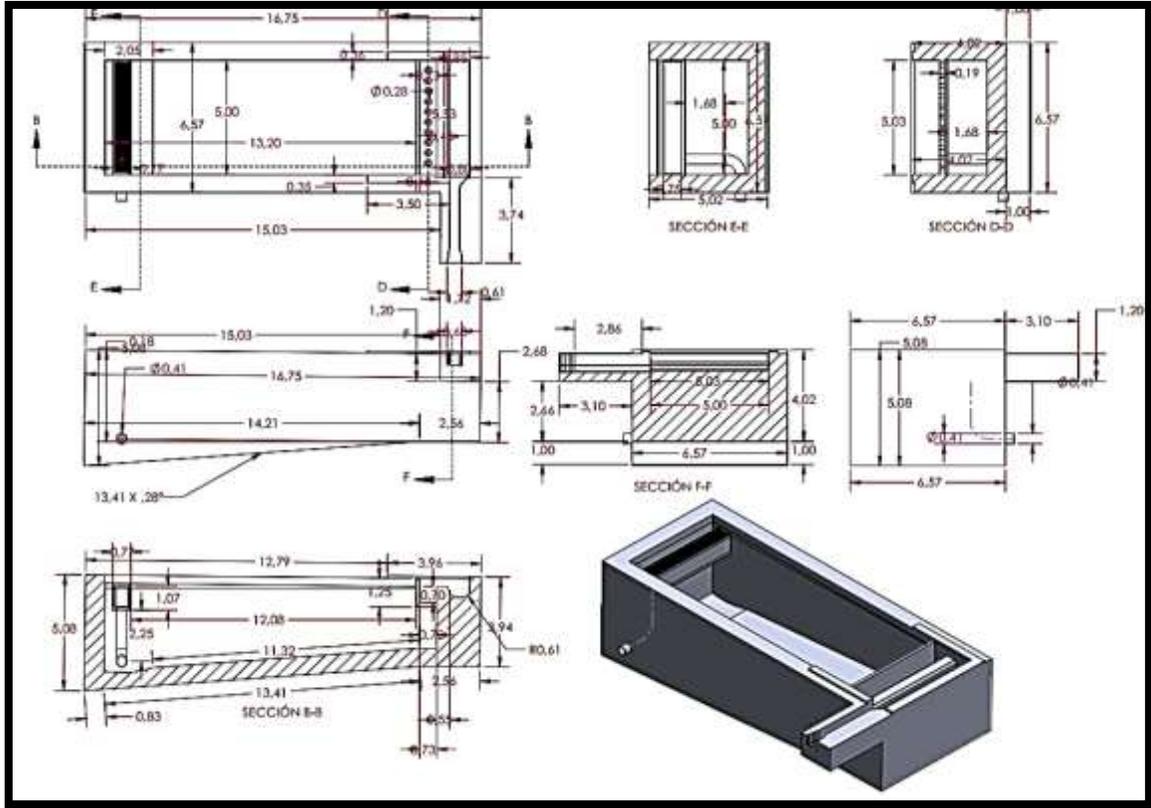
La elaboración de la geometría se llevó a cabo mediante un proceso meticuloso que combinó el trabajo de campo con técnicas de diseño asistido por computadora. El proceso se desarrolló de la siguiente manera:

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.

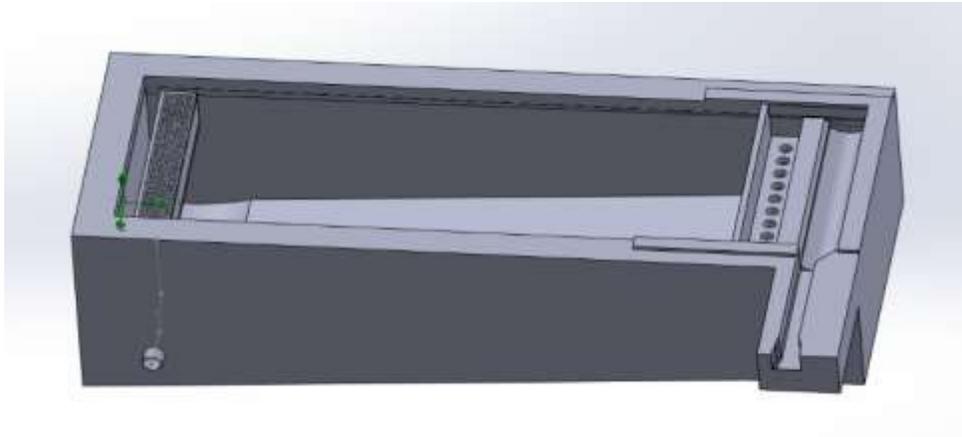
A partir del modelo 3D en Solidworks, se generaron los planos detallados, incluyendo vistas en planta, alzados, secciones y detalles constructivos según fuera necesario



**Figura 4.7 Plano del desarenador.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda del Solidwoks.

El plano presentado representa el diseño detallado del desarenador, el cual fue desarrollado a partir de un levantamiento de medidas realizadas en campo, garantizando así la precisión dimensional necesaria para una simulación hidráulica confiable. El diseño se presenta desde múltiples perspectivas, incluyendo la vista en planta, corte longitudinal y secciones transversales, todas ellas acotadas con las dimensiones obtenidas durante el trabajo de campo. También complementa con una vista isométrica tridimensional que permite visualizar la configuración completa de la estructura en su contexto real. El diseño incorpora elementos como la zona de transición para optimizar el flujo de entrada, el canal principal de sedimentación, y la tubería de salida, todos ellos dimensionados según las mediciones in-sítu. La sección longitudinal evidencia la pendiente real del fondo, para la sedimentación y limpieza de materiales, mientras que los cortes transversales detallan la configuración estructural de las paredes y elementos de soporte del desarenador, permitiendo realizar simulaciones de flujo más precisas y representativas del comportamiento hidráulico real de la estructura.

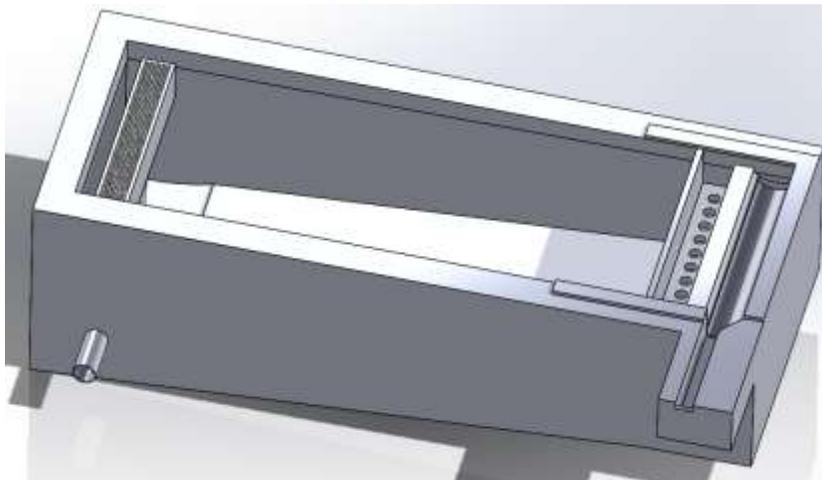


**Figura 4.8 Vista tridimensional del desarenador**

Fuente: Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

#### **4.3.2 Refinamiento de Geometría Elaborada.**

En la fase de preprocesamiento del modelo digital, se ejecutó un proceso de refinamiento de la geometría para garantizar la integridad del dominio computacional. Este proceso incluyó la verificación y corrección de posibles discontinuidades en las superficies, la eliminación de intersecciones no deseadas y la validación de la fusión adecuada entre componentes. Estas optimizaciones son fundamentales para asegurar la calidad del mallado y, consecuentemente, la convergencia exitosa de la simulación numérica en el software de dinámica de fluidos computacional (CFD).

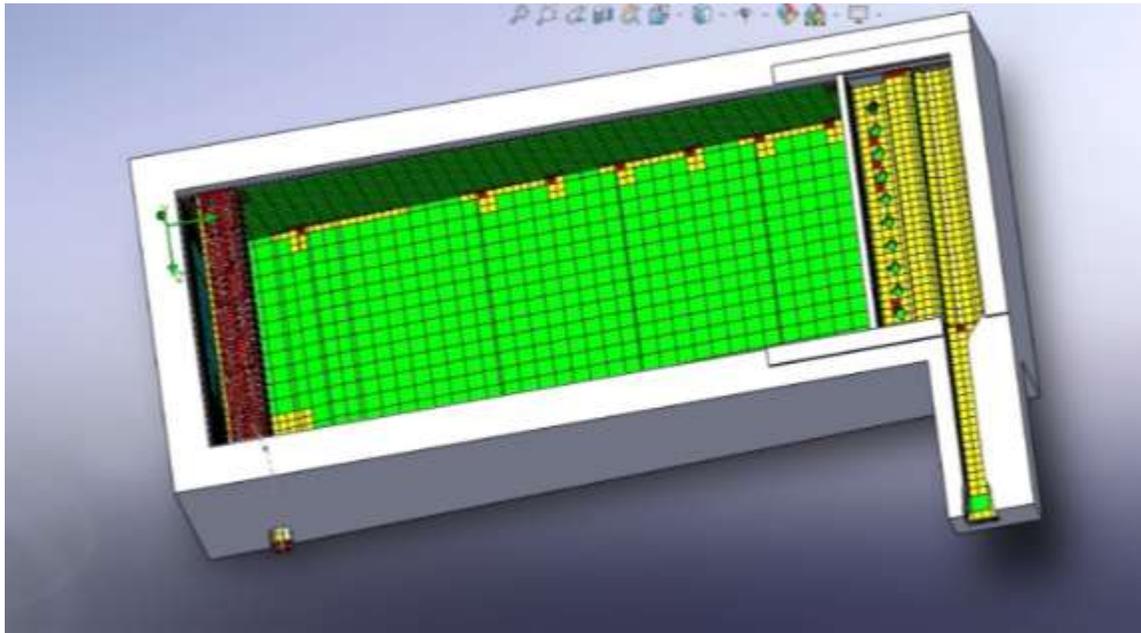


**Figura 4.9 Optimización estructural para evitar fugas.**

Fuente: Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

Se realizó mediante un refinamiento progresivo de la estructura, optimizando el tamaño y distribución de los elementos para capturar adecuadamente los fenómenos hidráulicos

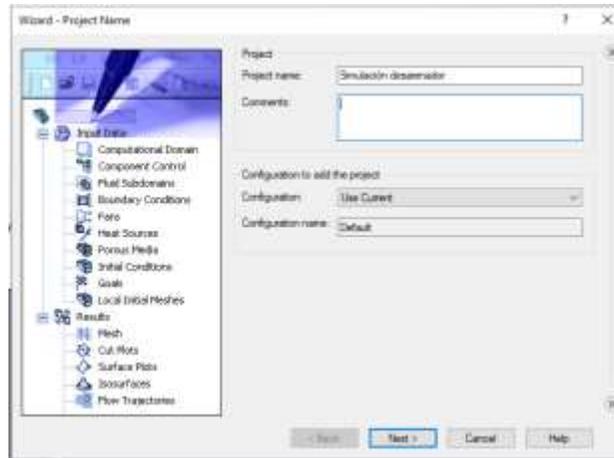
relevantes. Se prestó especial atención a las zonas críticas como la transición de entrada, las regiones cercanas a las paredes y la zona de sedimentación, donde se requiere una mayor densidad de elementos para resolver con precisión las características del flujo. Este refinamiento selectivo permite equilibrar la precisión de los resultados con la eficiencia computacional de la simulación.



**Figura 4.10 Mallado del área en contacto con el fluido.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

El proceso de simulación utilizando “Flow Simulation” comienza con la configuración de un proyecto nuevo mediante la herramienta Wizard. Esta fase inicial implica la especificación de diversos parámetros cruciales para el análisis. Entre las configuraciones fundamentales se encuentra la elección del sistema de unidades que se empleará a lo largo del proyecto. En este caso particular, se ha optado por utilizar el SI (Sistema Internacional de Unidades) como marco de referencia para todas las mediciones y cálculos subsiguientes. Esta selección de parámetros sienta las bases para una simulación precisa y coherente, asegurando que todos los datos y resultados se expresen en un formato estandarizado y universalmente reconocido.



**Figura 4.11 Creación de proyecto.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

En la siguiente etapa del proceso de configuración en Flow Simulation, el usuario se enfrenta a una decisión crucial: la selección del tipo de análisis a realizar. El software presenta dos opciones principales: análisis interno y análisis externo. Esta elección es fundamental y debe basarse en las características específicas del objeto o estructura a simular.

**Análisis Externo:** Se utiliza para simular flujos alrededor de objetos o a través de estructuras abiertas.

Es apropiado para estudios aerodinámicos, análisis de flujo en canales abiertos o simulaciones de corrientes alrededor de obstáculos.

Permite modelar interacciones entre el fluido y el ambiente circundante.

En el caso específico de un vertedero tipo canal, la estructura es inherentemente abierta, lo que descarta inmediatamente la opción de análisis interno. Los vertederos, por su naturaleza, están diseñados para permitir el flujo libre de agua sobre una superficie, interactuando constantemente con el ambiente exterior.

Considerando estas características, la elección lógica y apropiada para la simulación de un vertedero tipo canal es el análisis externo. Esta selección permite modelar con precisión:

El flujo de agua sobre la superficie del vertedero.

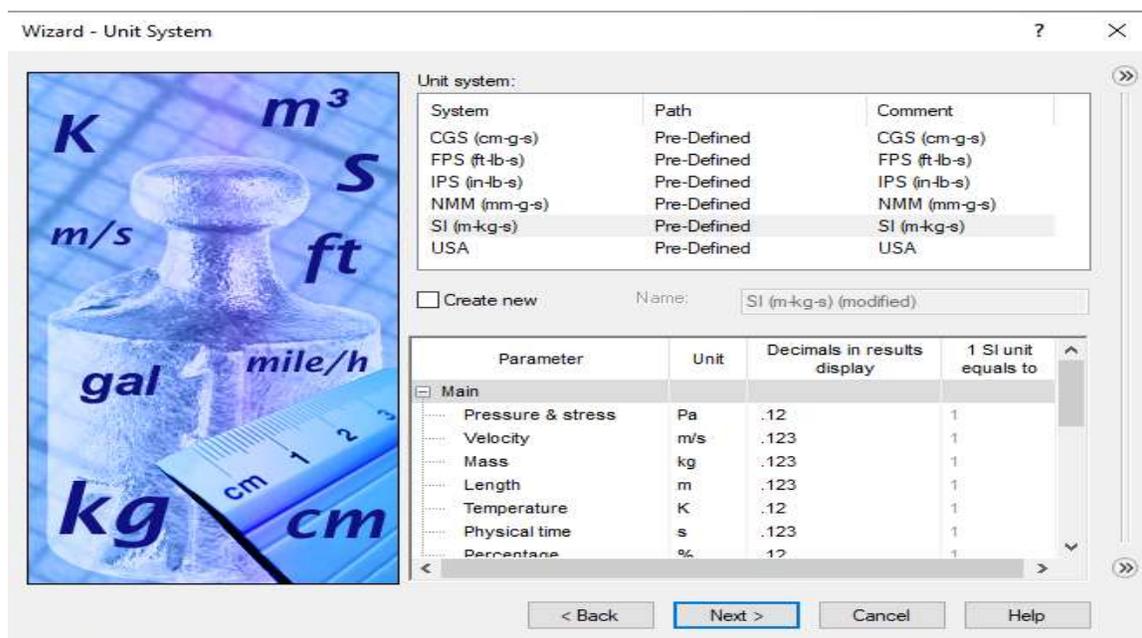
Las interacciones entre el agua y el aire circundante.

Los efectos de la gravedad y la presión atmosférica en el comportamiento del fluido.

Las turbulencias y variaciones de velocidad que ocurren en un canal abierto.

La decisión de optar por el análisis externo asegura que la simulación capture de manera precisa la dinámica de fluidos característica de los vertederos de canal abierto, proporcionando

resultados más realistas y aplicables al diseño y análisis de estas estructuras hidráulicas.

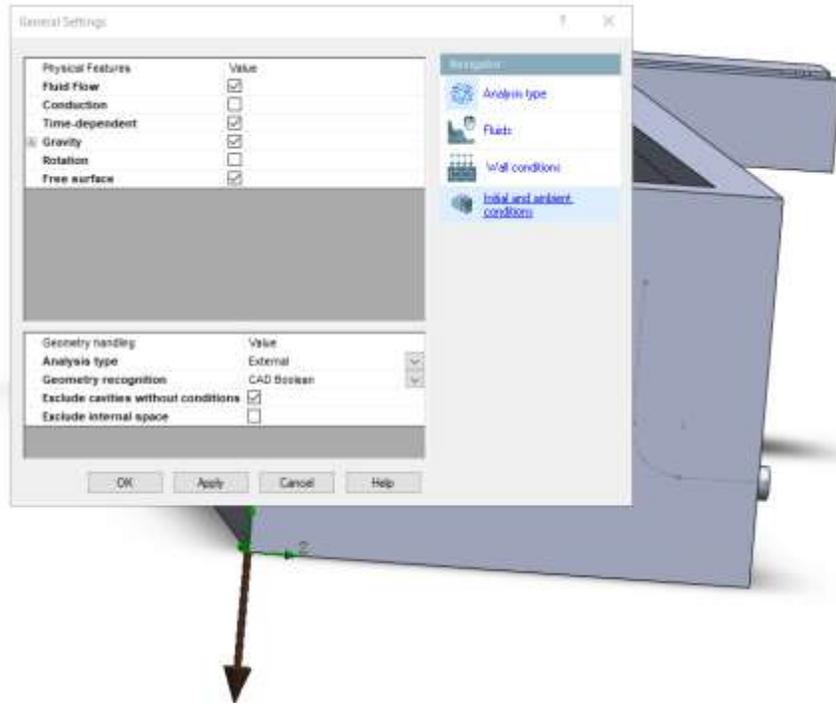


**Figura 4.12 Configuración del sistema de unidades.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

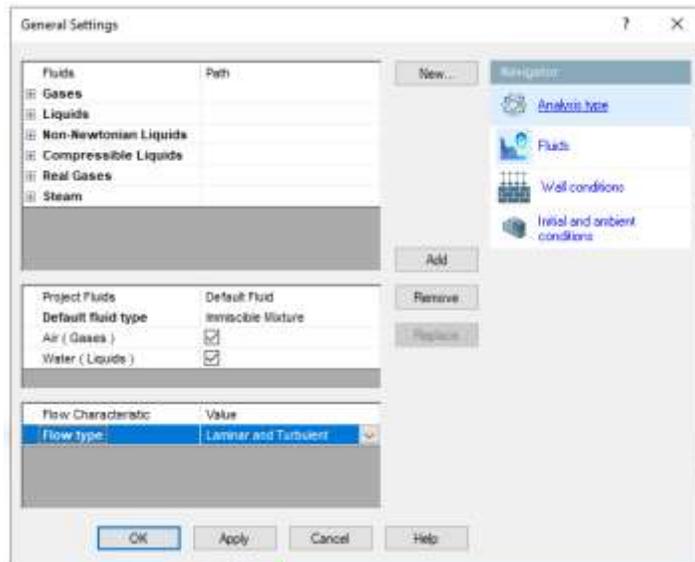
El análisis de flujo en un canal abierto requiere configuraciones específicas en Flow Simulation para garantizar resultados precisos. Se activa la opción "Free Surface" para modelar la interfaz aire-agua característica de estos sistemas. Además, se habilita la dependencia del tiempo (Time-dependent), lo que permite simular el comportamiento dinámico del flujo. El tiempo total de análisis es un parámetro crucial, pero variable, ya que depende de la capacidad de procesamiento del equipo utilizado; períodos más largos implican mayor tiempo de cálculo y número de iteraciones. La gravedad es otro factor esencial que debe activarse, asegurándose de ajustar correctamente el eje de acción si el programa no lo reconoce automáticamente.

En cuanto a la determinación de los fluidos involucrados, se incluyen tanto el aire (en la categoría de gases) como el agua (en la de líquidos), reflejando así las condiciones reales del estudio. Para una simulación completa, se selecciona la opción de flujo laminar y turbulento simultáneamente. Esta elección permite al software considerar ambos regímenes de flujo durante el análisis, evitando limitaciones artificiales y capturando transiciones potenciales entre estados laminares y turbulentos. Esta configuración integral asegura que la simulación represente con fidelidad la compleja dinámica de fluidos presente en los canales abiertos, proporcionando resultados más robustos y aplicables a situaciones reales.



**Figura 4.13 Configuración de gravedad, tiempo y superficie libre.**

Fuente: Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

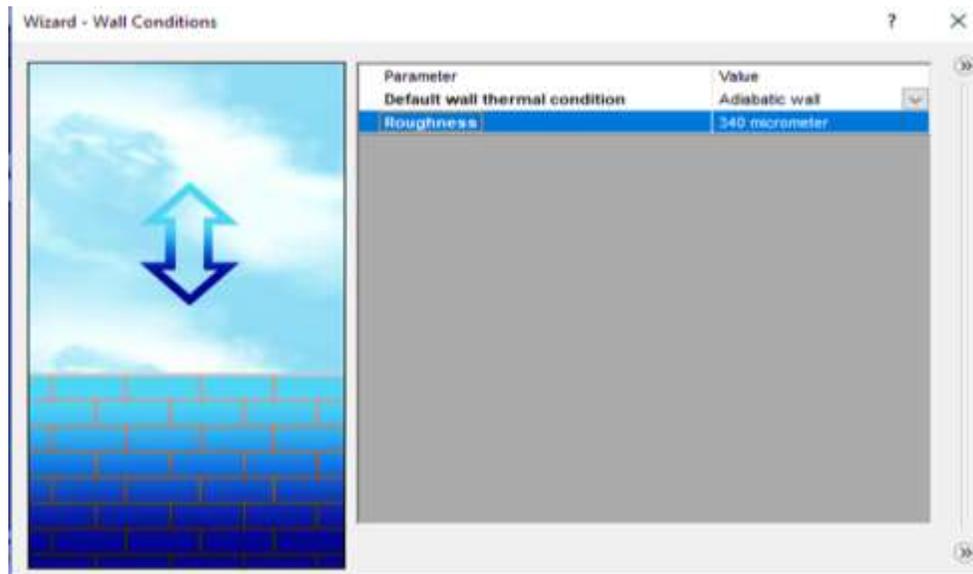


**Figura 4.14 Selección de flujos en la simulación: Agua – Aire**

Fuente: Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

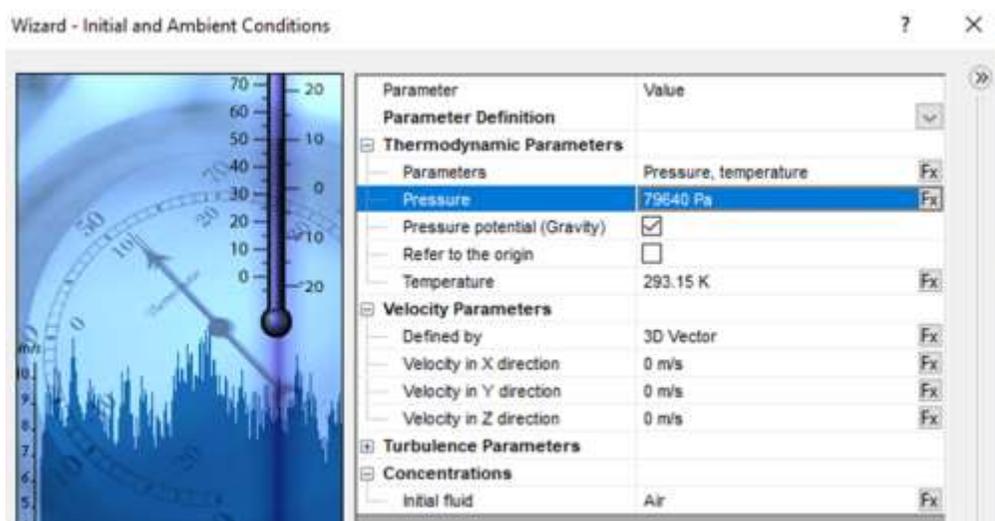
Las condiciones iniciales y ambientales también se mantuvieron en sus valores por defecto, incluyendo la densidad y viscosidad del fluido, temperatura de operación y presión atmosférica de referencia, ya que estos parámetros estándar se ajustan adecuadamente a las características

del flujo en estructuras hidráulicas de este tipo y a las condiciones reales de operación del desarenador.



**Figura 4.15 Rugosidad del hormigón en el desarenador.**

Fuente: Elaboración propia con ayuda de Solidworks.



**Figura 4.16 Condiciones iniciales de temperatura, presión y concentración de fluido.**

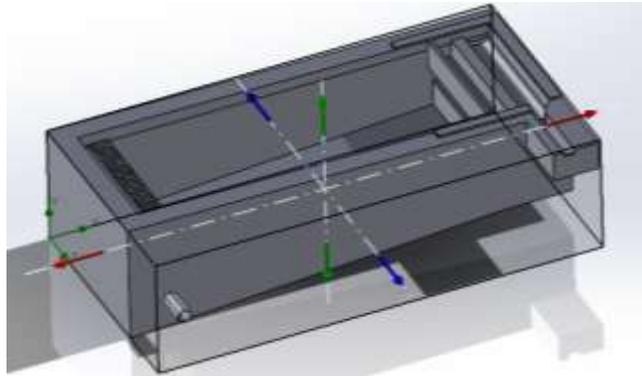
Fuente: Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

### 4.3.3 Dominio Computacional.

Al finalizar el ingreso de datos iniciales en Flow Simulation, se genera automáticamente el cubo del dominio computacional. Este cubo define el volumen donde el programa realizará todos los cálculos de la simulación. El tamaño de este dominio es crucial, ya que afecta directamente el

tiempo de procesamiento y la precisión de los resultados.

Es importante optimizar las dimensiones del cubo, reduciéndolo al tamaño mínimo necesario sin comprometer la calidad de la simulación.



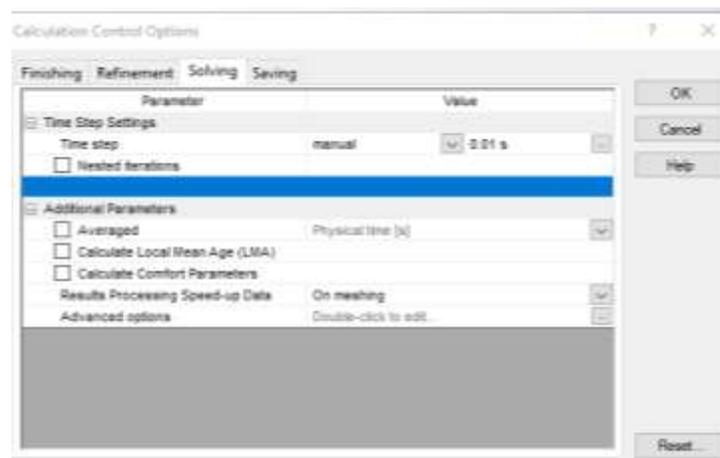
**Figura 4.17 Dominio computacional en el desarenador.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de solidworks.

El objetivo es que la estructura a analizar quede completamente contenida dentro del dominio, dejando suficiente espacio alrededor para capturar adecuadamente los fenómenos de flujo. Este ajuste debe realizarse cuidadosamente en los tres ejes (X, Y, Z), considerando la geometría de la estructura y las características esperadas del flujo.

Para un vertedero o canal abierto, se debe prestar especial atención a la extensión vertical del dominio para capturar la superficie libre del agua, así como a la longitud en la dirección del flujo, para modelar correctamente los efectos de entrada y salida. Un dominio bien optimizado permite obtener resultados precisos con la mayor eficiencia computacional posible.

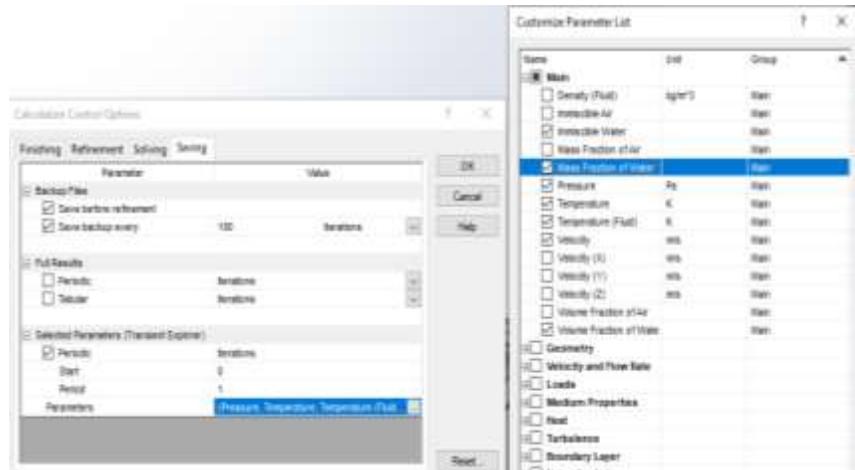
#### 4.3.4 Puntos de Control.



**Figura 4.18 Configuración de paso de tiempo**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

El tiempo físico en simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD), como las realizadas en Solidworks Flow Simulation, debe ser lo suficientemente largo para capturar el comportamiento del flujo en el dominio y permitir que el sistema alcance un estado transitorio o estacionario. En el caso de estructuras hidráulicas como desarenadores o sedimentadores, el tiempo de simulación generalmente se encuentra en el rango de 50 a 100 segundos, dependiendo de la escala del sistema y la velocidad del flujo, en este caso se optó por 70 segundos.

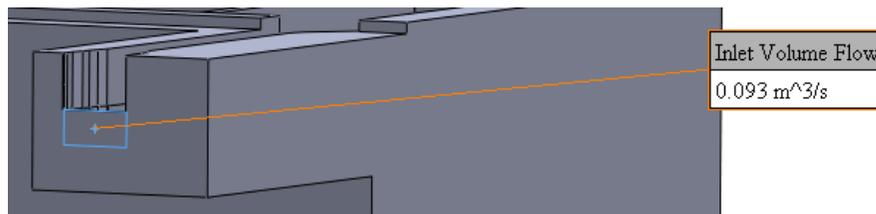


**Figura 4.19 Configuración de parámetros a analizar.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

La herramienta computacional desarrollada incorpora capacidades de simulación multifásica, permitiendo modelar y analizar el comportamiento dinámico de un sistema bifásico compuesto por agua y aire.

#### 4.3.5 Condiciones de Contorno.

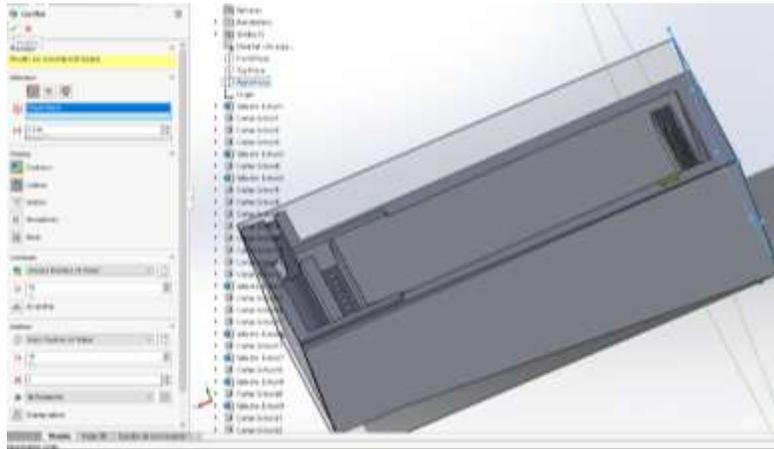


**Figura 4.20 Caudal de entrada y dirección.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

En las paredes del canal se aplica una rugosidad específica que reproduce las propiedades del material utilizado en su construcción, lo cual permite analizar cómo esta característica influye en la disipación de energía del flujo y en la disminución de su velocidad, favoreciendo la sedimentación de partículas suspendidas. En la salida, se establece una condición de descarga libre, simulando un ambiente sin restricciones de presión para el flujo. Estas configuraciones

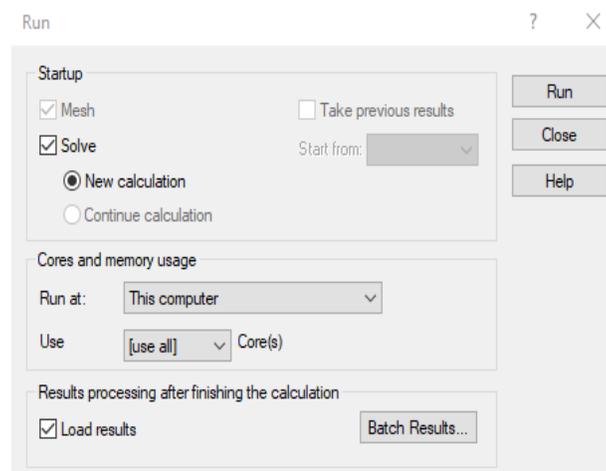
son fundamentales para asegurar que la simulación refleje de forma precisa el comportamiento del flujo en condiciones de máxima capacidad operativa del desarenador.



**Figura 4.21 Configuración de secciones (puntos de control).**

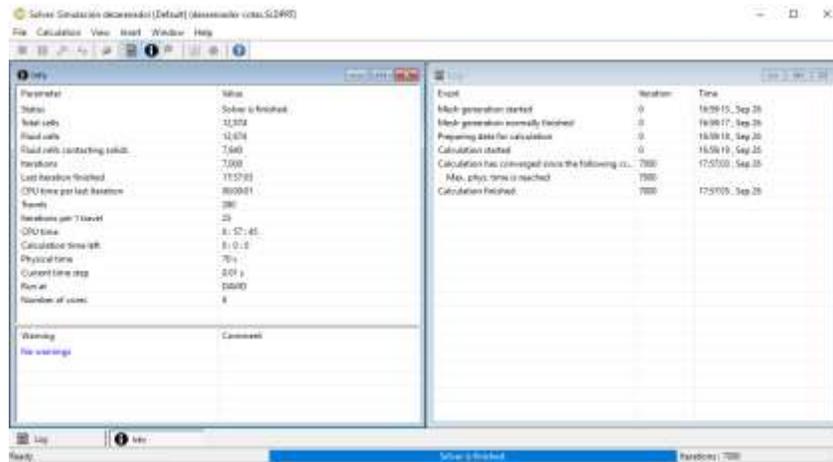
**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

La configuración de las secciones de puntos de control en el desarenador se estableció en ocho secciones estratégicamente distribuidas a lo largo del desarenador. En cada una de estas secciones, se registran las velocidades del flujo para analizar su comportamiento y la disminución progresiva de velocidad a medida que el agua atraviesa el desarenador. Estas mediciones permiten identificar variaciones en la dinámica del flujo en distintas zonas del canal, lo que es crucial para evaluar los efectos de las modificaciones de diseño. La ubicación de estas secciones asegura un monitoreo detallado del perfil de velocidades en puntos clave, proporcionando información valiosa sobre la distribución y el comportamiento del flujo.



**Figura 4.22 Ejecución de solucionador.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

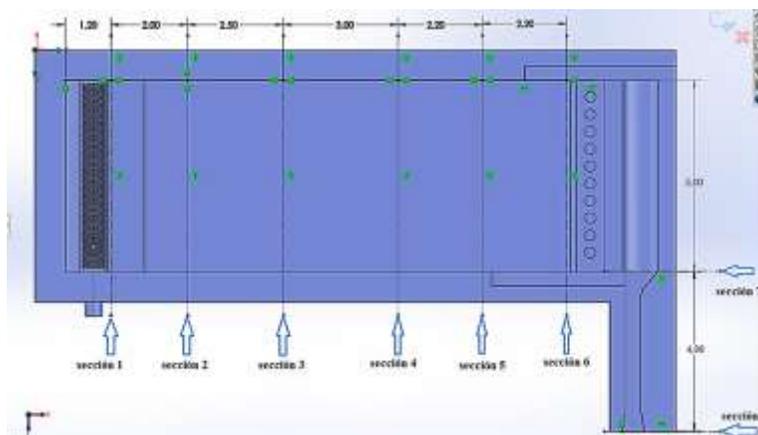


**Figura 4.23 Número de iteraciones y tiempo de solución.**

Fuente: Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

### 4.3.6 Resultados en Secciones de Control.

El análisis de la distribución de velocidades se realizó mediante ocho secciones transversales o puntos de aforo estratégicamente distribuidos a lo largo del dominio computacional, con énfasis especial en las posiciones 2y, 6y y 8y. La visualización emplea un mapa de colores donde los valores máximos de velocidad están representados en rojo, mientras que las velocidades mínimas se muestran en azul. El campo de velocidades se descompone en sus tres componentes cartesianas ( $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ ), lo cual revela que el movimiento del fluido no está restringido a una dirección preferencial, sino que exhibe un comportamiento multidireccional característico de flujos complejos. Estas ocho secciones de control permiten un monitoreo comprehensivo del comportamiento del fluido a lo largo del dominio, facilitando la identificación de patrones de flujo y variaciones en la distribución de velocidades.



**Figura 4.24 Secciones de control en el desarenador, vista en planta.**

Fuente: Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

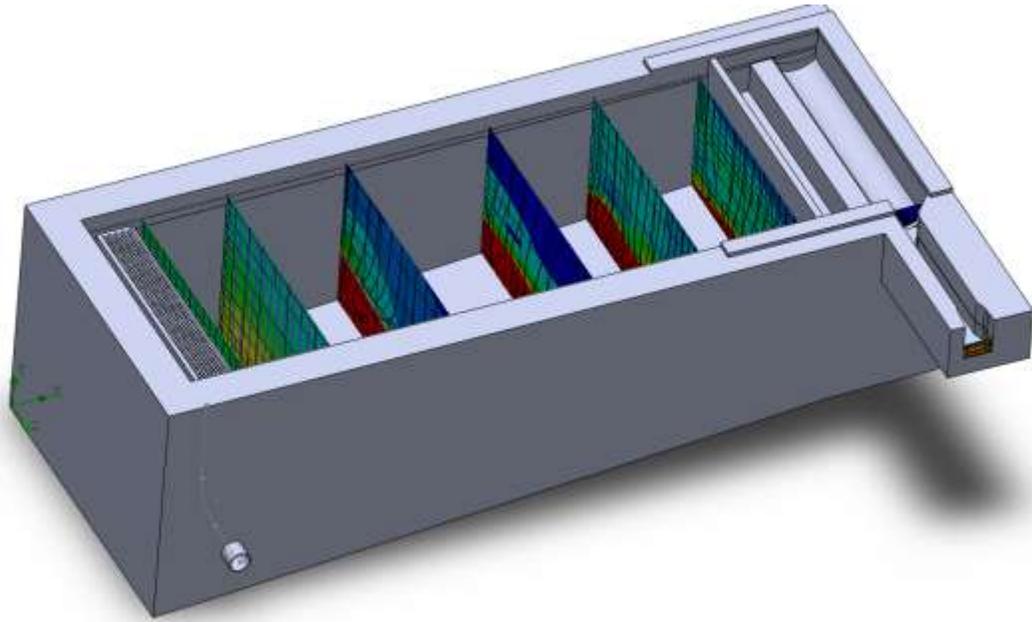
Las secciones principales analizadas son la sección 1, sección 6, sección 7 y sección 8.

Sección 1 se encuentra más próxima al canal de salida. Es importante analizar las velocidades y la forma del flujo a la salida. Esto nos permitirá entender cómo se comporta el flujo de agua al salir del sistema.

Sección 6 se encuentra a la salida de los orificios por donde pasa el flujo de agua. En esta sección, es importante analizar la forma y distribución del flujo a la salida, así como seguir su curso a lo largo del desarenador.

Sección 7 limita el desarenador y el canal colector. Presenta una transición de entrada, por lo que es importante analizar cómo influye esta transición en la distribución de velocidades.

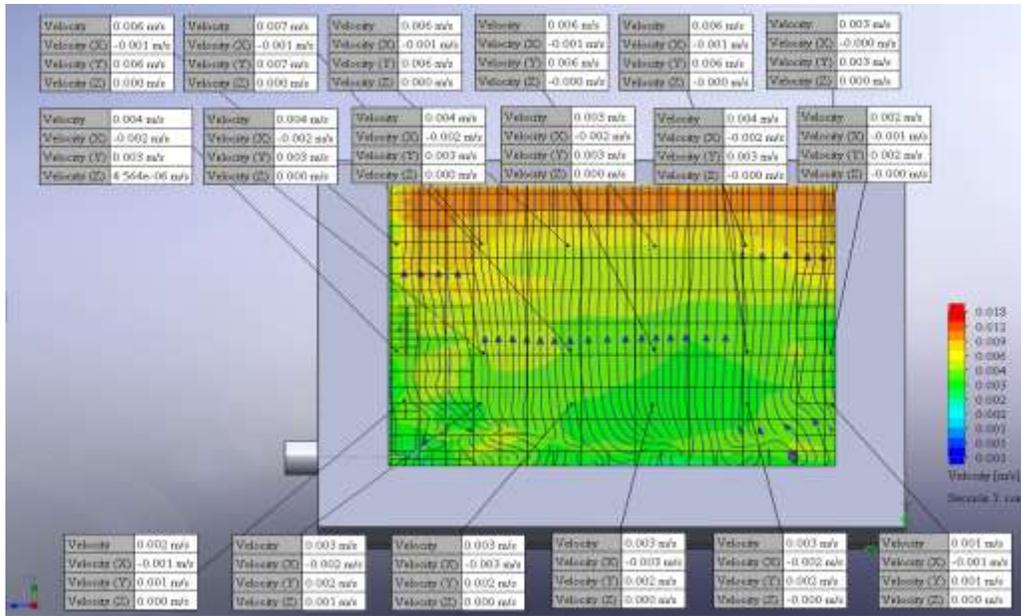
Sección 8 esta es la entrada principal. Tiene una base irregular, pero presenta un flujo laminar, lo cual es ideal para realizar la medición de velocidades y el aforo de caudal de entrada.



**Figura 4.25 Desarenador en vista tridimensional con secciones de control.**

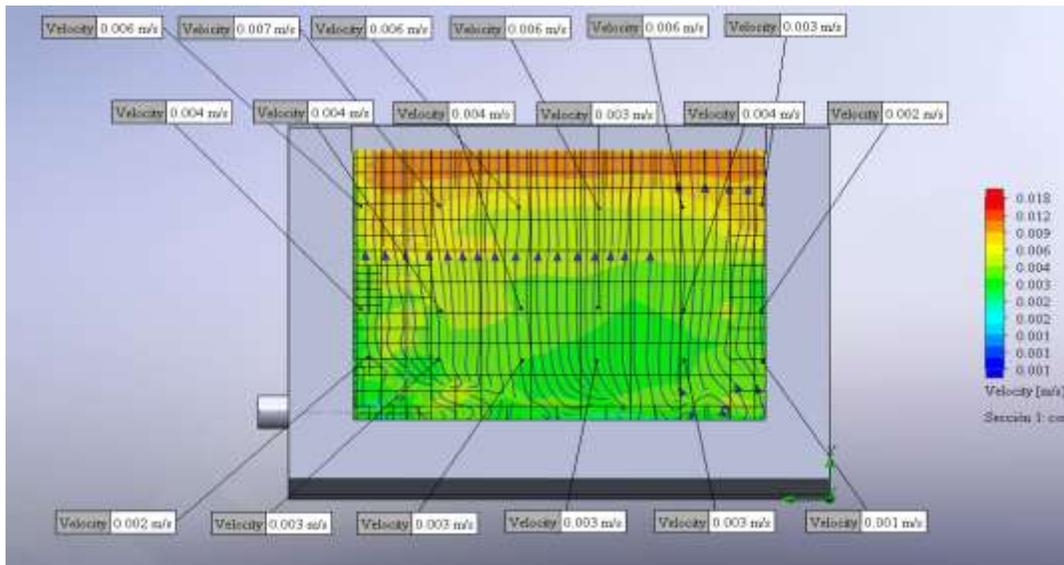
**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

Este modelo 3D del desarenador muestra las cuatro secciones clave que se mencionaron anteriormente, también otras cuatro secciones intermedias que ayudarán a ver el comportamiento del flujo. Estas secciones adicionales, o "puntos de control", son útiles para realizar mediciones de velocidad en diferentes puntos a lo largo del desarenador, lo que permite analizar en detalle el comportamiento del fluido. Contar con estas secciones de control a lo largo del desarenador proporcionará una visión integral del comportamiento del flujo, lo que permitirá optimizar el diseño y el funcionamiento.



**Figura 4.26 Sección 1- Punto de control de velocidades “X-Y-Z”.**

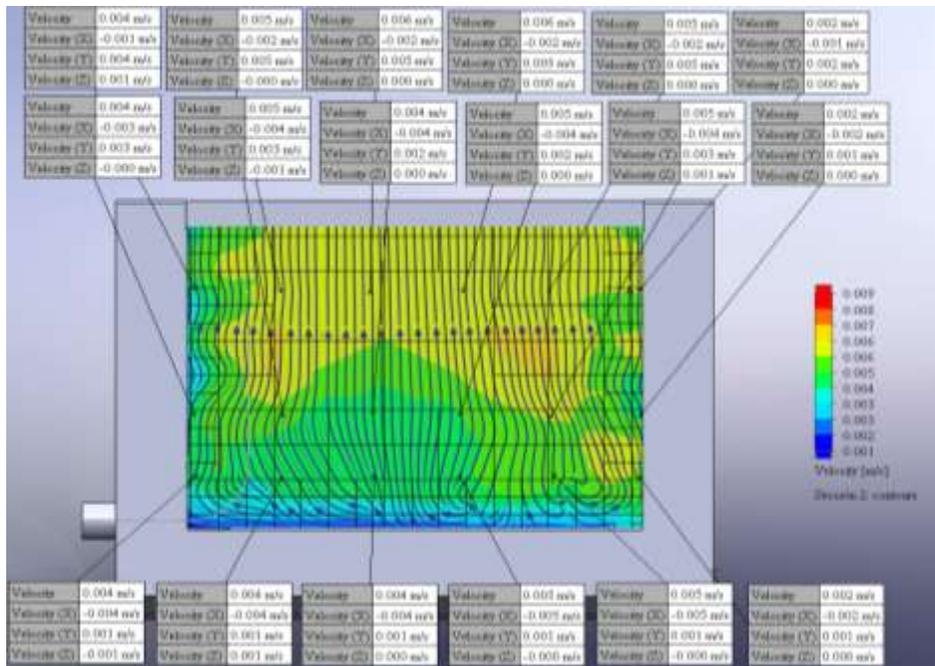
Fuente: Elaboración propia con ayuda de Solidworks.



**Figura 4.27 Sección 1 - Punto de control de velocidades.**

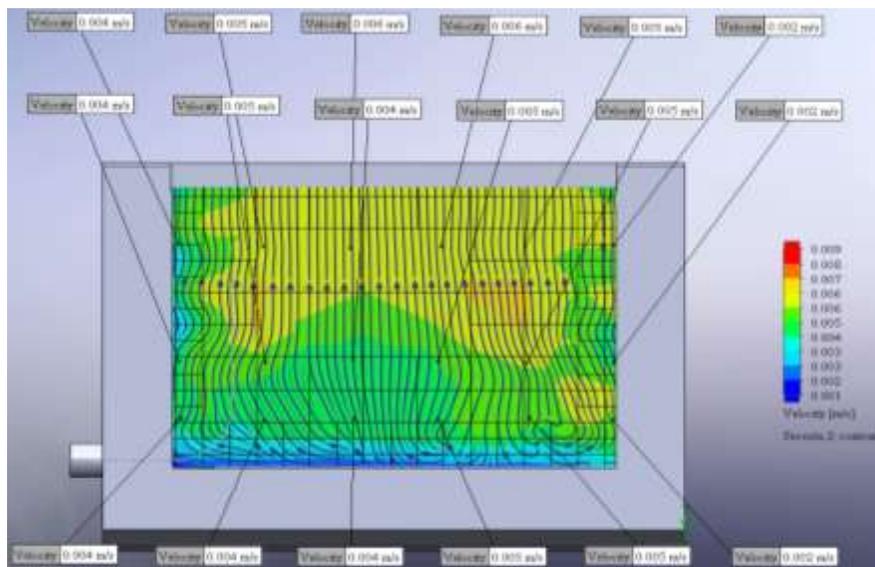
Fuente: Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

**Sección 1:** Ubicada próxima al canal recolector de salida, se observa que la velocidad no es uniforme, con valores máximos de 0,018 m/s y mínimos de 0,001 m/s. Las velocidades más altas se concentran en la superficie, donde se aprecia una leve aceleración debido al ingreso de agua al canal recolector. Los resultados muestran las componentes de velocidad en X, Y, Z y la velocidad total.



**Figura 4.28 Sección 2- Punto de control de velocidades “X-Y-Z”.**

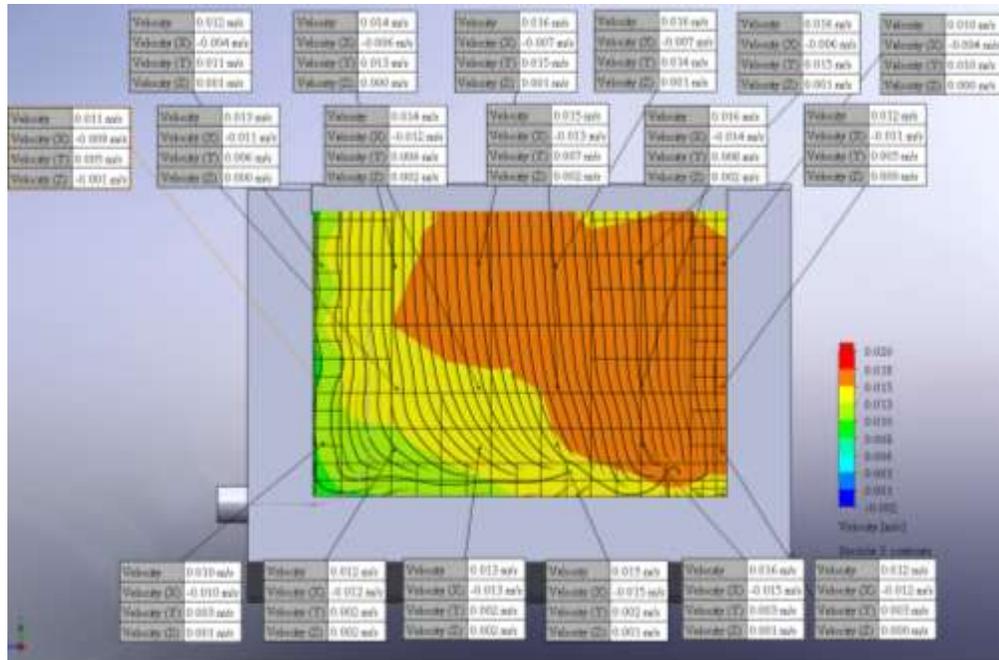
Fuente: Elaboración propia con ayuda de Solidworks.



**Figura 4.29 Sección 2 - Punto de control de velocidades.**

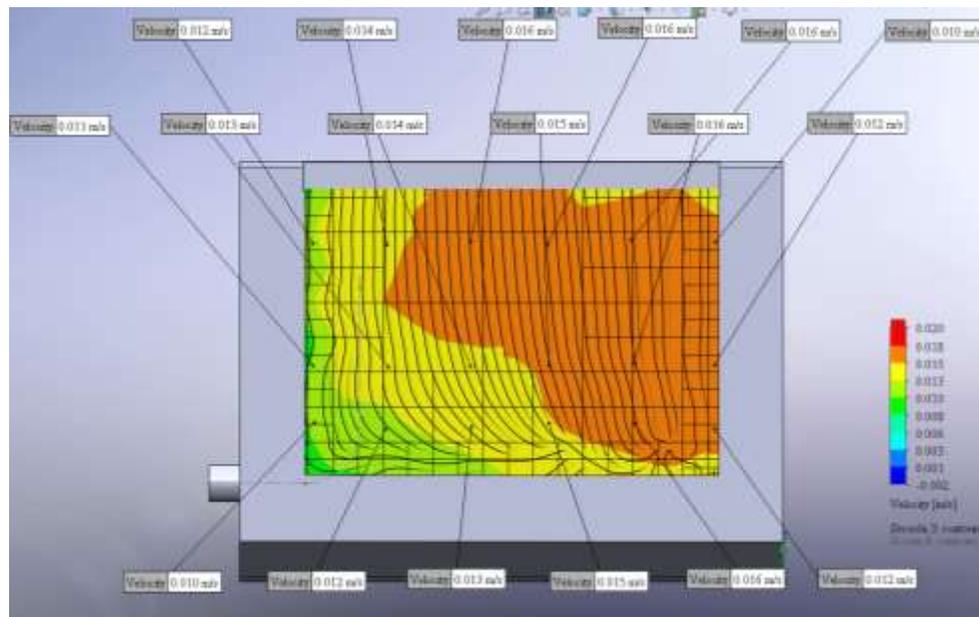
Fuente: Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

**Sección 2:** En esta sección, las velocidades más bajas se encuentran en las bases del desarenador, mientras que las más altas se localizan en las superficies. Además, se aprecia una leve aceleración en la parte inferior derecha, indicando que el flujo no se distribuye de manera uniforme.



**Figura 4.30 Sección 3 - Punto de control de velocidades “X-Y-Z”.**

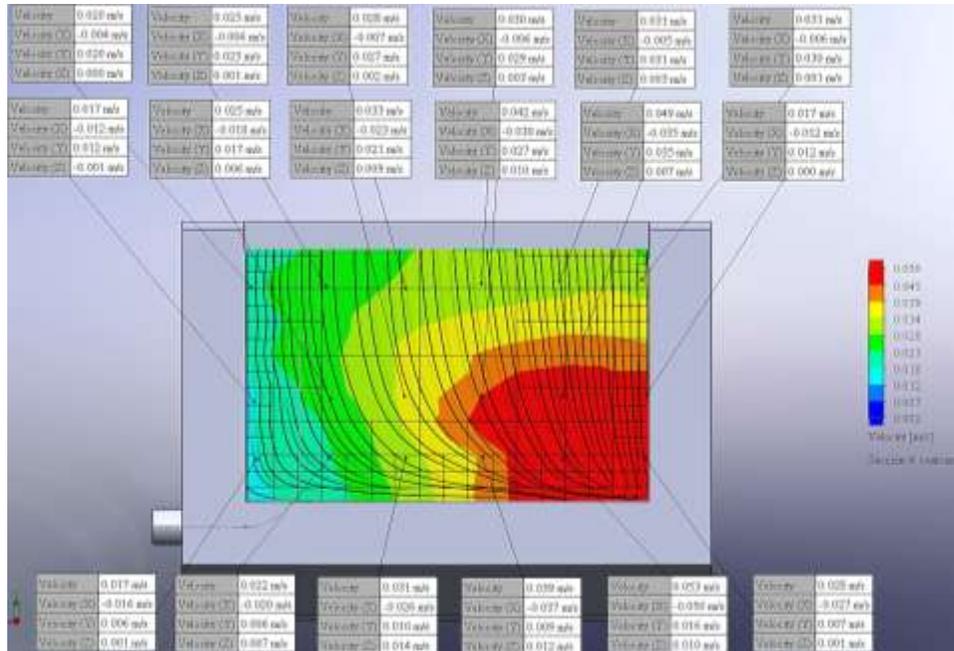
**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.



**Figura 4.31 Sección 3 - Punto de control de velocidades.**

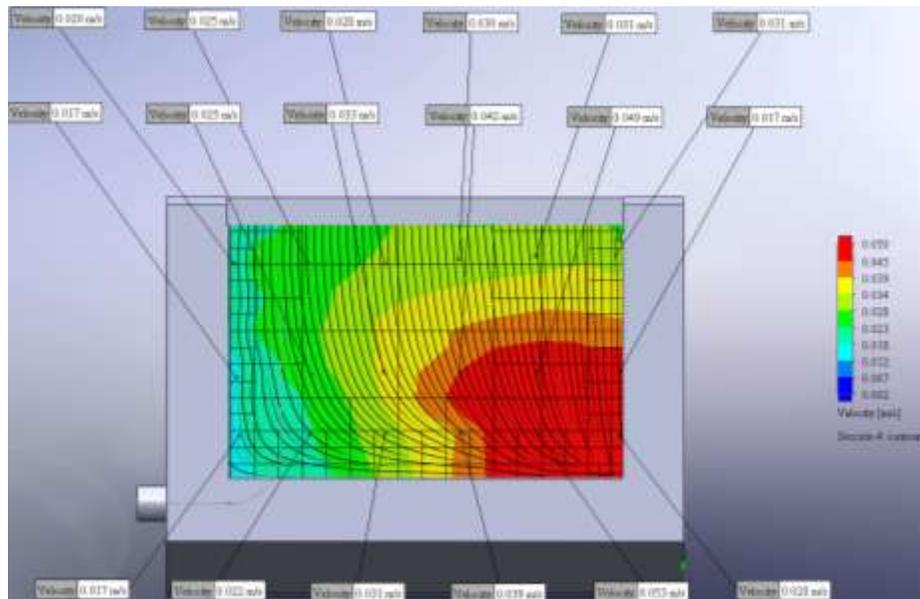
**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

Sección 3: La velocidad máxima alcanza los 0,020 m/s, con las velocidades más altas originándose en el margen derecho y parte de la superficie. Esto refuerza la idea de una distribución desigual del flujo en esta área.



**Figura 4.32 Sección 4 - Punto de control de velocidades “X-Y-Z”.**

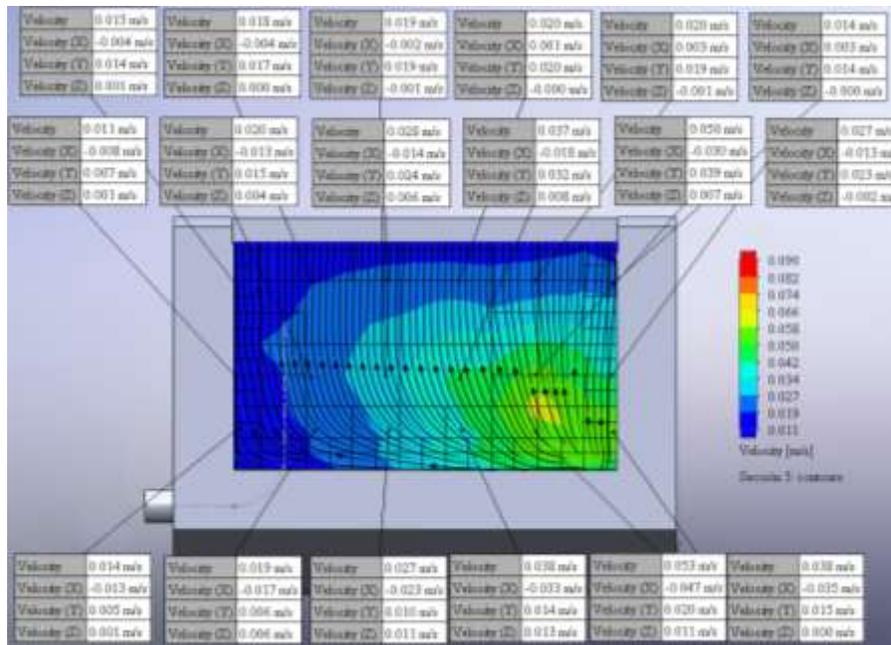
Fuente: Elaboración propia con ayuda de Solidworks.



**Figura 4.33 Sección 4 - Punto de control de velocidades.**

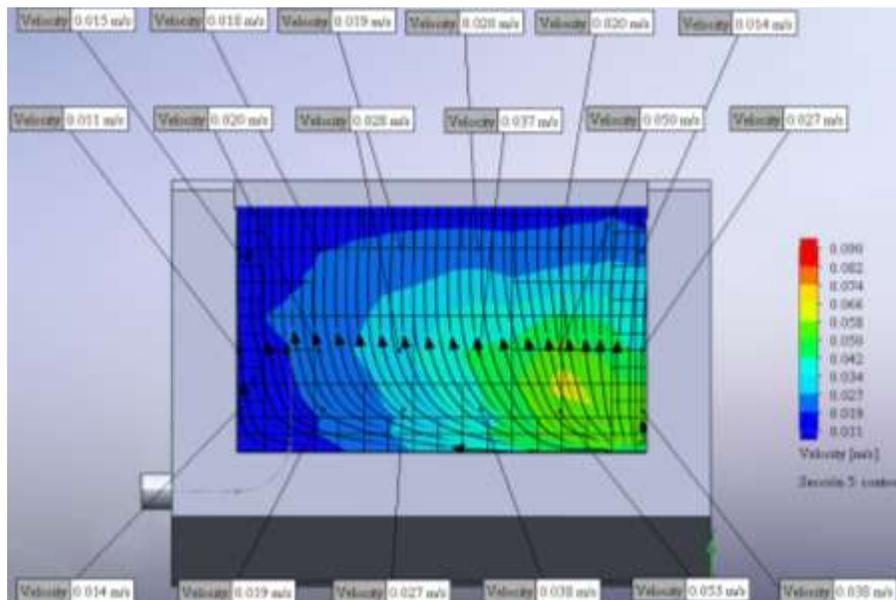
Fuente: Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

Sección 4: Presenta una velocidad máxima de 0,050 m/s. El margen inferior derecho concentra las velocidades más altas, mientras que las más bajas se presentan en el margen izquierdo y superior, manteniendo un patrón similar a las secciones previas.



**Figura 4.34 Sección 5 - Punto de control de velocidades “X-Y-Z”.**

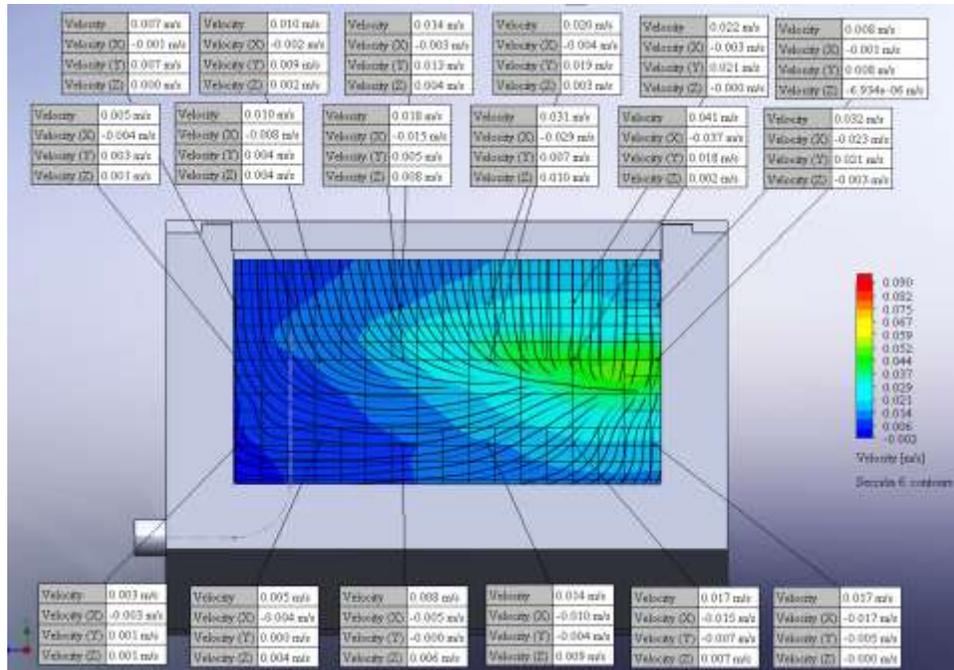
Fuente: Elaboración propia con ayuda de Solidworks.



**Figura 4.35 Sección 5 - Punto de control de velocidades.**

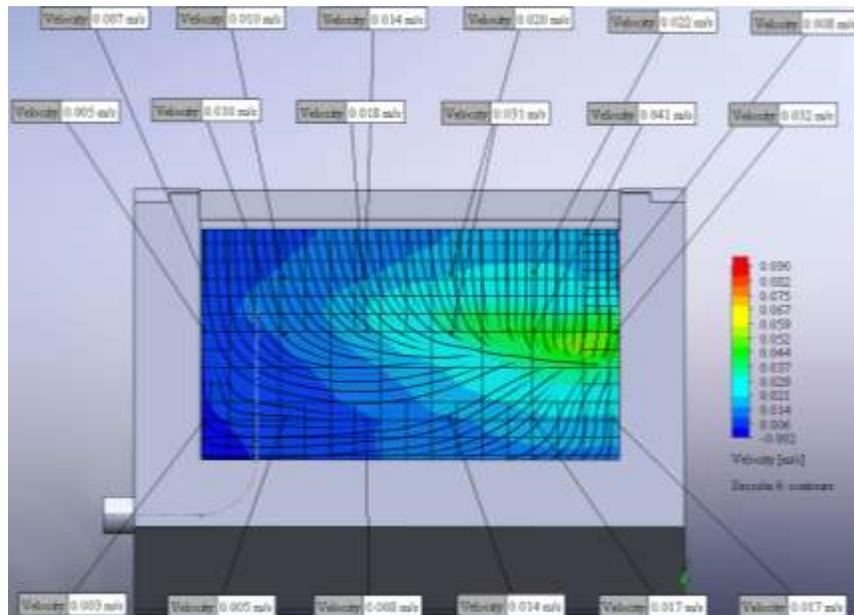
Fuente: Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

Sección 5: Se observa un patrón consistente con las secciones anteriores, donde las velocidades más altas se presentan en el margen inferior derecho y las más bajas en el margen izquierdo y superior.



**Figura 4.36 Sección 6 - Punto de control de velocidades “X-Y-Z”.**

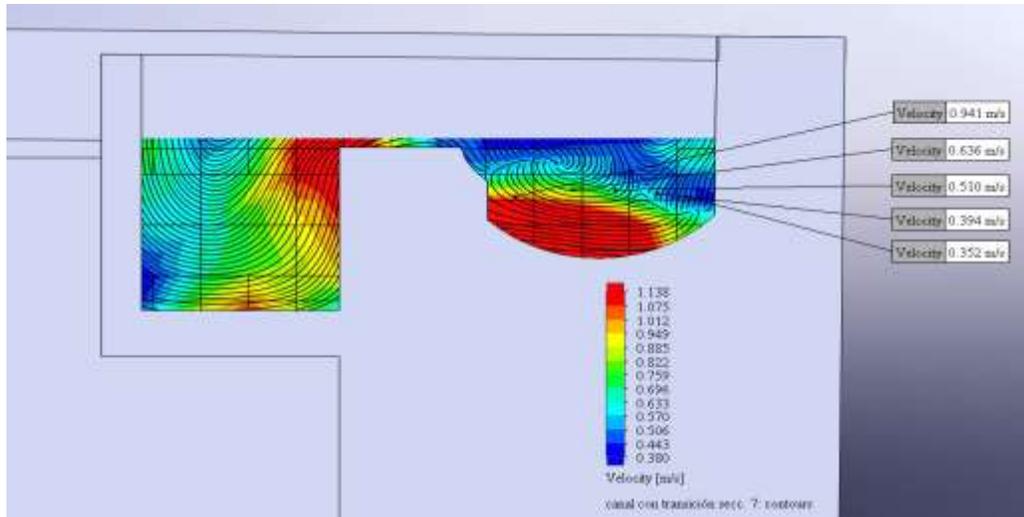
Fuente: Elaboración propia con ayuda de Solidworks.



**Figura 4.37 Sección 6 - Punto de control de velocidades.**

Fuente: Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

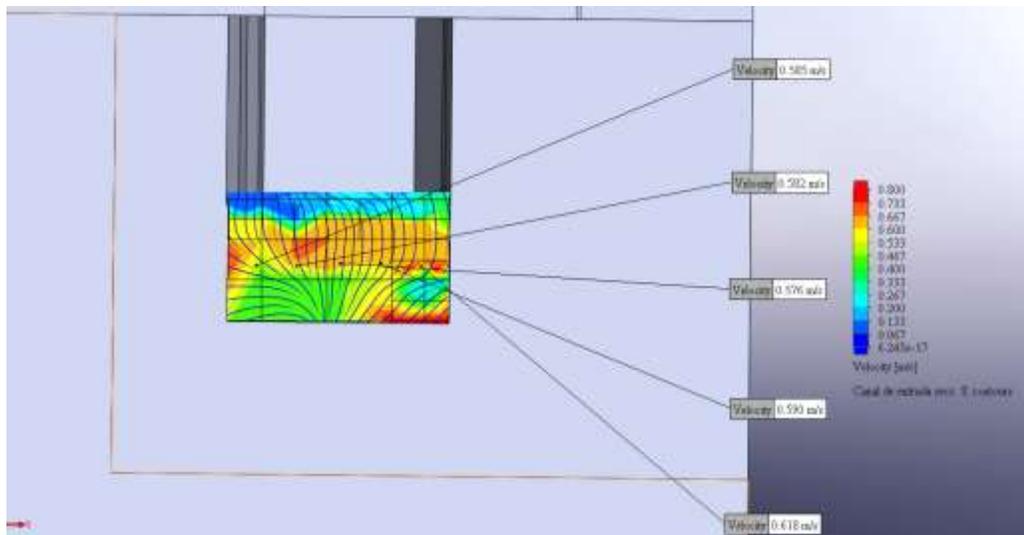
Sección 6: Próxima a los orificios de salida, las velocidades más altas se concentran en la zona media del margen derecho, mientras que las más bajas están en el margen izquierdo, manteniéndose la distribución desigual del flujo.



**Figura 4.38 Sección 7 - Punto de control de velocidades.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

Sección 7: En esta sección se tomaron cinco puntos de control, donde se evidencia que la base no es uniforme. Las velocidades más altas se encuentran en el margen izquierdo inferior, mientras que, en el margen derecho, cercano a la transición del canal colector, se observa una reducción de velocidades, confirmando la no uniformidad en la distribución.



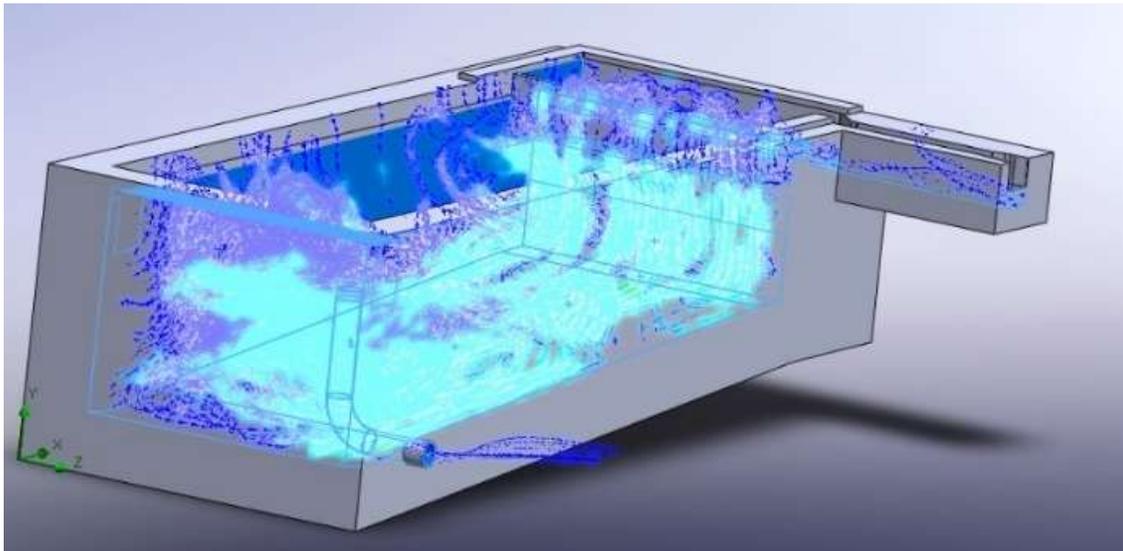
**Figura 4.39 Sección 8 - Punto de control de velocidades.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

Sección 8: Representa una zona más estable del canal, aunque la distribución de velocidades sigue siendo no uniforme. Las velocidades más bajas se encuentran en la superficie, mientras que, en la base, específicamente en el margen inferior derecho y cercano a la superficie, se identifica una leve aceleración.

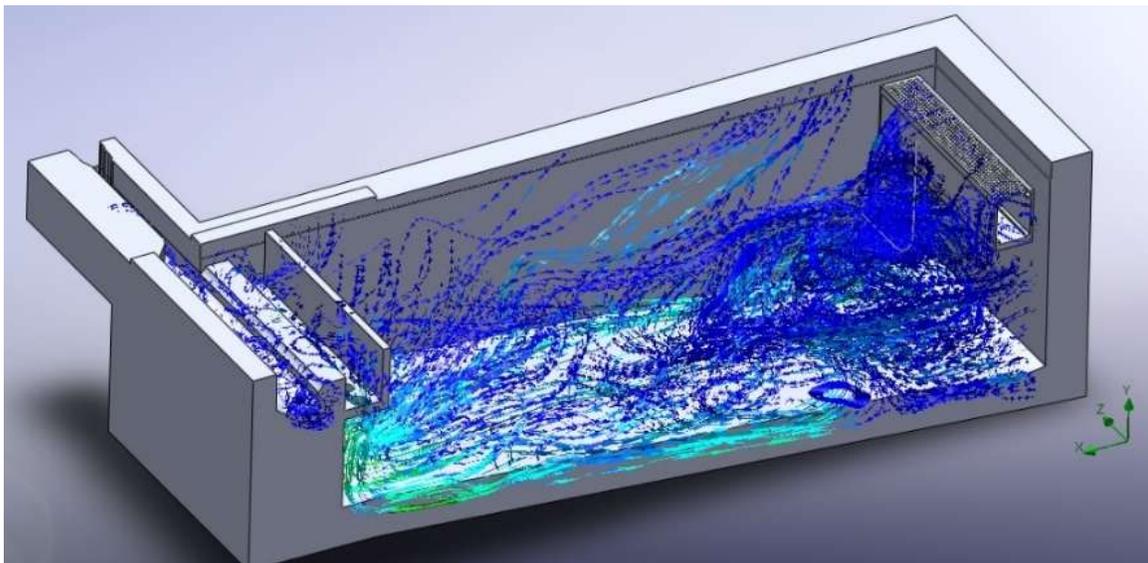
#### 4.3.7 Sentido de Flujo con Vista Tridimensional.

A pesar de operar con un caudal relativamente bajo de 93 l/s, el flujo exhibe un comportamiento no uniforme en su trayectoria. La simulación revela una distribución heterogénea del fluido, caracterizada por la formación de vórtices y patrones de recirculación, evidenciando la complejidad del fenómeno hidrodinámico incluso bajo condiciones de bajo caudal.



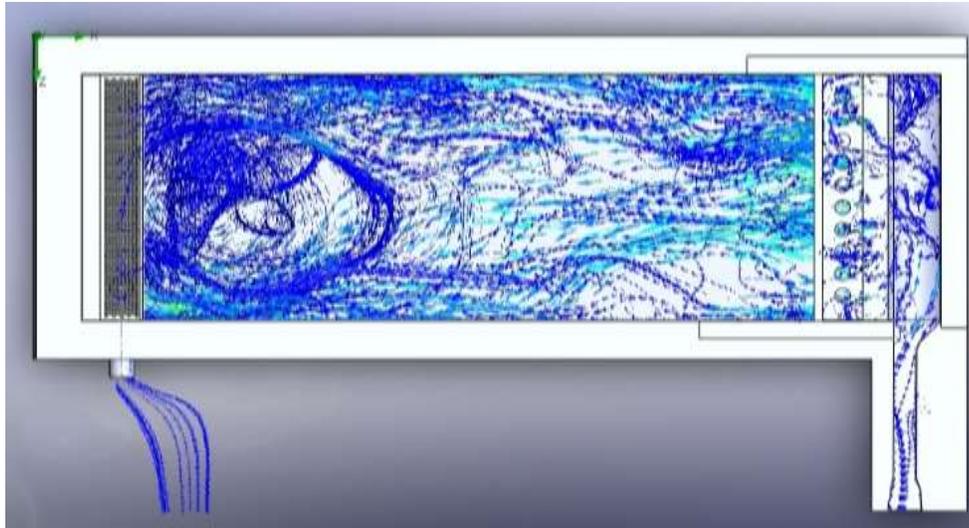
**Figura 4.40 Dirección de flujo en vista tridimensional.**

Fuente: Elaboración propia con ayuda de Solidworks.



**Figura 4.41 Dirección de flujo en corte longitudinal.**

Fuente: Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

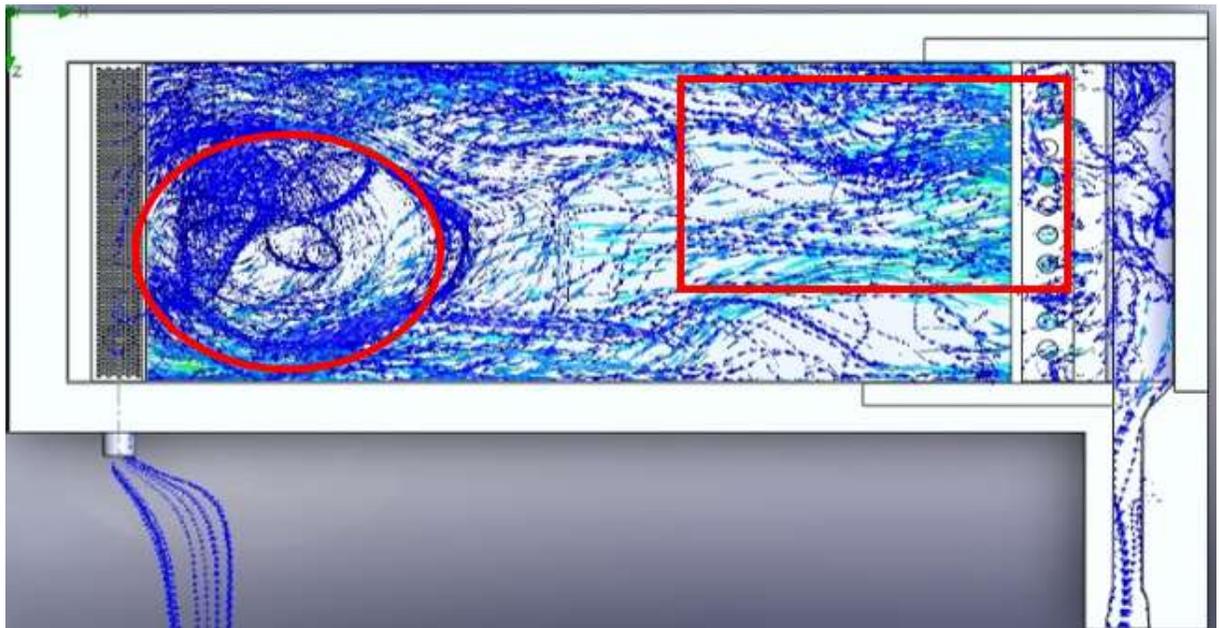


**Figura 4.42 Dirección de flujo con vista en planta.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

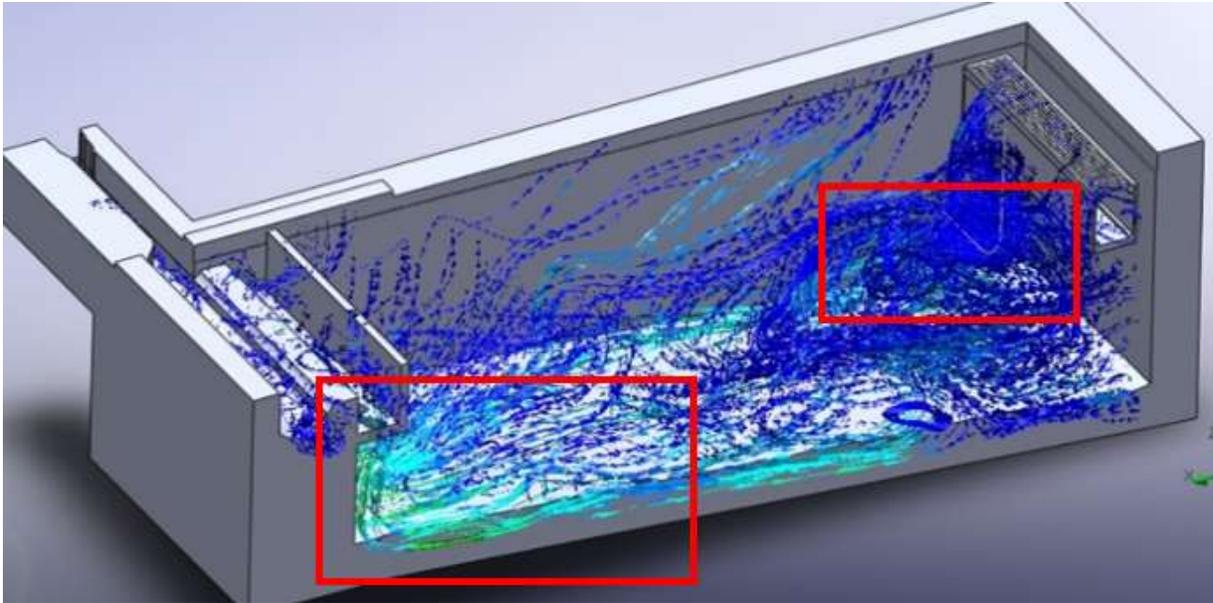
En la vista en planta se evidencian las trayectorias del flujo y el patrón de formación de remolinos en la zona de salida del desarenador, lo que permite comprender el comportamiento hidrodinámico del flujo. Específicamente, la visualización permite identificar las direcciones principales del escurrimiento, las zonas de recirculación y los puntos críticos donde se generan turbulencias, salida

#### 4.3.8 Identificación de Áreas de Mejora.



**Figura 4.43 Visualización de zonas de turbulencia en vista en planta.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.



**Figura 4.44 Visualización de turbulencia en zona de entrada debido a alta velocidad de salida.**

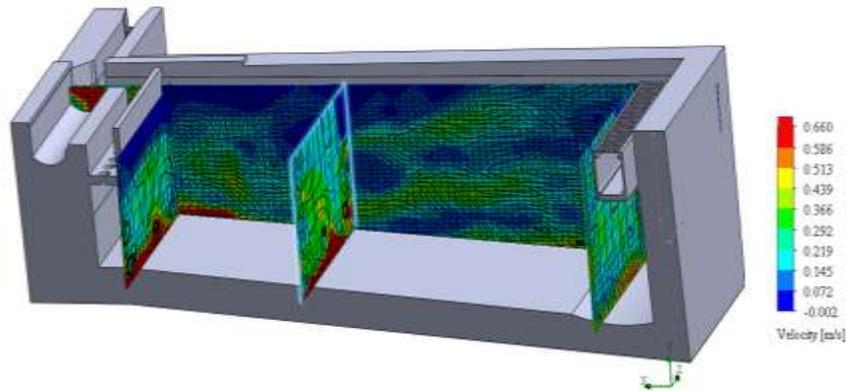
**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

Se puede apreciar que el flujo experimenta una aceleración localizada al atravesar los orificios debido a la reducción del área transversal. Esta configuración geométrica induce un incremento en la velocidad del fluido que, posteriormente, se manifiesta como un flujo preferencial de alta velocidad en la base del desarenador. La trayectoria de este flujo acelerado se orienta hacia el canal de salida, generando zonas de turbulencia significativa en su proximidad. Este comportamiento podría afectar la eficiencia del proceso de sedimentación y la uniformidad del flujo en la estructura."

#### **4.4 Simulación con Caudal de Diseño.**

La simulación a caudal de diseño de 160 l/s representa un análisis fundamental para comprender la dinámica hidráulica del desarenador bajo sus condiciones originales, permitiéndonos identificar zonas críticas, puntos de turbulencia y potenciales mejoras en su funcionamiento. Esta simulación nos revelará el comportamiento detallado del flujo, mostrando cómo se distribuyen las velocidades, dónde se generan posibles estancamientos o recirculaciones, y si el diseño actual cumple con su función. Al visualizar estos aspectos, obtendremos información para determinar si el desarenador funciona perfectamente o requiere modificaciones, proporcionando así un fundamento técnico sólido para el desarrollo de un nuevo diseño que optimice su rendimiento hidráulico.

#### 4.4.1 Distribución de Velocidades.



**Figura 4.45** desarenador con secciones de control.

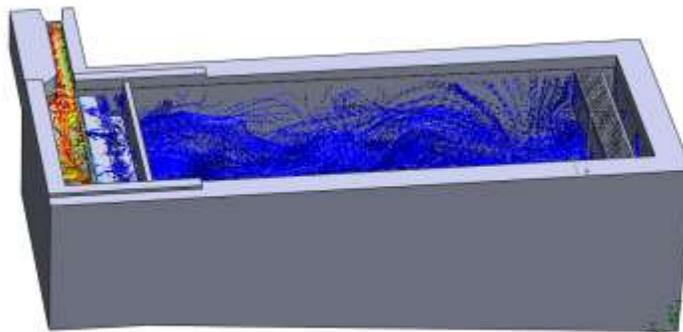
**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de solidworks.

El corte longitudinal del desarenador revela un complejo comportamiento hidrodinámico donde las velocidades experimentan transformaciones significativas a lo largo de su recorrido. El flujo presenta velocidades elevadas al ingresar por el canal de entrada, las cuales comienzan a disiparse en la zona de transición.

Esta transformación dinámica muestra cómo la velocidad experimenta cambios graduales. Al pasar por el rebose y dirigirse hacia los orificios, se observa una notable reducción de la velocidad. Las mayores velocidades se concentran inicialmente en la base del desarenador, atenuándose progresivamente a medida que el fluido avanza.

El proceso evidencia una disipación de energía efectiva y una distribución hidráulica adecuada dentro de la estructura, lo que permite una decantación eficiente de sedimentos y un control hidrodinámico óptimo del flujo.

#### 4.4.2 Comportamiento del Flujo Dentro del Desarenador.



**Figura 4.46** Dirección del flujo en el desarenador.

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

El flujo disipa su velocidad de manera sistemática a lo largo del desarenador, mostrando un patrón de reducción energética controlado. Esta disipación gradual permite una sedimentación eficiente, minimizando la turbulencia y facilitando la separación de partículas suspendidas.

El comportamiento del flujo refleja un diseño hidrodinámico que aprovecha las características físicas del desarenador para generar zonas de menor velocidad, fundamentales para los procesos de decantación y tratamiento del agua.

#### 4.5 Simulación en Condiciones de Capacidad Máxima del Canal.

La presente simulación se fundamenta en el análisis de los caudales medios mensuales y la producción anual del desarenador del sistema Rincón Vitoria, datos proporcionados por COSAALT que abarcan el período 2020-2024. Del análisis de los registros históricos se observa que el caudal máximo registrado corresponde a 339 l/s en febrero de 2020, por lo que se adopta este valor como caudal de diseño para la simulación, garantizando así que el análisis se realice bajo las condiciones más exigentes.

##### 4.5.1 Estimación de Caudal Máximo.

**Tabla: 9: Caudales medios mensuales.**

CAUDALES MEDIOS MENSUALES Y PRODUCCIÓN ANUAL (L/S) GESTIÓN 2020 COSAALT R.L.												
SISTEMAS	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
Rincon Vitoria (Desarenador)	337,13	338,98	332,86	332,82	316,68	286,74	171,09	140,15	133,03	140,59	121	271,83
CAUDALES MEDIOS MENSUALES Y PRODUCCIÓN ANUAL (L/S) GESTIÓN 2021 COSAALT R.L.												
SISTEMAS	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
Rincon Vitoria (Desarenador)	326,04	321,77	332,75	326,69	322,15	303,05	216,63	172,75	159,5	142,22	180,87	248,86
CAUDALES MEDIOS MENSUALES Y PRODUCCIÓN ANUAL (L/S) GESTIÓN 2022 COSAALT R.L.												
SISTEMAS	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
Rincon Vitoria (Desarenador)	315,66	317,81	320,85	313,82	308,09	228,63	182,07	148,27	112,99	141,72	119,22	243,43
CAUDALES MEDIOS MENSUALES Y PRODUCCIÓN ANUAL (L/S) GESTIÓN 2023 COSAALT R.L.												
SISTEMAS	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
Rincon Vitoria (Desarenador)	319,55	308,41	318,31	336,2	323,84	292,47	190,64	175,12	145,47	141,27	132,89	275,43
CAUDALES MEDIOS MENSUALES Y PRODUCCIÓN ANUAL (L/S) GESTIÓN 2024 COSAALT R.L.												
SISTEMAS	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
Rincon Vitoria (Desarenador)	315,6	313,62	315,06	318,55	325,63	279,8						

Fuente: COSAALT R.L.

Entre las gestiones 2020 y 2024, los caudales medios en litros por segundo (L/s) muestran un aumento significativo durante los meses de mayor demanda, que suele iniciar en agosto y

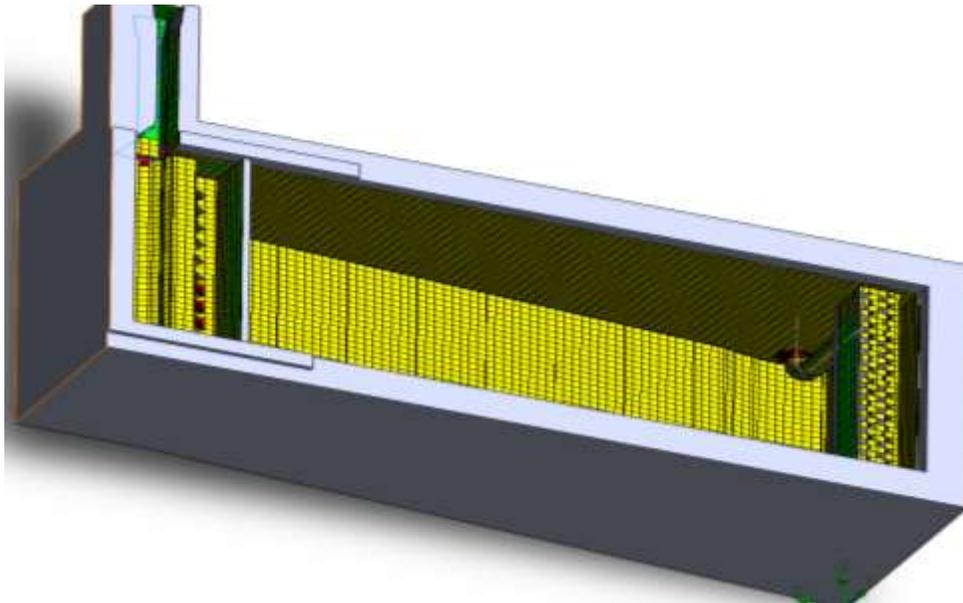
alcanzar picos hacia el final del año.

En 2020, el caudal medio en diciembre fue de 271,83 L/s, mientras que, en los primeros meses, como enero y febrero, los valores fueron de 337,10 y 339 L/s, respectivamente. Este comportamiento estacional se repite en los años siguientes, indicando que el sistema experimenta variaciones anuales consistentes en función de la demanda.

Es importante destacar que el valor máximo registrado en este periodo fue en febrero de 2020, con un caudal de 339 L/s, lo cual establece una referencia fundamental para el diseño.

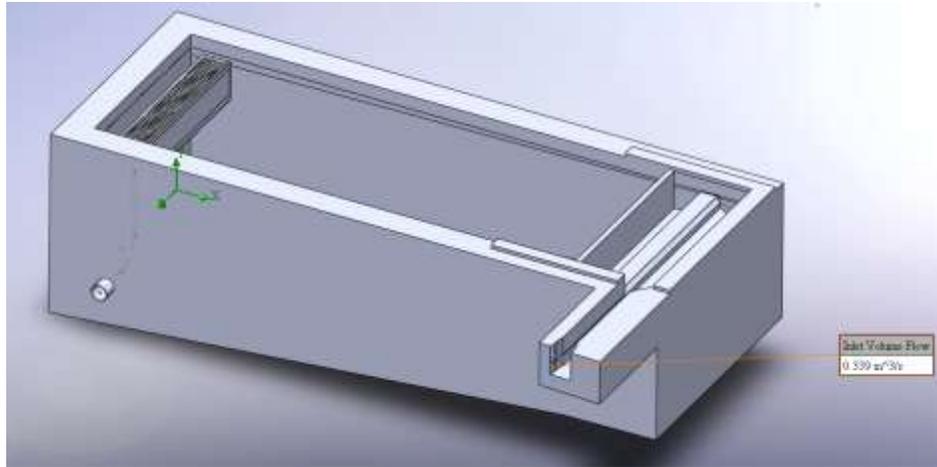
#### **4.5.2 Mallado y Puntos de Control.**

La resolución del mallado es directamente proporcional a la precisión del análisis numérico. Un mallado más fino proporciona una discretización más detallada del dominio computacional, lo que resulta en una simulación más precisa de los fenómenos hidrodinámicos. Sin embargo, este incremento en la densidad de la malla conlleva un aumento significativo en el tiempo de cálculo y en los recursos computacionales requeridos, estableciendo así un compromiso entre la precisión de los resultados y la eficiencia computacional.



**Figura 4.47 Mallado y refinamiento de mallado.**

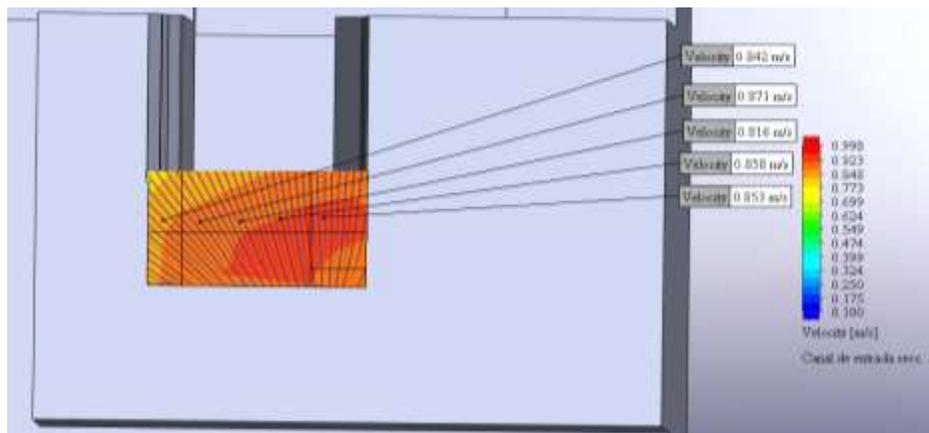
**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.



**Figura 4.48 Caudal de entrada.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

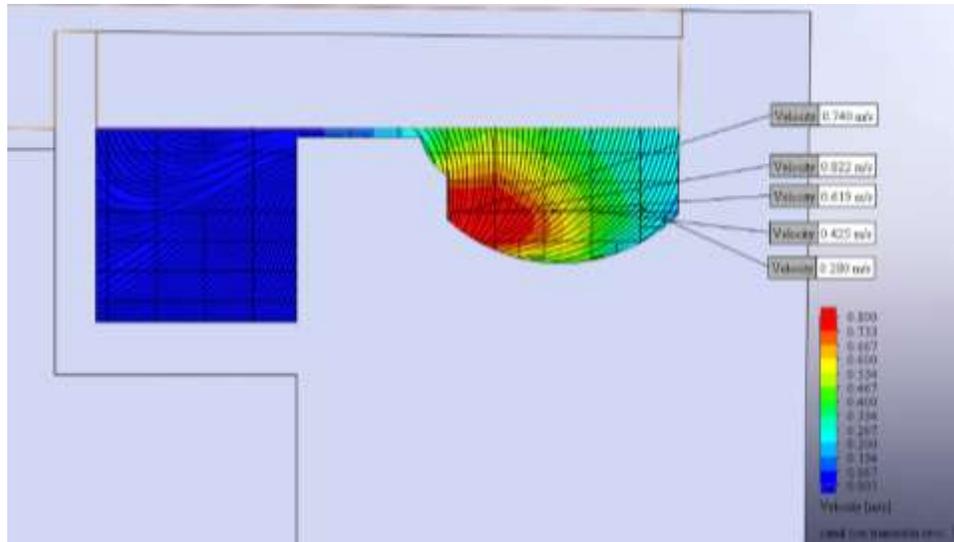
Se realizó una segunda simulación manteniendo la configuración geométrica y los ocho puntos de control establecidos en el análisis previo, modificando únicamente el caudal de entrada de 93 l/s (condiciones actuales) a 339 l/s (caudal máximo registrado en la Tabla 10). Los resultados evidencian un incremento significativo en las magnitudes de velocidad en todas las secciones de control. Este aumento en las velocidades es consecuencia directa del mayor caudal de operación, lo que modifica sustancialmente la hidrodinámica del sistema en comparación con las condiciones de operación actuales.



**Figura 4.49 Sección 8 - punto de control de velocidades.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

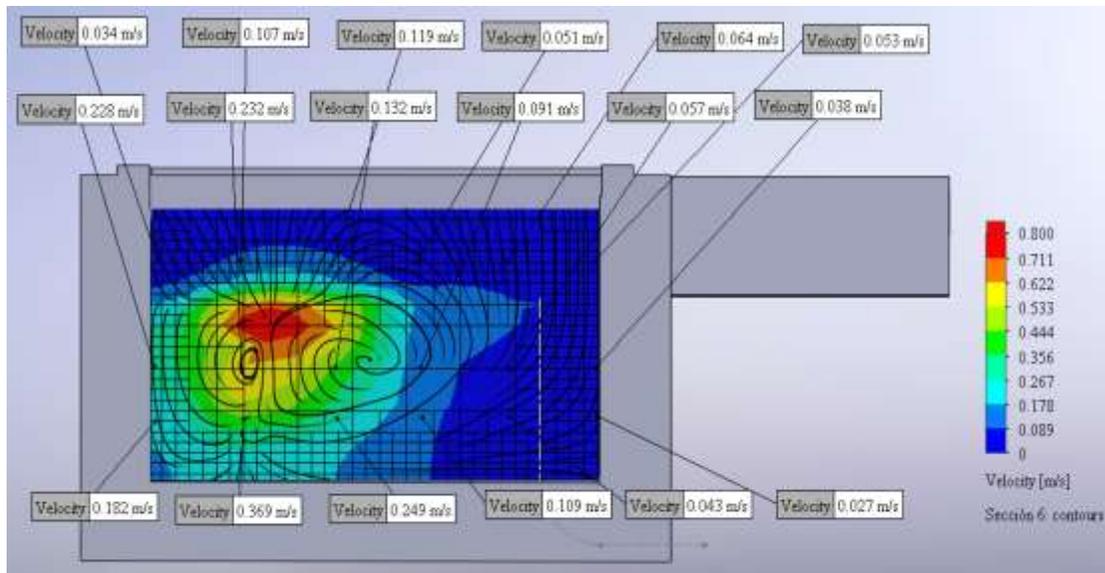
Sección 8: Esta sección corresponde a la entrada del desarenador. Se observa que las velocidades más altas están cerca del margen inferior derecho, mientras que las más bajas se encuentran en la superficie del margen izquierdo. Esto evidencia una distribución desigual del flujo desde el inicio.



**Figura 4.50 Sección 7 - punto de control de velocidades.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

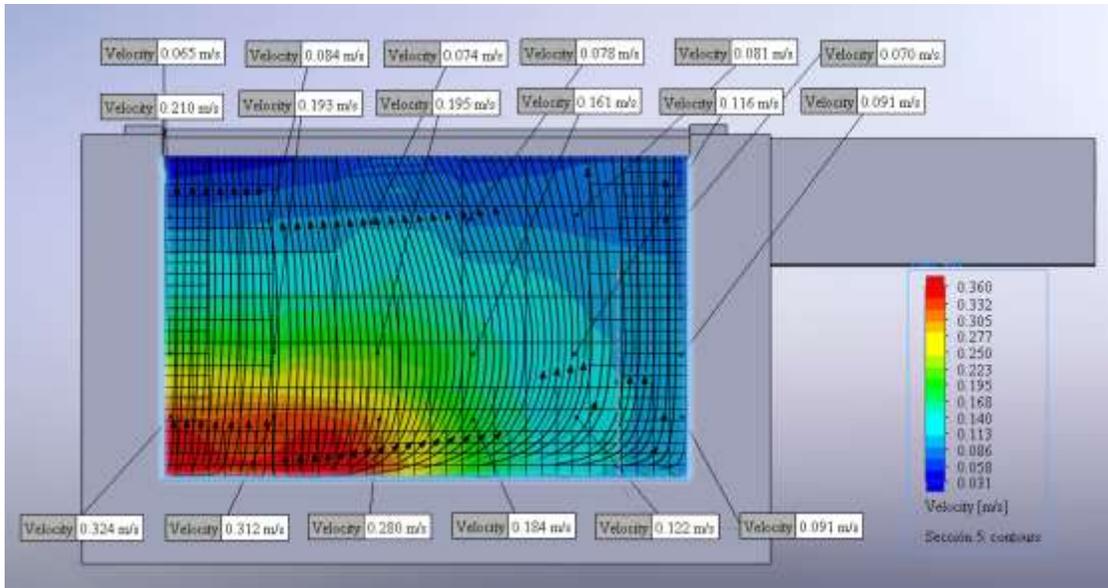
Sección 7: Ubicada en el canal que conecta al desarenador, presenta una base no uniforme. En el margen derecho, donde existe una transición, se aprecia una reducción de velocidad, mientras que, en el margen izquierdo, sin transición, se observa un aumento de velocidad. Esto indica un comportamiento asimétrico del flujo.



**Figura 4.51 Sección 6 - punto de control de velocidades.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

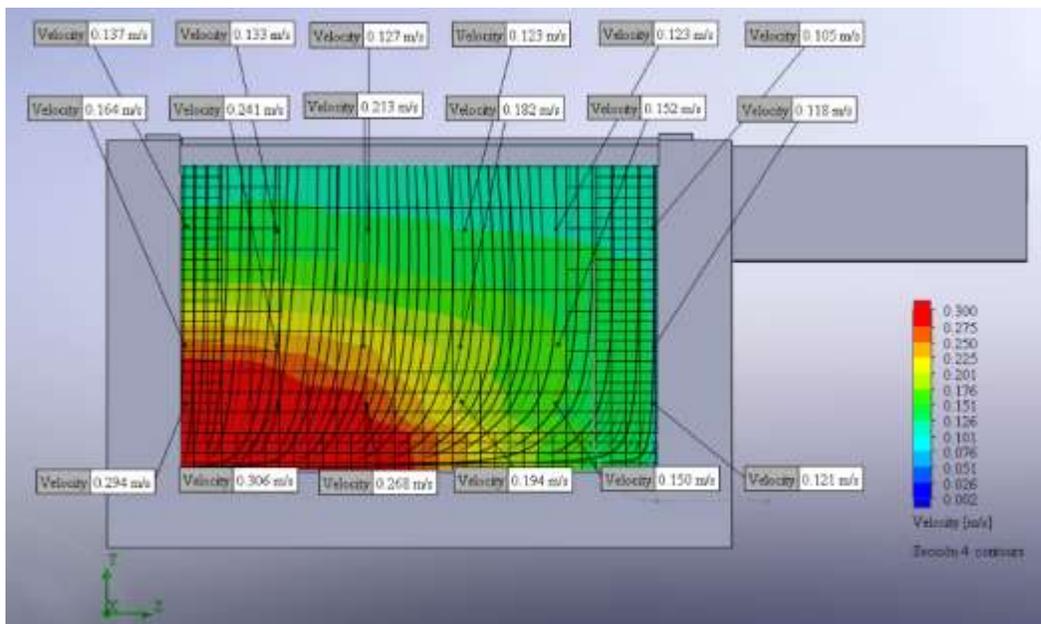
Sección 6: En esta sección, el flujo alcanza velocidades elevadas en la zona media del margen izquierdo. También se observan remolinos y turbulencias, mientras que las velocidades más bajas se localizan en el margen derecho.



**Figura 4.52 Sección 5 - punto de control de velocidades.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

Sección 5: Aquí se aprecia cómo el flujo desciende hacia la base del desarenador. Las velocidades más altas se concentran en el margen inferior izquierdo, mientras que las más bajas están en el margen superior (espejo de agua) y en el margen derecho, indicando una distribución no uniforme.

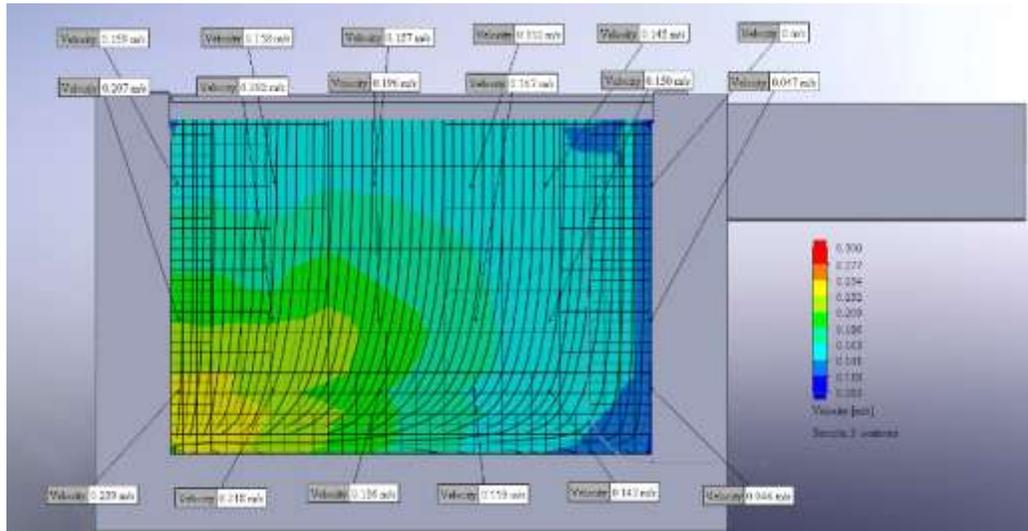


**Figura 4.53 Sección 4 - punto de control de velocidades.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

Sección 4: Mantiene un patrón similar al de la sección anterior. Sin embargo, las velocidades

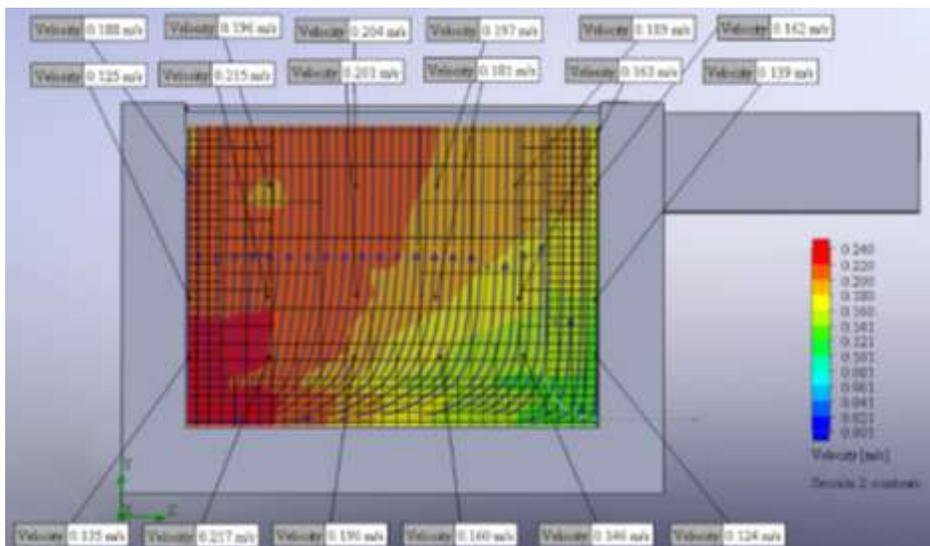
más bajas se concentran principalmente en la superficie (margen superior), lo que refuerza la tendencia de acumulación de velocidades lentas en esta área.



**Figura 4.54 Sección 3 - punto de control de velocidades.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

Sección 3: En esta sección, las velocidades más bajas se localizan en el margen derecho y en una fracción de la base, mientras que las velocidades más altas están en el margen inferior izquierdo. Esto indica un flujo con una tendencia predominante hacia la izquierda.

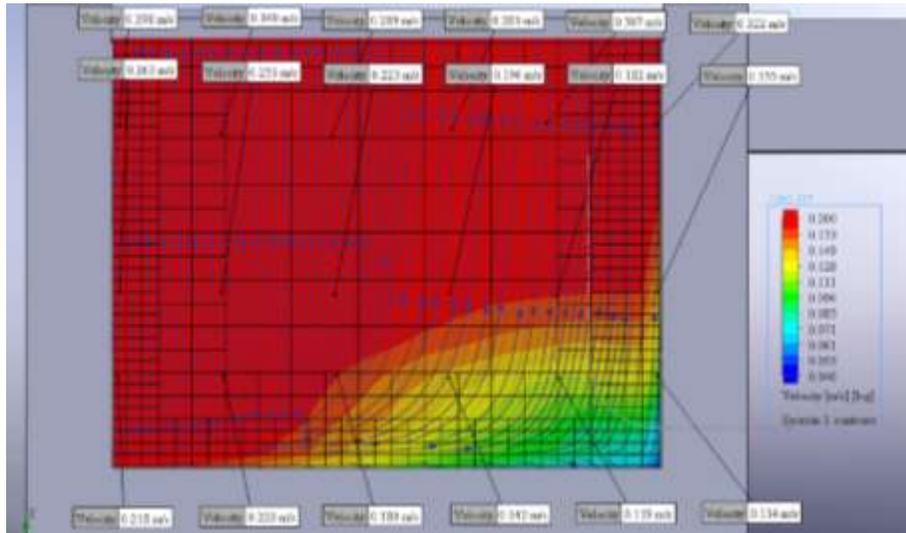


**Figura 4.55 Sección 2 - punto de control de velocidades.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

Sección 2: Situada a pocos metros del canal colector, se observa un cambio en la dirección del flujo. Las velocidades más altas se concentran en el margen inferior izquierdo, con una leve

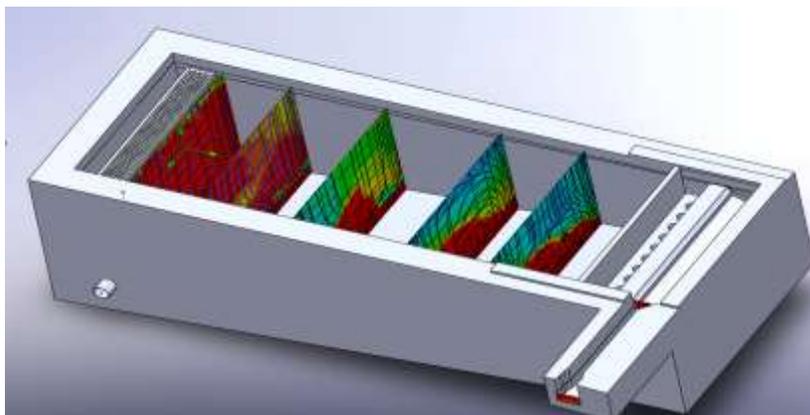
disminución hacia la superficie, aunque aún se mantiene elevada, las velocidades más bajas se encuentran en el margen inferior derecho, con una ligera aceleración hacia la superficie.



**Figura 4.56 Sección 1 - punto de control de velocidades.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

Sección 1: Próxima al canal recolector de salida, el flujo presenta velocidades elevadas en gran parte de la sección. Sin embargo, debido a las distintas direcciones del flujo, se generan turbulencias en la zona media, con una tendencia a subir hacia la superficie.



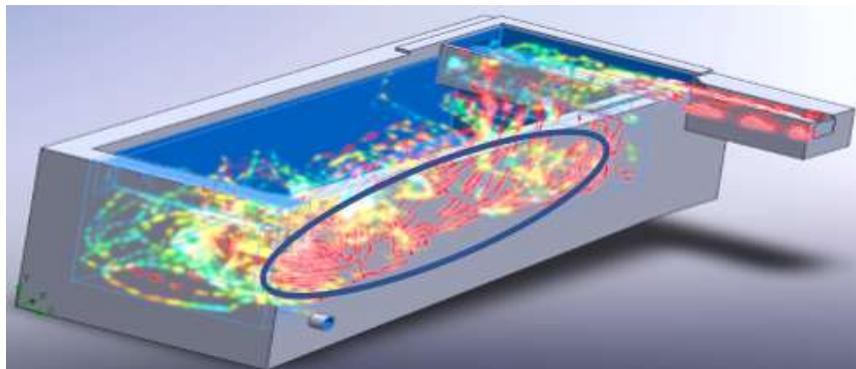
**Figura 4.57 Desarenador en vista tridimensional con secciones de control.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

En esta gráfica se aprecia el patrón general del flujo, donde este tiende a desplazarse por la base y luego asciende hacia la superficie de manera no uniforme. Se identifican zonas con cambios de dirección, turbulencia, remolinos y vórtices, evidenciando la complejidad del comportamiento del flujo a caudal máximo.

### 4.5.3 Identificación de Áreas de Mejora.

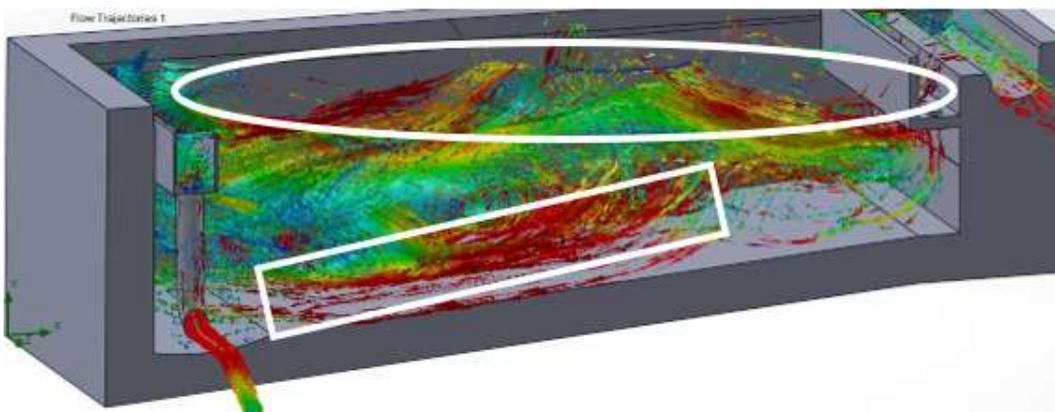
La visualización desde múltiples perspectivas (vista en planta, corte longitudinal y representación tridimensional) revela patrones hidrodinámicos críticos. Particularmente, se identifica una zona de alta velocidad en la base del desarenador, fenómeno que compromete significativamente el proceso de sedimentación. Este comportamiento del flujo genera dos efectos adversos principales: primero, la velocidad elevada en la zona inferior impide la correcta deposición de partículas suspendidas y, segundo, induce la formación de regiones de turbulencia considerable en la proximidad del canal de salida. Estas condiciones hidrodinámicas desfavorables podrían reducir sustancialmente la eficiencia del proceso de desarenación.



**Figura 4.58 Vista tridimensional del sentido del flujo.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

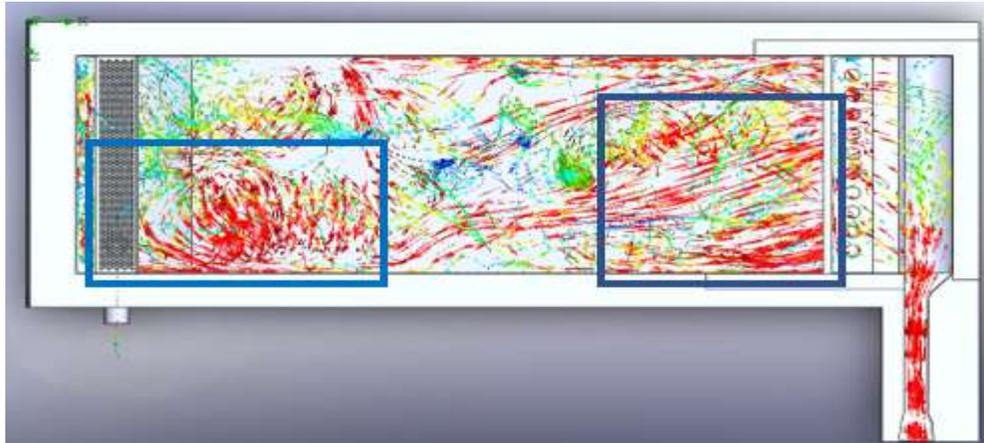
Se observa cómo el flujo se desplaza en distintas direcciones a lo largo del desarenador, proporcionando una representación clara de las trayectorias y comportamientos del agua. Esto permite identificar patrones, como turbulencias, áreas de estancamiento y la distribución de velocidades, facilitando un análisis detallado del desempeño hidráulico del sistema.



**Figura 4.59 Vista de sentido de flujo en corte longitudinal.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

En esta representación, se ha incrementado la cantidad de flechas que indican la dirección del flujo, logrando una visualización más detallada y clara del comportamiento hidráulico. Este enfoque resalta las dinámicas del flujo, incluyendo zonas de recirculación, áreas de mayor velocidad



**Figura 4.60 Vista en planta de dirección de flujo.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

Esta perspectiva permite observar cómo el flujo mantiene un patrón característico de turbulencia cerca de la tubería de salida. En esta zona, el flujo se desplaza hacia la base y colisiona con la tubería, generando movimientos complejos que podrían afectar la eficiencia del desarenador.

## 5. Análisis e Interpretación de Resultados.

El análisis de la información recopilada y los resultados obtenidos muestra varios aspectos importantes sobre el funcionamiento del desarenador. En cuanto a los datos proporcionados por COSAALT para la elaboración del presente trabajo, estos no fueron suficientes, por lo que fue necesario realizar mediciones de velocidad con equipamiento moderno que permitió medir velocidades de toda magnitud y en todo el volumen ocupado por el agua.

Respecto al aforo con molinete electromagnético OTT MF pro, este arrojó un caudal de 93 L/s, que según los técnicos de COSAALT, es inferior al valor de diseño del desarenador, pero representa un caudal que se presenta habitualmente y merece ser analizado. Las mediciones evidenciaron velocidades bastante bajas, con una media de 0,01 m/s. En las secciones transversales, la velocidad más alta se presenta en el medio de la estructura, a 0,6 del tirante, mientras que las velocidades más bajas se registran en la superficie y en el fondo. El equipo registró velocidades negativas, lo que se interpreta como la existencia de velocidades en sentido contrario al flujo.

**Velocidades leídas in situ con ayuda de molinete, caudal de entrada 93 l/s.**

**Tabla: 10: Velocidades leídas con el molinete electromagnético OTT MF pro.**

VELOCIDADES LEÍDAS EN DESARENADOR CON EL MOLINETE "Q = 93 L/S"							
Tirante "y"	3,05m	SECCIÓN 1					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad leída en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,61	0,08	0,005	0,004	0,006	0,009	0,007
0,6 y	1,83	0,01	0,012	0,003	0,007	0,006	0,002
0,8 y	2,44	0,024	0,008	0,003	0,003	0,007	0,09
Tirante "y"	2,73m	SECCIÓN 2					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad leída en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,546	0,001	0,003	0,005	0,003	0,005	0,008
0,6 y	1,638	0,016	0,004	0,005	0,004	0,004	0,054
0,8 y	2,184	0,011	0,002	0,003	0,003	0,005	0,157
Tirante "y"	3,05m	SECCIÓN 3					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad leída en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					

		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,61	0,009	0,004	0,018	0,012	0,01	0,008
0,6 y	1,83	0,017	0,006	0,027	0,001	0,011	0,019
0,8 y	2,44	0,018	0,011	0,011	0,016	0,016	0,018
Tirante "y"	2,68m	SECCIÓN 4					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad letrurada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,536	0,02	0,014	0,009	0,028	0,017	0,02
0,6 y	1,608	0,032	0,009	0,022	0,007	0,006	0,014
0,8 y	2,144	0,032	0,014	0,033	0,055	0,068	0,014
Tirante "y"	2,625m	SECCIÓN 5					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad letrurada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,525	0,023	0,006	0,013	0,017	0,028	0,008
0,6 y	1,575	0,025	0,003	0,026	0,019	0,02	0,018
0,8 y	2,1	0,011	0,009	0,011	0,02	0,089	0,04
Tirante "y"	2,56m	SECCIÓN 6					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad letrurada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,512	0,004	0,008	0,008	0,014	0,015	0,011
0,6 y	1,536	0,015	0,006	0,021	0,013	0,021	0,011
0,8 y	2,048	0,01	0,014	0,017	0,03	0,02	0,014
Tirante "y"	0,27m	SECCIÓN DE ENTRADA CON TRANSICIÓN "85cm"					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	
		0,14 m	0,28 m	0,42 m	0,56 m	0,71 m	
Profundidad (m)		velocidad letrurada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	
0,6 y	0,162	1,107	0,672	0,496	0,426	0,115	
Tirante "y"	0,33m	CANAL DE ENTRADA "60cm"					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	
		0,10 m	0,20 m	0,30 m	0,40 m	0,50 m	
Profundidad (m)		velocidad letrurada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	
0,6 y	0,198	0,673	0,742	0,652	0,492	0,419	

Fuente: Elaboracion propia.

Analizando el sentido del flujo en las 6 secciones estudiadas, observando los puntos medios se

puede describir que al inicio se presenta una velocidad baja de 0,021 m/s, en la sección 5 sube a 0,026 m/s, en la sección 4 presenta 0,022 m/s, en la sección 3 se tiene 0,027 m/s, mientras que en las secciones 1 y 2 no se registró velocidad por ser muy bajas. En el sentido del flujo no se identifica un patrón que indique que la velocidad va en aumento o descenso, pero sí se presentan velocidades negativas que asumimos corresponden a velocidades en sentido diferente al del flujo.

Las velocidades revelan un patrón de flujo complejo caracterizado por la presencia de velocidades negativas en múltiples secciones, lo que indica la formación de zonas de recirculación y vórtices. Este comportamiento demuestra que el fluido no sigue una trayectoria unidireccional, sino que desarrolla un movimiento tridimensional con corrientes secundarias.

La presencia de velocidades negativas sugiere la formación de zonas de recirculación, posible existencia de flujo turbulento y patrones de mezclado complejos en las distintas secciones.

Se observa en la Tabla 12, los datos de la simulación computacional realizada bajo condiciones controladas ( $Q = 93$  l/s) y manteniendo las mismas secciones de aforo, evidencia estas variaciones del flujo.

**Velocidades recolectadas de la simulación en las secciones tomadas en cuenta durante el aforo con el molinete electromagnético OTT MF pro, caudal de simulación 93 l/s.**

**Tabla: 11: Velocidades leídas en la simulación con un caudal 93 l/s.**

VELOCIDADES DE SIMULACIÓN EN DESARENADOR "Q = 93 L/S"							
Tirante "y"	3,05m	SECCIÓN 1					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad leída en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,61	0,006	0,007	0,006	0,006	0,006	0,003
0,6 y	1,83	0,004	0,004	0,004	0,003	0,004	0,002
0,8 y	2,44	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,001
Tirante "y"	2,73m	SECCIÓN 2					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad leída en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,546	0,004	0,005	0,006	0,006	0,005	0,002
0,6 y	1,638	0,004	0,005	0,004	0,005	0,005	0,002

0,8 y	2,184	0,004	0,004	0,004	0,005	0,005	0,002
Tirante "y"	3,05m	SECCIÓN 3					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad letrada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,61	0,015	0,014	0,016	0,016	0,016	0,01
0,6 y	1,83	0,011	0,013	0,015	0,015	0,016	0,012
0,8 y	2,44	0,01	0,012	0,013	0,015	0,016	0,012
Tirante "y"	2,68m	SECCIÓN 4					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad letrada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,536	0,02	0,025	0,028	0,03	0,031	0,031
0,6 y	1,608	0,017	0,025	0,033	0,042	0,049	0,017
0,8 y	2,144	0,017	0,022	0,031	0,039	0,053	0,028
Tirante "y"	2,625m	SECCIÓN 5					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad letrada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,525	0,015	0,018	0,019	0,02	0,02	0,014
0,6 y	1,575	0,011	0,02	0,028	0,037	0,05	0,027
0,8 y	2,1	0,014	0,019	0,027	0,038	0,053	0,038
Tirante "y"	2,56m	SECCIÓN 6					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad letrada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,512	0,007	0,01	0,014	0,02	0,022	0,008
0,6 y	1,536	0,005	0,01	0,018	0,031	0,041	0,032
0,8 y	2,048	0,003	0,005	0,008	0,014	0,017	0,017
Tirante "y"	0,27m	SECCIÓN DE ENTRADA CON TRANSICIÓN "85cm"					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	
		0,14 m	0,28 m	0,42 m	0,56 m	0,71 m	
Profundidad (m)		velocidad letrada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	

0,6 y	0,162	0,941	0,636	0,51	0,394	0,352
Tirante "y"	0,33m	CANAL DE ENTRADA "60cm"				
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5
		0,10 m	0,20 m	0,30 m	0,40 m	0,50 m
Profundidad (m)		velocidad letrada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad				
		1	2	3	4	5
0,6 y	0,198	0,585	0,582	0,576	0,59	0,618

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de velocidades obtenidos mediante simulación con el software Solidworks para el caudal de 93 l/s muestran en las gráficas de velocidades por secciones una gran variación de la velocidad en el interior del volumen de agua. Las velocidades más altas no se ubican en una sola zona - al inicio del flujo las velocidades más altas (representadas con color rojo) se ubican en el margen derecho, mientras que las velocidades más lentas se presentan en el lado izquierdo. Según avanza el flujo esta situación cambia con tendencia a que la velocidad mayor se presente en la superficie, como se puede apreciar en las secciones 1 y 2. En casi todas las secciones las velocidades bajas y medias se presentan en el fondo.

Analizando en el sentido del flujo, al inicio en las secciones 5 y 6 las velocidades son bajas, en las secciones intermedias 3 y 4 se presentan las velocidades más altas, luego cercano a la salida del agua en las secciones 5 y 6 las velocidades son más lentas. En las gráficas de la simulación de velocidades se puede apreciar la existencia de líneas de flujo en varias direcciones, lo cual no se esperaba, ya que visualmente el agua parece muy calmada.

**Tabla: 12: Análisis comparativo.**

ANÁLISIS COMPARATIVO DE VELOCIDADES				
(Valores seleccionados más representativos)				
SECCIÓN 1- CANAL DE SALIDA				
Profundidad	Posición	V.Experimental	V.Simulación	% Variación
0,2y	2m	0,004	0,006	15,3%
0,6y	3m	0,007	0,003	18,2%
0,8y	2m	0,008	0,003	22,4%
SECCIÓN 2				
Profundidad	Posición	V.Experimental	V.Simulación	% Variación
0,2y	3m	0,003	0,006	16,8%
0,6y	2m	0,004	0,005	20,1%
0,8y	4m	0,005	0,005	12,4%
SECCIÓN 3				

Profundidad	Posición	V.Experimental	V.Simulación	% Variación
0,2y	4m	0,012	0,016	35,2%
0,6y	5m	0,011	0,016	21,8%
0,8y	2m	0,011	0,012	27,5%
SECCIONES DE ENTRADA				
Sección	Posición	V.Experimental	V.Simulación	% Variación
Entrada con transición	0,28m	0,672	0,636	15,2%
Canal principal	0,30m	0,652	0,576	18,7%

**Fuente:** Elaboración propia.

Los resultados obtenidos mediante la simulación (CFD) en Solidworks Flow Simulation muestran una correlación aceptable con las mediciones experimentales realizadas con el molinete electromagnético OTT MF pro. Las variaciones observadas se encuentran dentro de rangos esperados para este tipo de análisis hidráulico, considerando:

Las zonas de recirculación detectadas experimentalmente son correctamente predichas por la simulación en ubicación, aunque con diferencias en magnitud.

Las secciones de entrada y canal de entrada muestran variaciones menores al 40%, lo cual es buena para validación.

Las variaciones más significativas (40-55%) se presentan en zonas de alta turbulencia y cerca de las paredes, lo cual es común en simulaciones (CFD).

El patrón general de flujo y las tendencias de velocidad son consistentes entre ambos métodos. Considerando que en estudios hidráulicos similares se aceptan variaciones de hasta 60% en zonas complejas, los resultados obtenidos validan satisfactoriamente la simulación computacional, especialmente en las zonas críticas de entrada y salida donde las variaciones son menores al 40%.

la simulación (CFD) demuestra ser una herramienta válida para el desarrollo de nuevos diseños, particularmente porque captura las tendencias principales del flujo y las variaciones de velocidad en las zonas críticas. Aunque existen diferencias en los valores absolutos, especialmente en las zonas de turbulencia donde el modelo experimental registra velocidades negativas, la simulación logra representar adecuadamente la reducción progresiva de velocidades desde el canal de entrada (0,6 m/s) hasta las secciones de sedimentación (0,01-0,05 m/s). Esta capacidad de predicción de las características generales del flujo, sumada a la consistencia en la identificación de zonas de baja velocidad necesarias para la sedimentación,

valida el uso del modelo (CFD) como base para proponer modificaciones geométricas y optimizaciones en el diseño del desarenador. La simulación puede considerarse como una herramienta confiable para predecir el comportamiento hidráulico de nuevas configuraciones, permitiendo evaluar múltiples alternativas de diseño.

### **5.1 Evaluación del Funcionamiento Actual del Desarenador.**

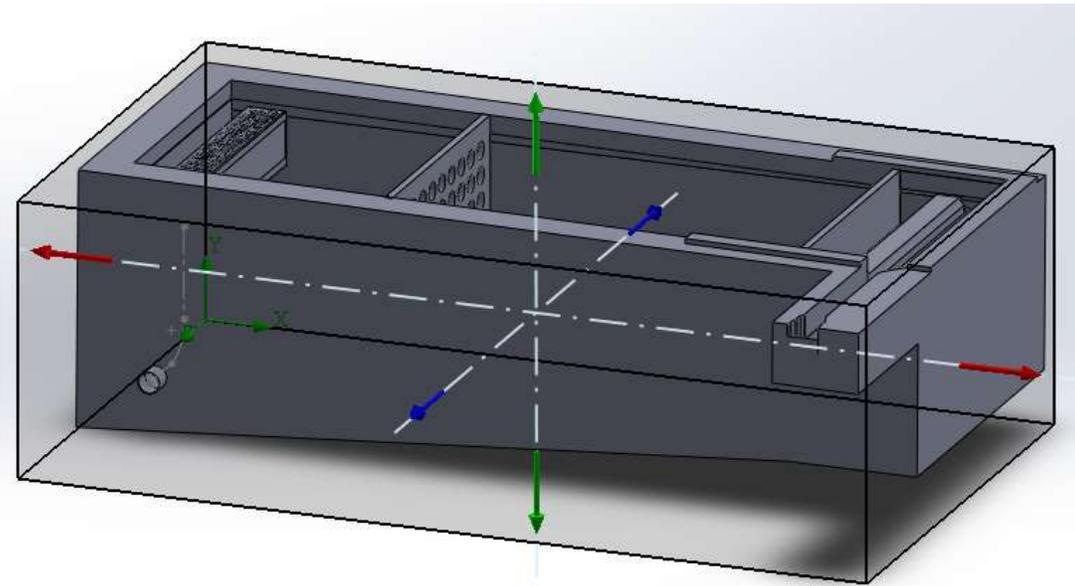
La evaluación integral del desarenador actual ha revelado deficiencias significativas en su funcionamiento hidráulico, respaldadas tanto por mediciones experimentales como por la simulación (CFD). El análisis detallado de la estructura evidencia problemas críticos en la distribución de velocidades, donde la transición de entrada presenta valores elevados entre 0,67-1,1 m/s que no se disipan adecuadamente. La caracterización hidrodinámica del sistema muestra la formación de remolinos y turbulencia excesiva en múltiples secciones, junto con zonas muertas donde el flujo es prácticamente nulo, lo que reduce significativamente el volumen efectivo de sedimentación. Las condiciones operativas actuales no cumplen con los rangos de velocidad recomendados para una sedimentación efectiva, mientras que la geometría existente, caracterizada por transiciones bruscas y una configuración de entrada deficiente, genera condiciones hidrodinámicas desfavorables que resultan en una distribución irregular del flujo en las secciones transversales. Este comportamiento hidráulico irregular afecta directamente a la sedimentación, ya que las velocidades fluctuantes y la turbulencia no solo impiden una distribución uniforme de los sedimentos, sino que también pueden provocar la resuspensión de partículas. Los aspectos estructurales identificados, incluyendo las dimensiones y proporciones actuales, no optimizan el proceso de sedimentación, lo que fundamenta la necesidad de implementar modificaciones sustanciales en el diseño.

### **5.2 Propuesta de Diseño Optimizado.**

Después de 5 simulaciones con diferentes modificaciones en la estructura se eligió la alternativa más óptima.

Con el objetivo de reducir la velocidad del flujo, se ha incorporado un muro transversal a una distancia de 3 metros del canal de salida. Este muro cuenta con barbacanas de 35 cm de radio, separadas entre sí por 50 cm. Las barbacanas están ubicadas a partir de una altura de 2 metros, mientras que el muro tiene una altura total de 3,70 metros. Esto ayudará a disminuir la velocidad del flujo y mejora la distribución en el canal, optimizando así el rendimiento del desarenador.

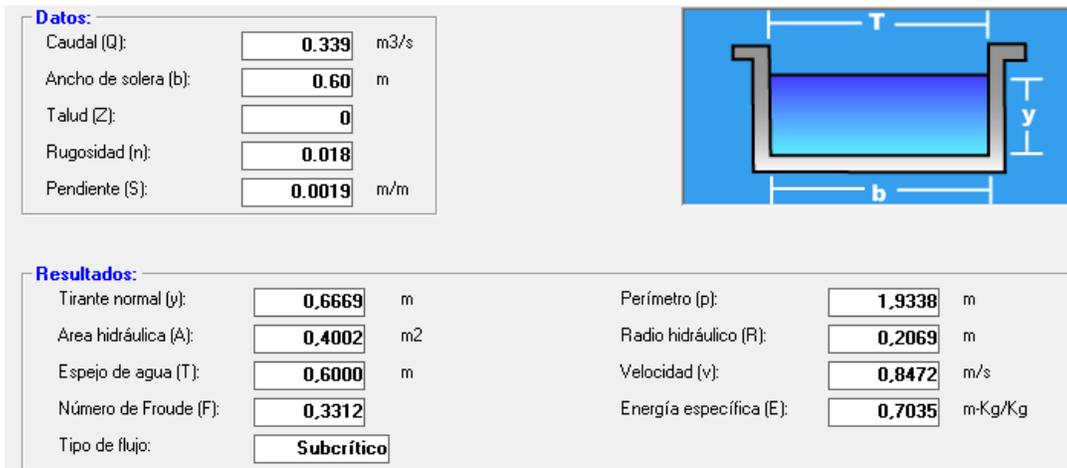
### 5.3 Simulación de Diseño Optimizado.



**Figura 5.1 Límites de dominio.**

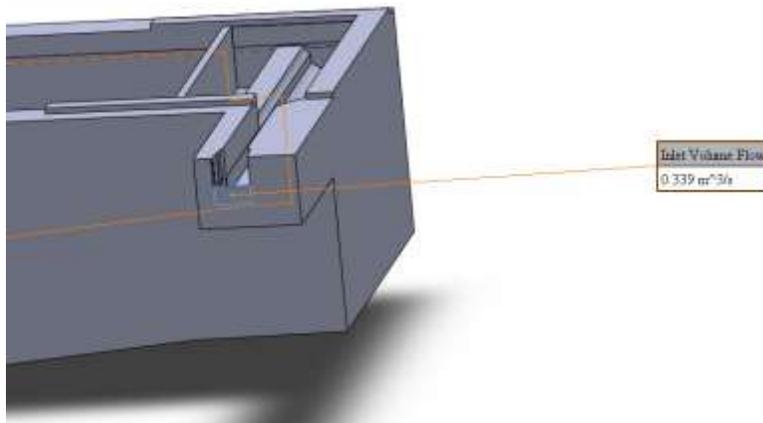
**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

El límite de dominio influye en el tiempo de cálculo, ya que un dominio más amplio incrementa los elementos de la malla y, con ello, el tiempo de procesamiento. Sin embargo, un dominio demasiado pequeño puede comprometer la precisión de los resultados.



**Figura 5.2 Estimación de tirante con el caudal máximo permitido**

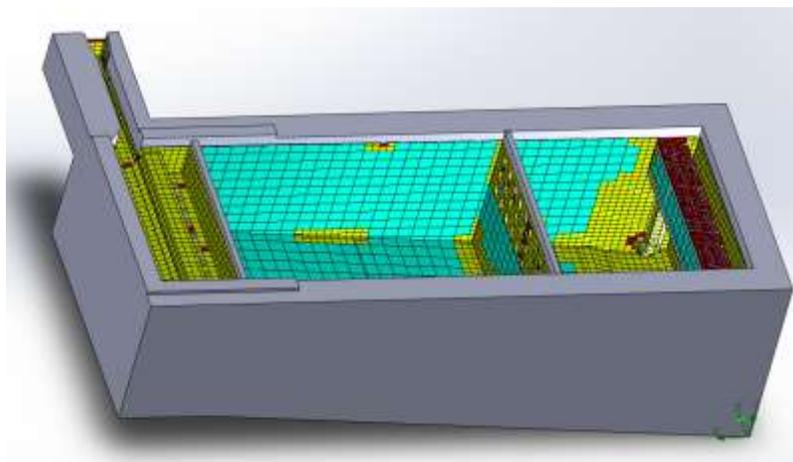
**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Hcanales.



**Figura 5.3 Caudal máximo de entrada.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

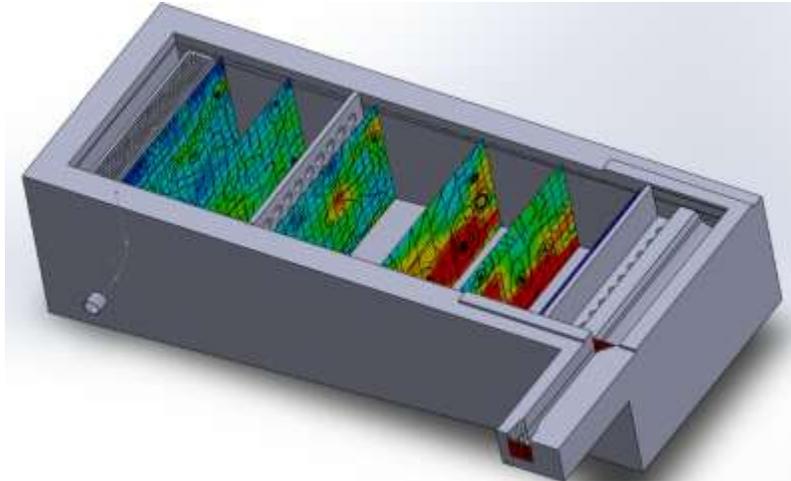
El caudal de ingreso al desarenador es de 339 l/s. Este dato es necesario para el desarrollo de la simulación, ya que el software lo empleará como una de las condiciones iniciales para modelar el comportamiento del flujo. Contar con este valor permite analizar de manera más precisa cómo se distribuye y comporta el agua dentro del desarenador.



**Figura 5.4 Mallado y refinamiento de malla.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

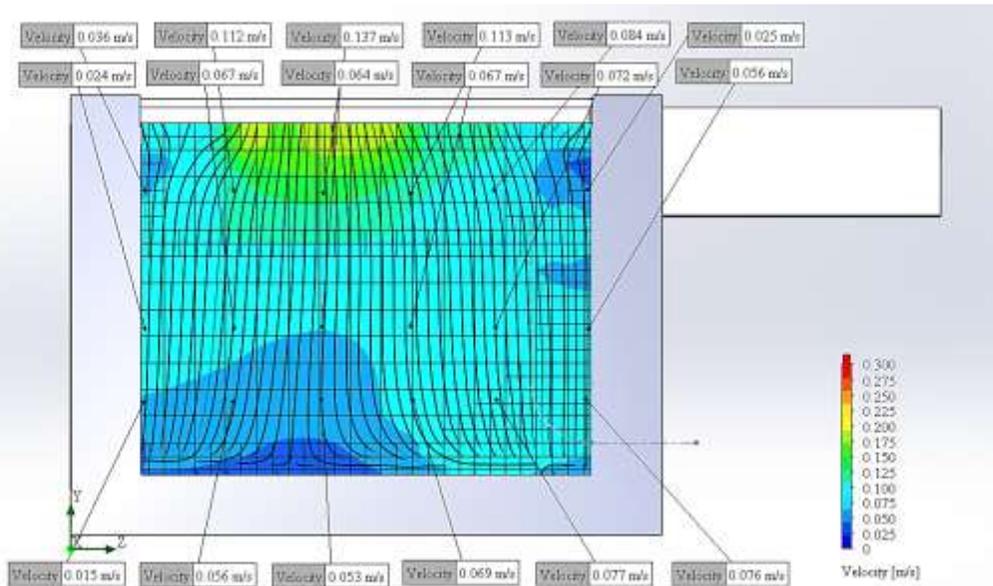
El refinamiento de la malla se lleva a cabo para mejorar el análisis en las áreas más complejas del desarenador, donde los cambios en las condiciones de flujo son más significativos. Este proceso permite aumentar la resolución en esas zonas específicas, capturando con mayor detalle los fenómenos hidráulicos que se producen, como la distribución de velocidades y la interacción del flujo con las estructuras internas.



**Figura 5.5 Vista tridimensional de desarenador con secciones de control.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

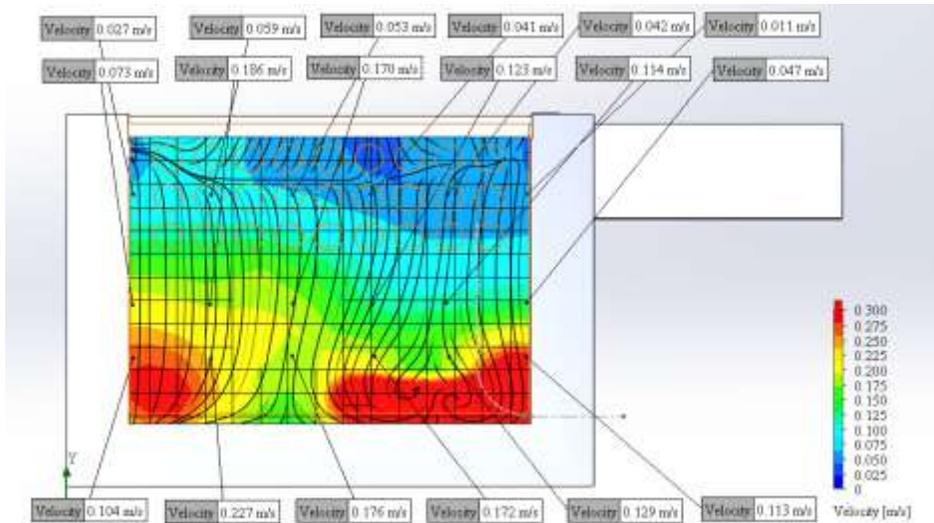
En la vista tridimensional se observa el patrón general del flujo, que tiende a desplazarse por la base del desarenador. Al chocar con la pantalla, la velocidad del flujo se disipa. Este efecto es más evidente al atravesar las barbacanas, donde se produce una notable reducción de la velocidad, lo que contribuye a estabilizar el flujo en su trayectoria.



**Figura 5.6 Sección 1 - punto de control de velocidades.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

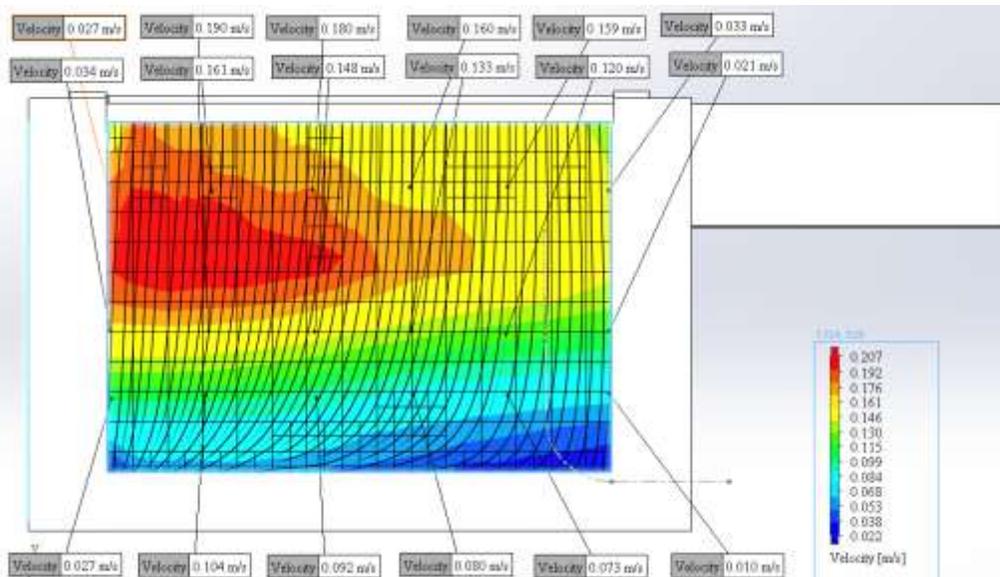
Sección 1: Ubicada cerca del canal recolector de salida, esta sección muestra, a través de la variación de colores que representan las velocidades, cómo estas se distribuyen en esta zona del desarenador.



**Figura 5.7 Sección 2 - punto de control de velocidades.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

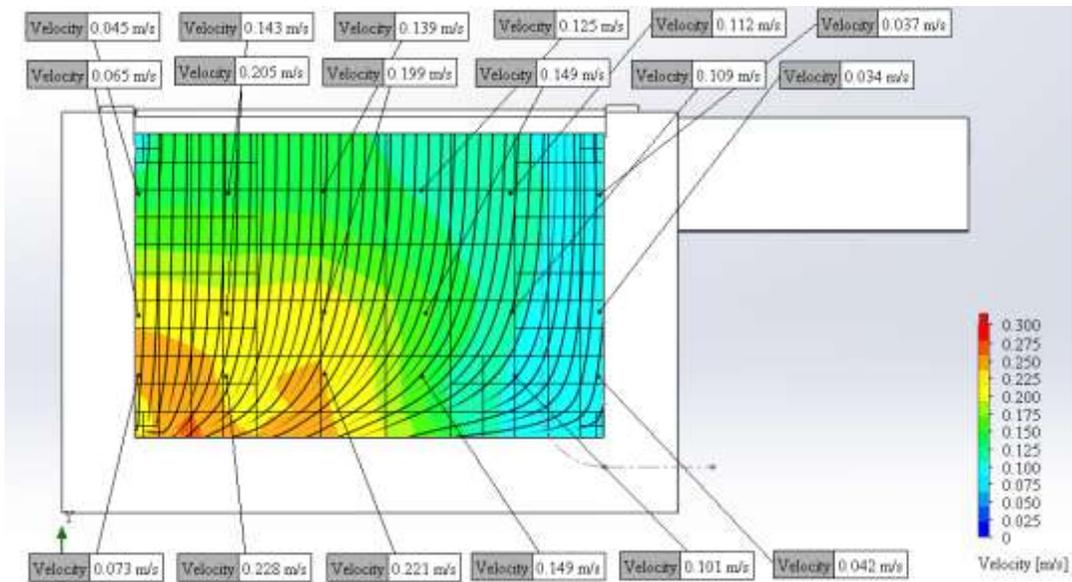
Sección 2: En esta sección, las velocidades más altas se concentran en los márgenes inferior izquierdo e inferior derecho, mientras que en el centro se aprecia una disminución de velocidad. Las velocidades más bajas se localizan en la superficie, lo que indica una distribución desigual con velocidades bajas en general.



**Figura 5.8 Sección 3 - punto de control de velocidades.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

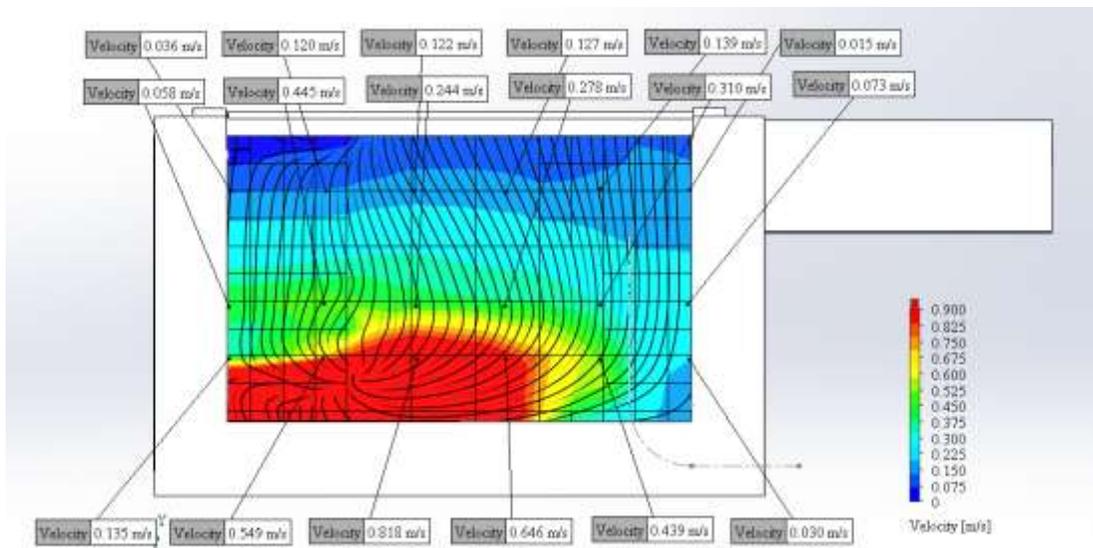
Sección 3: Aquí se observa que las velocidades más elevadas se encuentran en el margen superior izquierdo, mientras que las velocidades más bajas se localizan en la base del desarenador.



**Figura 5.9 Sección 4 - punto de control de velocidades.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

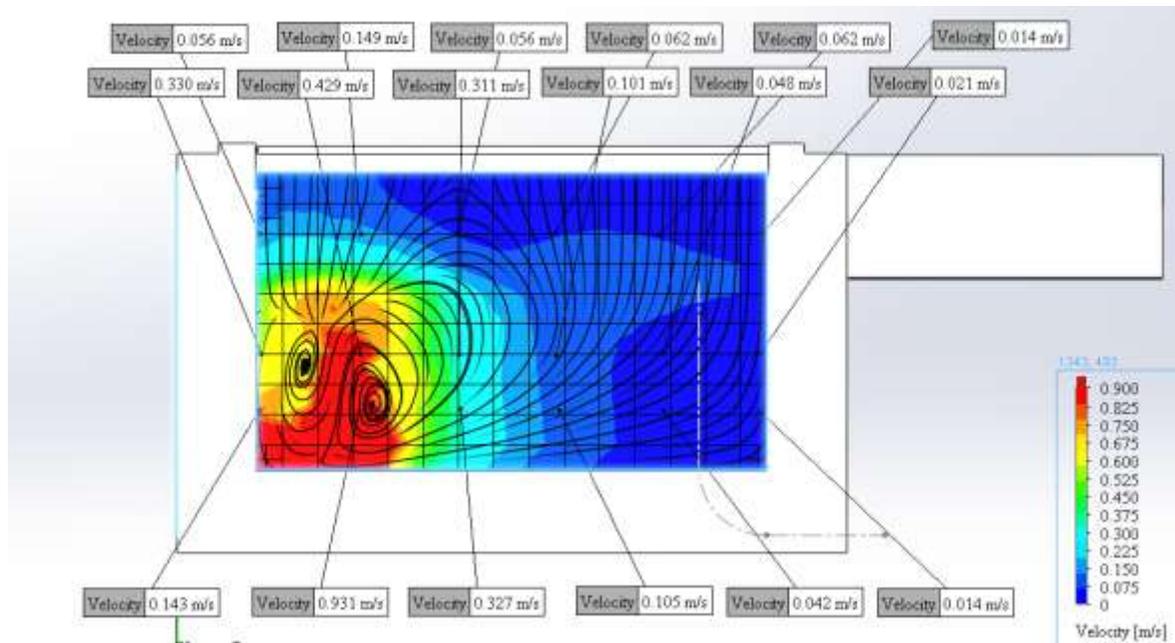
Sección 4: Las velocidades más altas se concentran en el margen inferior izquierdo, mientras que las velocidades más bajas se distribuyen en el margen derecho, mostrando una tendencia consistente con la sección anterior.



**Figura 5.10 Sección 5 - punto de control de velocidades.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

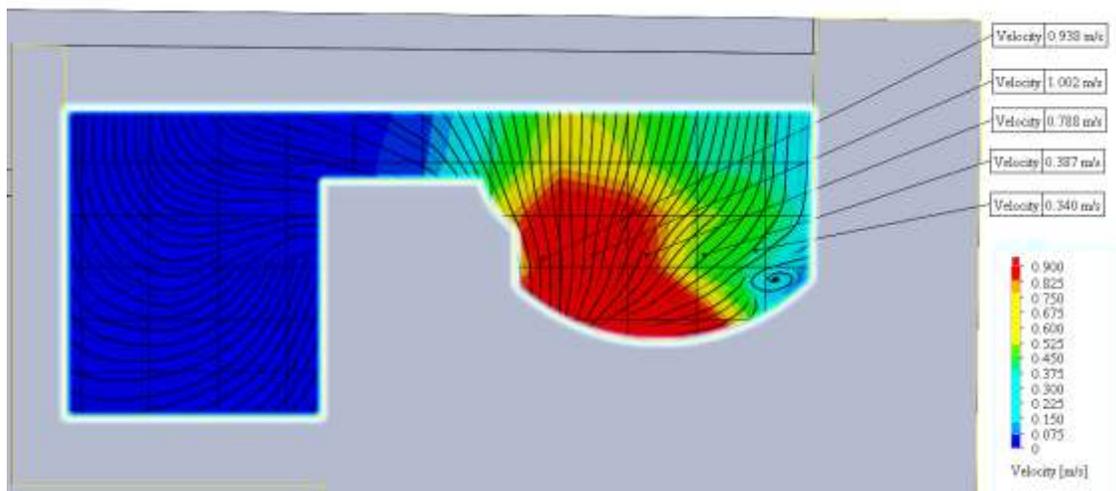
Sección 5: En esta sección, las velocidades más altas se observan en la base del desarenador, mientras que las más bajas aparecen en la superficie, reforzando el patrón de distribución de velocidad en esta zona.



**Figura 5.11 Sección 6 - punto de control de velocidades.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

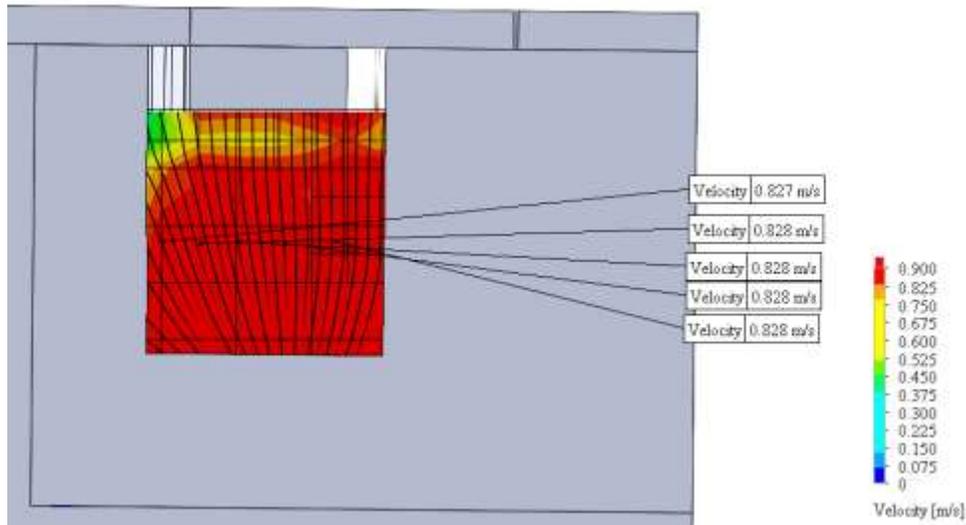
Sección 6: Se identifica un patrón donde las velocidades más altas se concentran en el margen inferior izquierdo y las más bajas en el margen derecho, lo que refleja una distribución no uniforme del flujo.



**Figura 5.12 Sección 7 - punto de control de velocidades.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

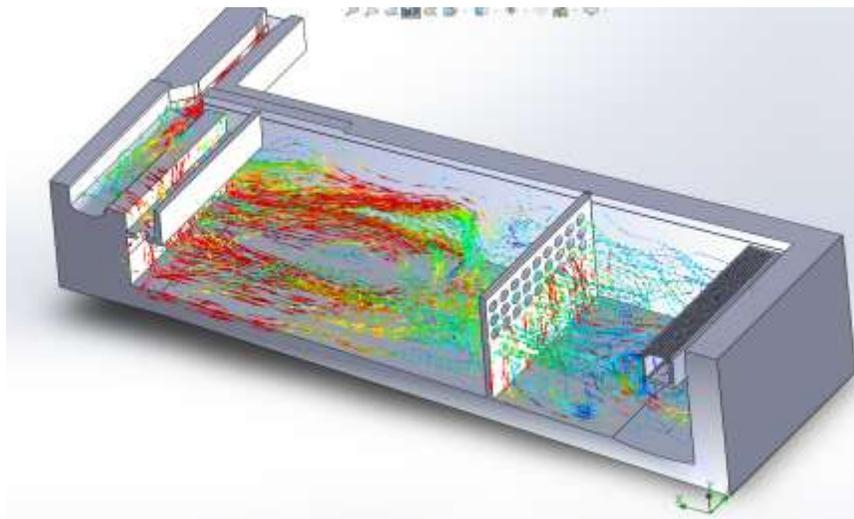
Sección 7: Esta sección corresponde al canal con una transición en el margen derecho. En esta transición, se reduce la velocidad y se genera turbulencia. Por otro lado, en el margen izquierdo, donde no hay transición, se presentan las velocidades más altas.



**Figura 5.13 Sección 8 - punto de control de velocidades.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

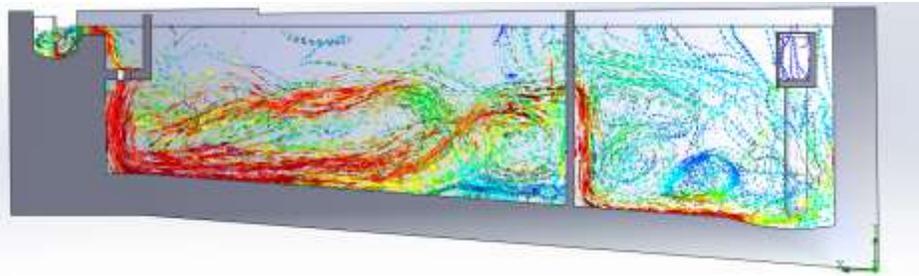
Sección 8: Corresponde a la entrada del desarenador, donde el flujo es más estable en términos de distribución de velocidades. Aunque los cambios son mínimos, se aprecia una ligera variación en la parte superior del margen izquierdo.



**Figura 5.14 Vista tridimensional del flujo en el desarenador "corte longitudinal".**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

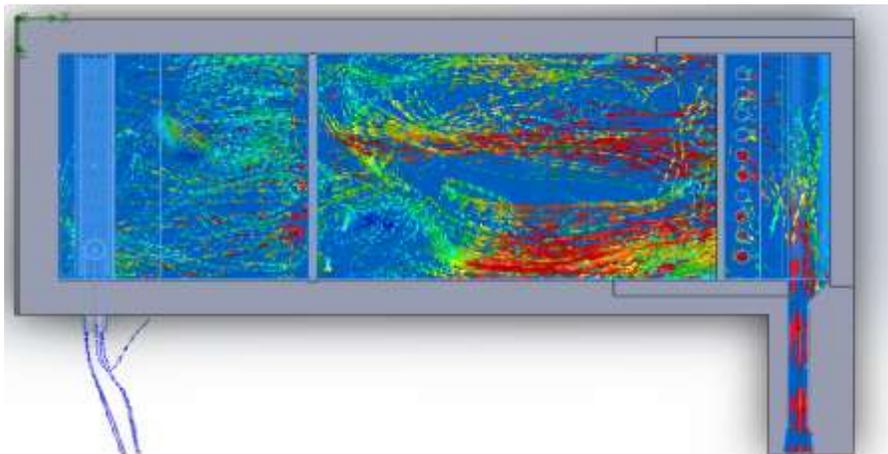
La vista tridimensional del flujo muestra cómo este ingresa al desarenador. Inicialmente, el flujo pasa por los orificios y se desplaza principalmente por la base. Al llegar a la pantalla, donde no hay orificios en la parte inferior, el flujo choca con la pared, generando turbulencias. Posteriormente, el flujo atraviesa los orificios superiores, lo que da lugar a un flujo más estable al pasar al otro lado del desarenador.



**Figura 5.15 Vista en corte longitudinal del sentido del flujo.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

En el corte longitudinal se observa claramente cómo el flujo choca contra la pantalla y atraviesa los orificios. Este comportamiento evidencia la interacción del flujo con los elementos estructurales del desarenador, destacando la disipación de energía y la estabilización del flujo en su trayectoria.



**Figura 5.16 Vista del desarenador en planta del sentido del flujo.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

Muestra una optimización significativa en el comportamiento tridimensional del flujo cuando se compara con la geometría base sin modificaciones. La visualización de las líneas de corriente, simuladas bajo condiciones de caudal máximo (339 l/s), evidencia una distribución más uniforme del fluido a través de la estructura modificada. Esta mejora en el patrón de flujo sugiere una reducción en las zonas de recirculación y una disminución de las pérdidas por turbulencia.

#### **5.4 Comparación entre el Diseño Actual y el Optimizado.**

##### **Estructura modificada-optimizada.**

La estructura modificada-optimizada del desarenador presenta mejoras significativas en su comportamiento hidráulico, evidenciadas principalmente en el control y distribución de

velocidades a lo largo de todas sus secciones. Los datos de la simulación muestran que las velocidades se mantienen generalmente por debajo del valor crítico de 0,3 m/s, especialmente en las zonas cruciales para la sedimentación. En la sección de salida (Sección 1), las velocidades oscilan entre 0,015-0,137 m/s, mostrando una notable mejora respecto al diseño original, con velocidades más bajas en el fondo que previenen la resuspensión de sedimentos. La sección 2 mantiene un rango de velocidades de 0,011-0,227 m/s, con un comportamiento hidráulico optimizado en la zona central. La sección 3 exhibe velocidades entre 0,01-0,19 m/s, presentando una distribución más uniforme que favorece la decantación de partículas. En la sección 4, las velocidades se controlan entre 0,034-0,228 m/s, mientras que la sección 5 muestra un rango más amplio de 0,015-0,818 m/s, pero con un patrón de flujo más favorable para el proceso de sedimentación. La sección 6 y las zonas de transición también presentan mejoras significativas en el control de velocidades. Esta optimización resulta en una estructura más eficiente, donde la distribución de velocidades desde la entrada hasta la salida favorece significativamente el proceso de sedimentación, reduciendo las zonas de turbulencia y mejorando la capacidad de retención de sedimentos. El nuevo diseño logra mantener condiciones más estables y controladas en comparación con la estructura original, lo que se traduce en una mayor eficiencia en la remoción de partículas y un mejor funcionamiento general del desarenador.

**Tabla: 13: Velocidades en secciones de control del desarenador optimizado.**

VELOCIDADES DE SIMULACIÓN EN DESARENADOR OPTIMIZADO "Q = 339 L/S"							
Tirante "y"	3,05m	SECCIÓN 1					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad letrurada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,61	0,036	0,112	0,137	0,113	0,084	0,025
0,6 y	1,83	0,024	0,067	0,064	0,067	0,072	0,056
0,8 y	2,44	0,015	0,056	0,053	0,069	0,077	0,076
Tirante "y"	2,73m	SECCIÓN 2					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad letrurada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,546	0,027	0,059	0,053	0,041	0,042	0,011
0,6 y	1,638	0,073	0,186	0,17	0,123	0,114	0,047
0,8 y	2,184	0,104	0,227	0,176	0,172	0,129	0,113

Tirante "y"	3,05m	SECCIÓN 3					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad letrada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,61	0,027	0,19	0,18	0,16	0,159	0,033
0,6 y	1,83	0,034	0,161	0,148	0,133	0,12	0,021
0,8 y	2,44	0,027	0,104	0,092	0,08	0,07	0,01
Tirante "y"	2,68m	SECCIÓN 4					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad letrada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,536	0,045	0,143	0,139	0,125	0,112	0,037
0,6 y	1,608	0,065	0,205	0,199	0,149	0,109	0,034
0,8 y	2,144	0,073	0,228	0,221	0,149	0,101	0,042
Tirante "y"	2,625m	SECCIÓN 5					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad letrada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,525	0,036	0,12	0,122	0,127	0,139	0,015
0,6 y	1,575	0,058	0,445	0,244	0,278	0,31	0,073
0,8 y	2,1	0,135	0,549	0,818	0,646	0,439	0,03
Tirante "y"	2,56m	SECCIÓN 6					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad letrada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,512	0,056	0,149	0,056	0,062	0,062	0,014
0,6 y	1,536	0,33	0,429	0,311	0,101	0,048	0,021
0,8 y	2,048	0,143	0,931	0,327	0,105	0,042	0,014
Tirante "y"	0,27m	SECCIÓN DE ENTRADA CON TRANSICIÓN "85cm"					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	
		0,14 m	0,28 m	0,42 m	0,56 m	0,71 m	
Profundidad (m)		velocidad letrada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	
0,6 y	0,162	0,938	1,002	0,788	0,378	0,34	
Tirante "y"	0,33m	CANAL DE ENTRADA "60cm"					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	
		0,10 m	0,20 m	0,30 m	0,40 m	0,50 m	

Profundidad (m)		velocidad leída en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad				
		1	2	3	4	5
0,6 y	0,198	0,827	0,828	0,828	0,828	0,828

Fuente: Elaboración propia.

### Estructura sin modificaciones.

En cuanto a la simulación en SolidWorks para el caudal máximo de 339 L/s, los resultados muestran un aumento considerable de las velocidades, llegando a superar los 0,3 m/s que en varias literaturas es un valor límite para que exista sedimentación de sólidos. En las gráficas de la variación de velocidades por secciones transversales, se puede ver que al inicio del desarenador las velocidades más altas se concentran en el medio, por debajo de la superficie libre de agua, mientras que las velocidades más lentas se presentan en la superficie. Esta situación no es favorable ya que va en contra de tener buenas condiciones de decantación.

En las secciones 5 y 4, las velocidades altas están en el fondo, y las más bajas en la superficie. Nuevamente se destaca que esta situación no es favorable para un desarenador. La sección 3 se diferencia de las otras secciones por presentar velocidades bajas en toda su área, lo cual es favorable para la sedimentación, pero en la sección 2 se presentan velocidades altas en el lado izquierdo superior e inferior, lo cual no es favorable para la sedimentación.

En la sección 1, salida del desarenador, se presentan velocidades muy altas en toda la sección.

**Tabla: 14: Velocidades en secciones de control del desarenador actual.**

VELOCIDADES DE SIMULACIÓN EN DESARENADOR "Q = 339 L/S"							
Tirante "y"	3,05m	SECCIÓN 1					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad leída en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,61	0,398	0,349	0,289	0,283	0,307	0,322
0,6 y	1,83	0,263	0,255	0,223	0,196	0,182	0,155
0,8 y	2,44	0,218	0,228	0,18	0,142	0,119	0,114
Tirante "y"	2,73m	SECCIÓN 2					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad leída en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,546	0,188	0,196	0,204	0,197	0,189	0,162
0,6 y	1,638	0,125	0,215	0,201	0,181	0,163	0,139
0,8 y	2,184	0,135	0,217	0,19	0,16	0,146	0,124

Tirante "y"	3,05m	SECCIÓN 3					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad letrurada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,61	0,159	0,158	0,157	0,152	0,145	0
0,6 y	1,83	0,207	0,202	0,196	0,167	0,15	0,047
0,8 y	2,44	0,239	0,218	0,186	0,159	0,143	0,046
Tirante "y"	2,68m	SECCIÓN 4					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad letrurada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,536	0,137	0,133	0,127	0,123	0,123	0,105
0,6 y	1,608	0,164	0,241	0,213	0,182	0,152	0,118
0,8 y	2,144	0,294	0,306	0,268	0,194	0,15	0,121
Tirante "y"	2,625m	SECCIÓN 5					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad letrurada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,525	0,065	0,084	0,074	0,078	0,081	0,07
0,6 y	1,575	0,21	0,193	0,161	0,161	0,116	0,091
0,8 y	2,1	0,324	0,312	0,28	0,184	0,122	0,091
Tirante "y"	2,56m	SECCIÓN 6					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad letrurada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,512	0,034	0,107	0,119	0,051	0,064	0,053
0,6 y	1,536	0,228	0,232	0,132	0,091	0,057	0,038
0,8 y	2,048	0,182	0,369	0,249	0,109	0,043	0,027
Tirante "y"	0,27m	SECCIÓN DE ENTRADA CON TRANSICIÓN "85cm"					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	
		0,14 m	0,28 m	0,42 m	0,56 m	0,71 m	
Profundidad (m)		velocidad letrurada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	
0,6 y	0,162	0,74	0,822	0,619	0,425	0,28	
Tirante "y"	0,33m	CANAL DE ENTRADA "60cm"					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	
		0,10 m	0,20 m	0,30 m	0,40 m	0,50 m	
Profundidad (m)		velocidad letrurada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					

		1	2	3	4	5
0,6 y	0,198	0,842	0,871	0,816	0,871	0,842

Fuente: Elaboración propia

### 5.5 Análisis Comparativo de Simulaciones.

Al comparar los resultados de las simulaciones para el caudal máximo de 339 l/s en la estructura original versus la estructura modificada con un muro de hormigón armado con barbacanas en la parte superior, se observan diferencias significativas. En la estructura original, las velocidades superan los 0,3 m/s en múltiples zonas, especialmente en el fondo del desarenador, creando condiciones desfavorables para la sedimentación. Por otro lado, la estructura modificada con deflectores muestra una mejor distribución de velocidades, con valores máximos que no superan los 0,25 m/s en la mayoría de las secciones. El muro de hormigón armado con barbacanas logra redistribuir el flujo, reduciendo las zonas de alta velocidad y creando áreas de velocidad más uniforme. Sin embargo, se observa que aún con estas mejoras, existen puntos localizados donde las velocidades se mantienen por encima de lo recomendado para una sedimentación óptima, principalmente en las zonas cercanas a los deflectores donde se produce una aceleración local del flujo. A pesar de esta limitación, la modificación representa una mejora considerable respecto al diseño original, aunque no logra resolver completamente el problema de velocidades excesivas para este caudal máximo.

**Tabla: 15: Análisis comparativo de velocidades.**

ANÁLISIS COMPARATIVO DE MEJORAS EN VELOCIDADES				
Sección	Ubicación	Velocidad Mejorada (m/s)	Velocidad Actual (m/s)	% De Mejora
SEC 1	Canal de salida	0,137	0,289	+110,9%
SEC 2	Centro	0,170	0,201	+18,2%
SEC 3	Antes de la pantalla	0,180	0,157	-12,8%
SEC 4	Centro	0,199	0,213	+7,0%
SEC 5	Centro	0,244	0,161	-34,0%
SEC 6	Centro	0,311	0,132	-57,6%
SEC 7	transición	1,002	0,822	-18,0%
SEC 8	canal de entrada	0,828	0,816	-1,4%

Fuente: Elaboración propia

La optimización de la estructura muestra cambios significativos en el comportamiento hidrodinámico del desarenador. En las secciones iniciales (1-2) se observa una reducción notable en las velocidades, especialmente en la Sección 1 con una mejora del 110,9%, lo que sugiere una mejor distribución del flujo en la zona de entrada. Las secciones intermedias y finales (3-6) muestran una reducción controlada de velocidades, particularmente importante en la Sección 6 (-57,6%), indicando una mejor sedimentación en la zona de depósito. La transición de entrada y el canal mantienen velocidades moderadas sin mucha variación de 18% y 1,4% respectivamente, lo que sugiere un flujo más uniforme y controlado. Estos cambios en el patrón de velocidades indican una optimización efectiva que favorece la sedimentación de partículas en las zonas críticas del desarenador.

### **5.6 Implicaciones Para el Diseño de Desarenadores.**

Las implicaciones para el diseño de desarenadores, basadas en la comparación entre el diseño actual y el optimizado, resaltan la importancia de controlar las velocidades de flujo para optimizar la sedimentación y minimizar la resuspensión de partículas en todo el desarenador. En el diseño optimizado, las velocidades más bajas y la distribución más uniforme del flujo permiten que las partículas en suspensión tengan una mayor probabilidad de asentarse en las primeras secciones del desarenador, lo cual resulta esencial para la retención de sedimentos. Este enfoque implica que los futuros diseños de desarenadores deben priorizar estructuras internas que reduzcan la velocidad del flujo en secciones críticas y mantenerla dentro de un rango que permita la sedimentación sin generar turbulencias excesivas. Esto puede lograrse mediante la optimización de la geometría de las secciones y la disposición de elementos internos, como deflectores o paredes, para dirigir el flujo de manera controlada y uniforme. Asimismo, la reducción de velocidad en las secciones centrales y finales del desarenador, observada en el diseño optimizado, sugiere que una menor velocidad en estas áreas permite mantener las partículas sedimentadas y evita que se desplacen hacia el efluente final.

## 6. Propuesta de Diseño.

En este capítulo se presenta la propuesta del nuevo diseño del desarenador, considerando los parámetros hidráulicos y estructurales para optimizar su funcionamiento. Se describen las condiciones de diseño, los resultados obtenidos mediante simulación, el análisis del comportamiento del flujo, y se realiza una comparación de velocidades entre el diseño actual, el diseño optimizado con pantalla y el diseño propuesto. Finalmente, se incluye un análisis detallado y conclusiones sobre el nuevo diseño.

### Propuesta general del diseño.

Para el diseño propuesto del desarenador, se consideró una relación longitud-ancho de 6:1, con 31 m de largo y 5 m de ancho en la zona de sedimentación. Este diseño tiene como objetivo garantizar una adecuada capacidad de operación y un flujo de agua eficiente, reduciendo las turbulencias y las recirculaciones no deseadas. Los principales elementos del diseño son:

- Zona de sedimentación: Dimensiones optimizadas para sedimentar caudales elevados de hasta 339 L/s sin comprometer la calidad del flujo.
- Tubería de conexión: Situada a la salida del desarenador, cuya función es enlazar con la planta de tratamiento de Tabladita, evitando interferencias en el proceso de sedimentación.
- Canal colector: Equipado con una rejilla de entrada separada 30 cm de la pared del desarenador, diseñada para captar sólidos flotantes como hojas y otros residuos.
- Objetivo del diseño: El diseño busca disipar las velocidades de entrada y garantizar una sedimentación eficiente, incluso bajo condiciones de operación máxima.

### 6.1 Cálculo de Dimensiones del Desarenador.

Datos:

$Q = 339 \text{ l/s}$                       caudal de diseño  
 $d = 0,06 \text{ mm}$                       Tamaño de la partícula (0,06 – 2 mm para arenas)

Dimensionamiento:

Velocidad de escurrimiento horizontal

La velocidad horizontal  $V_h$  debe de estar en un rango de 0,30 m/s a 0,40 m/s

$$V_h = \frac{Q}{B * H}$$

Donde:

$V_h$  = velocidad de escurrimiento horizontal, m/s.

Q = caudal de diseño, en  $\text{m}^3 / \text{s}$ .

B = ancho de desarenador, en m.

H = profundidad del desarenador, en m.

- Cálculo de la profundidad del desarenador

$$Q = 339 \text{ l/s} \quad 0,339 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$V_h = 0,3 \text{ m/s}$$

Adoptamos "B" = 5m      Hacemos variar buscando B/H=1

Profundidad del desarenador

$$H = \frac{Q}{B * V_h}$$

H = 0,23 m "mínima recomendable"

Adoptamos  $\rightarrow$  H=4m

Debe cumplir la relación:

$$0,8 \leq \frac{B}{H} \leq 1$$

$$B/H = 1,25$$

- Corrección de la velocidad horizontal

$$V_h = \frac{Q}{B * H}$$

$$V_h = \frac{0,339 \text{ m}^3/\text{s}}{5\text{m} * 4\text{m}}$$

$$V_h = 0,02 \text{ m/s}$$

- Superficie del desarenador

$$q = \frac{Q(\text{m}^3/\text{s})}{A_s(\text{m}^2)} \quad ; \quad A_s = B(\text{m}) * L(\text{m})$$

Donde:

q = carga superficial adoptada, en  $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$

Q = caudal de diseño, en  $\text{m}^3/\text{s}$

$A_s$  = Área superficial, en  $\text{m}^2$

B = ancho del desarenador, en m.

- Velocidad de sedimentación

Se puede tomar como base los valores de carga superficial de la tabla 10.1 y 10.2, validos en sedimentación libre, para partículas de peso específico 2650 kg/m<sup>3</sup>.

**Tabla: 16: Velocidad de sedimentación de partículas de arena.**

d (mm)	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	1	2	3	5	10
Vc (mm/s)	2	7	23	40	56	150	270	350	470	740
Vc' (mm/s)	0	5	17	30	40	110	210	260	330	-
Vc''(mm/s)	0	0	16	30	45	130	250	330	450	650
VI (mm/s)	150	200	270	320	380	600	830	1000	1300	1900

Vc = Velocidad de sedimentación para un fluido de velocidad horizontal nula.

Vc' = Velocidad de sedimentación para un fluido de velocidad horizontal igual a VI.

Vc'' = Velocidad de sedimentación para un fluido de velocidad horizontal igual a 0,30 m/s.

VI = Velocidad de sedimentación crítica de arrastre de la partícula depositada.

**Fuente:** Degremont, (1991).

d= 0,06 mm

- Cálculo de la longitud

$$H=4m$$

$$Q=339 \text{ L/s} \longrightarrow 0,339m^3/s$$

$$q=Vc''= 3,3 \text{ mm/s} \longrightarrow 0,003 \text{ m/s}$$

$$VI= 150 \text{ mm/s} \longrightarrow 0,15 \text{ m/s}$$

- Velocidad de sedimentación crítica

La velocidad de sedimentación crítica ( $v_{sc}$ ) corresponde a una velocidad minorada por factores tales como: gradientes de temperatura (ambiente y agua), zonas muertas, deficiencia en los dispositivos de entrada y salida. Se debe considerar un factor minorante “f” que varía de 10 al 30 % (f=1,1 a 1,5).

$$v_{sc} = \frac{v_s}{f}$$

$$v_s = 0,003 \text{ m/s} \longrightarrow \text{Velocidad de sedimentación.}$$

$$f= 1,5 \longrightarrow \text{Factor minorante.}$$

$$v_{sc} = 0,002 \text{ m/s}$$

$$y = \frac{Q}{A_s} \quad ; \quad A_s = B * L$$

$$A_s = 154,09 \text{ m}^2$$

$L = 30,82 \text{ m} \longrightarrow$  Longitud mínima del desarenador

Adoptamos:

$L = 31 \text{ m} \longrightarrow$  Debe cumplir  $L/H$

$L/B = 6,20$

$v_h/v_{sc} = 7,70$      $L/H = 7,70$     Relación: largo – ancho:  $\frac{L}{B} = 7$  a  $12$

- Tiempo de retención

$$t_s = \frac{H}{v_s}$$

$H = 4,00 \text{ m}$

$v_s = 0,002 \text{ m/s}$

$t_s = 1818,18 \text{ s}$

$t_s = 30,30 \text{ min}$

30 min a 240 min recomendable según López Cualla Ricardo A.

$$VI = V_h$$

- Para flujo turbulento

### PARA UNA SECCIÓN RECTANGULAR

$Q_d = 0,339 \text{ m}^3/\text{s}$

$Re = v \cdot (L) / \text{Visc.}$

Base (B) m	Altura (H) m	Radio hidráulico (Rh)=A/P m	Longitud característica (Lk) m	Velocidad (V) m/s	Viscosidad Cinemática m <sup>2</sup> /s	Número de Reynolds (Re)
5,0	4,00	1,54	1,54	0,02	1,00E-06	26.077
						TURBULENTO

- Velocidad de sedimentación

	Fórmula de Newton.	
W=	<input type="text"/>	cm/s
s=	<input type="text" value="2,65"/>	g/cm <sup>2</sup>
d=	<input type="text" value="0,006"/>	cm.
C=	<input type="text" value="0,5"/>	adim.

$$W = \sqrt{(s - 1) * \frac{4 * g * d}{3 * C}}$$

Velocidad de sedimentación.

peso específico de las partículas (2,6 - 2,65).

diámetro de la partícula.

coeficiente de resistencia de los granos (c=0,5 granos redondos).

W= 0,509 cm/s

$$W = 0,005 \text{ m/s}$$

- Para flujo turbulento

$$H = 0,543$$

$$V_s = 0,005 \text{ m/s}$$

$$t_s = 106,65 \text{ s}$$

- Longitud de cámara

$$L = k * V_d * t_s$$

$$V_d = 0,125 \text{ m/s} \quad \text{velocidad de escurrimiento}$$

$$t_s = 106,65 \text{ s} \quad \text{tiempo de retención}$$

$$k = 2,00 \quad \text{coeficiente de seguridad en función de } V_d$$

$$L = 26,65 \text{ m}$$

$$\text{Adoptamos:} \quad L = 31 \text{ m}$$

Resumen de dimensiones del desarenador

	<b>VALOR CALCULADO (m)</b>	<b>VALOR ADOPTADO (m)</b>
B	5,00	5,00
H	4,00	4,00
L	31,00	31,00

- Transición de entrada

$$L_t = \frac{b_1 - b_2}{2 \cdot \text{tg. } \alpha}$$

Donde:

$$b_1 = 0,40\text{m} \longrightarrow \text{Espejo de agua en el canal aguas arriba}$$

$$b_2 = 0,20\text{m} \longrightarrow \text{Espejo de agua en el canal aguas abajo}$$

$$\alpha = 12,5 \text{ grados}$$

Reemplazando en formula tenemos:

$$L_t = 0,45 \text{ m} \longrightarrow \text{Transición mínima que debe de tener el desarenador.}$$

Adoptamos: tomando en cuenta el ancho del desarenador.

$$L_t = 2,65 \text{ m} \longrightarrow \text{Transición que se adapta al desarenador de forma constructiva.}$$

- Transición de salida

$$L_t = \frac{b_1 - b_2}{2 \cdot \text{tg. } \alpha}$$

Donde:

$b_1 = 0,20 \text{ m}$  → espejo de agua en el canal aguas arriba.

$b_2 = 0,40 \text{ m}$  → espejo de agua en el canal aguas abajo.

$\alpha = 12,5$  grados.

Reemplazando tenemos:

$L_t = 0,31 \text{ m}$  → Transición mínima que debe de tener el desarenador.

Adoptamos: ajustamos el valor en relación con el ancho del desarenador

$L_t = 2,65 \text{ m}$  → Transición que se adapta al desarenador de forma constructiva.

Vertedero de salida

$$h_v = \left( \frac{Q}{1,84 * B} \right)^{2/3}$$

$Q = 0,339 \text{ m}^3/\text{s}$

$B = 5,00 \text{ m}$

$h_v = 0,11 \text{ m}$

## 6.2 Topografía.

Se realizó un levantamiento topográfico en las inmediaciones del desarenador, priorizando los puntos cercanos a la estructura y en áreas ubicadas aguas arriba. Estos puntos fueron seleccionados para obtener información precisa que permita definir la ubicación del nuevo desarenador.

El levantamiento se realizó con una estación total, lo que permitió obtener coordenadas y cotas necesarias para el posicionamiento del nuevo desarenador.

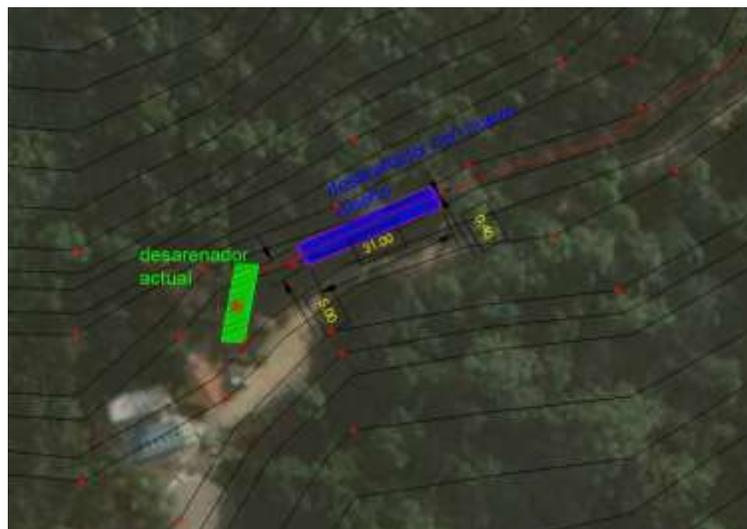
Se uso el sistema de coordenadas UTM basado en el sistema geodésico de referencia WGS84.

**Tabla: 17: Datos topográficos lecturadas.**

Punto	Norte (m)	Este (m)	Cota (m)
1	7618212,315	316846,879	1997,19
2	7618207,764	316877,849	2000,12
3	7618193,858	316905,898	2001,35
4	7618171,956	316928,281	2010,86

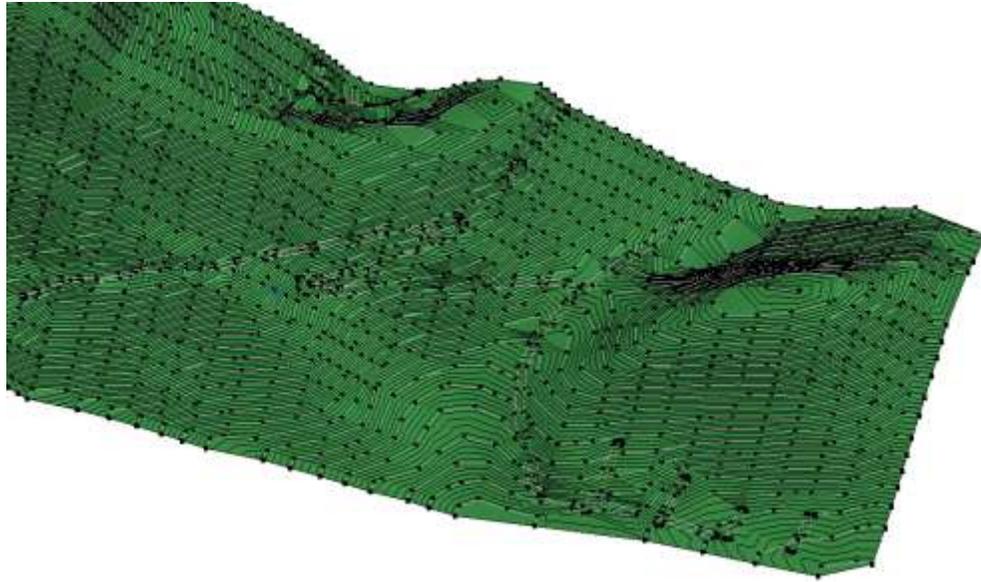
5	7618144,204	316942,807	2002,52
6	7618113,317	316948,053	2002,50
7	7618082,320	316943,507	2003,35
8	7618054,246	316929,614	2003,57
9	7618031,843	316907,733	2004,55
10	7618017,305	316880,007	2004,95
11	7618012,054	316849,148	2004,23
12	7618016,604	316818,179	2005,42
13	7618030,510	316790,130	2006,21
14	7618052,412	316767,747	2010,50
15	7618080,164	316753,221	2007,00
16	7618111,050	316747,974	2002,50
17	7618142,048	316752,520	2008,02
18	7618170,122	316766,413	2001,42
19	7618192,525	316788,294	2006,85
20	7618207,064	316816,021	2010,73

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de estación total “Leica TS16”



**Figura 6.1: Topografía - curvas de nivel.**

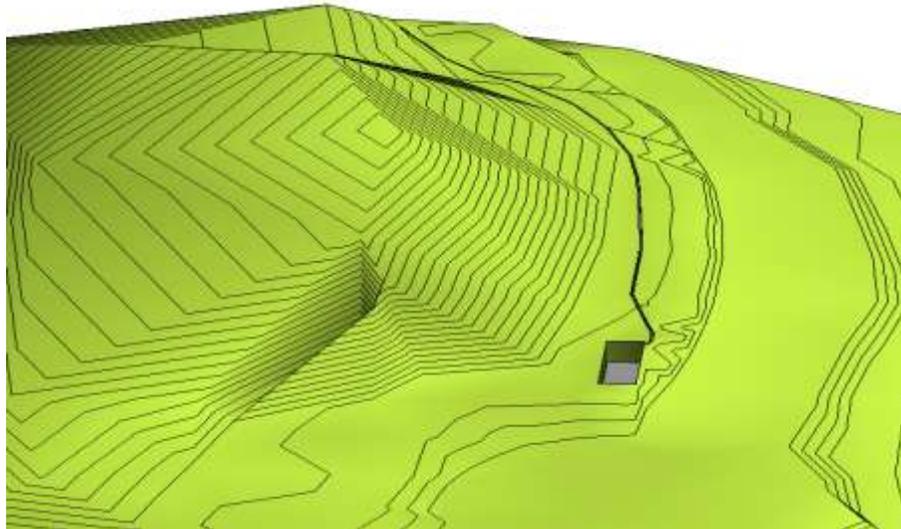
**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Civil 3d.



**Figura 6.2: Curvas de nivel 3d.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Revit.

Una visualización tridimensional de las curvas de nivel permite analizar las características del terreno, facilitando la identificación de zonas con pendientes pronunciadas, depresiones, crestas, y áreas planas.

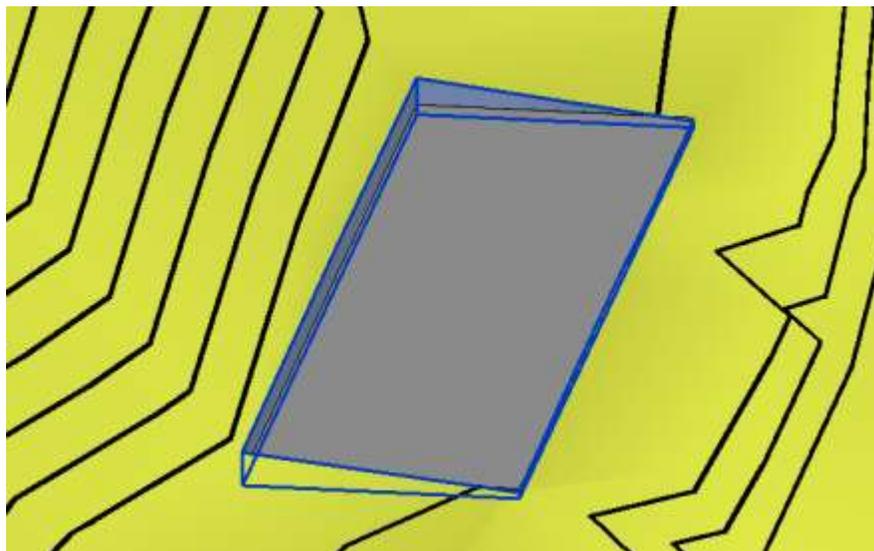


**Figura 6.3: Ubicación del desarenador actual.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Revit.

Se realizó un corte en el terreno como parte del proceso de nivelación, permitiendo preparar la superficie para el replanteo posterior. Este procedimiento asegura que las condiciones del terreno sean adecuadas para la implementación del diseño, garantizando la precisión en la

ejecución de las estructuras proyectadas y minimizando posibles errores derivados de irregularidades topográficas.



**Figura 6.4: Corte de nivelación para realizar el replanteo.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Revit.

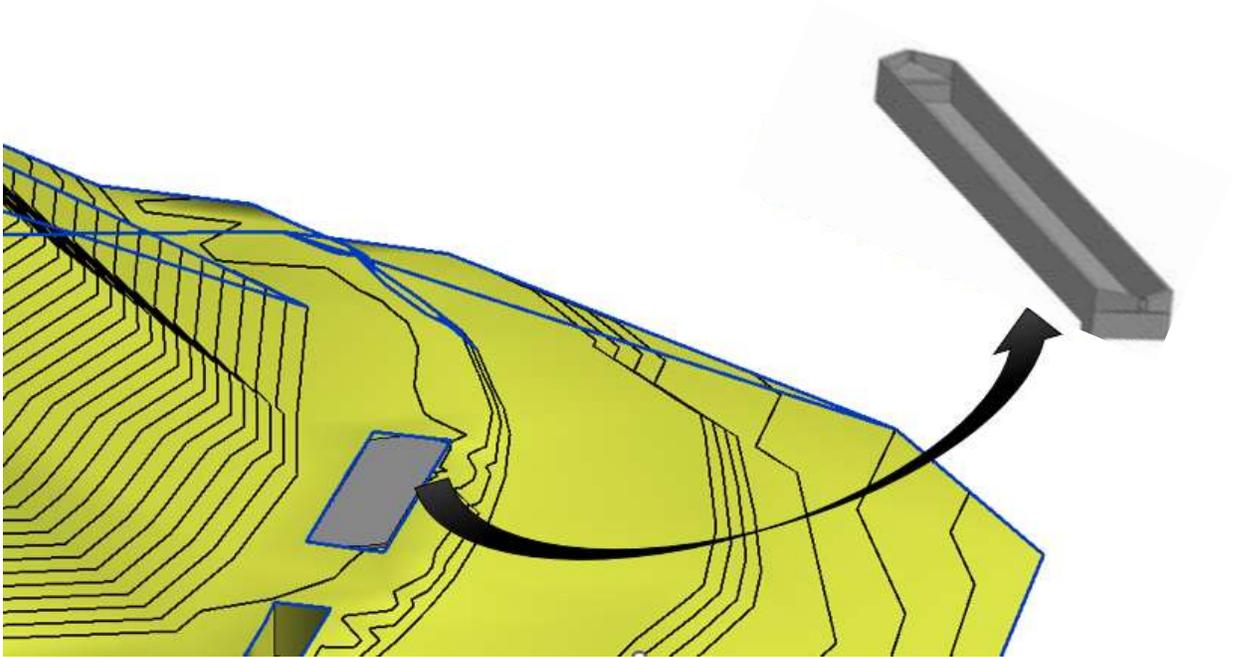
El área de corte para realizar los posteriores trabajos es de 8,6m de ancho y de largo 36m, dando como resultado un área de 309,6 m<sup>2</sup>, y un volumen de corte de 116 m<sup>3</sup>.



**Figura 6.5: Replanteo de desarenador.**

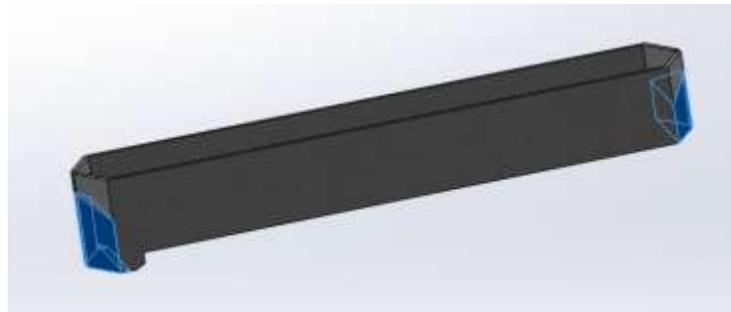
**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Revit.

Durante el replanteo sobre el terreno previamente nivelado, se asignó un borde de trabajo de 1 metro alrededor del área delimitada. Este margen adicional se estableció para facilitar la instalación del encofrado y permitir la ejecución eficiente de los trabajos posteriores



**Figura 6.6: Vista ubicación de desarenador.**

Fuente: Elaboración propia con ayuda de Revit.



**Figura 6.7: Volumen de relleno.**

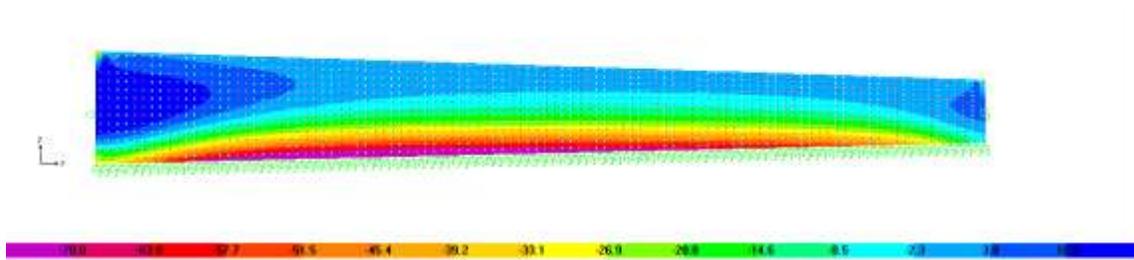
Fuente: Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

- El volumen total de relleno  $330,4 \text{ m}^3$ .
- Volumen neto del desarenador  $128,35 \text{ m}^3$ .

### **6.3 Diagrama de fuerzas internas de corte.**

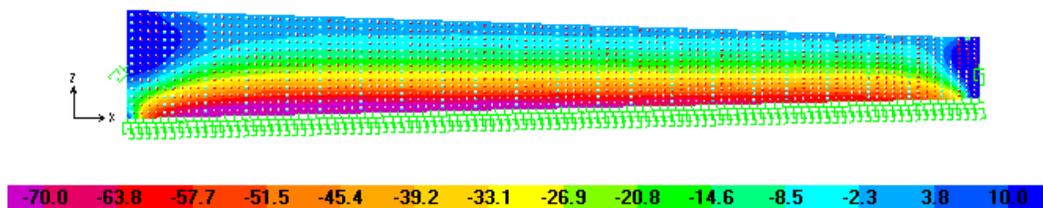
En el presente análisis estructural, realizado utilizando el software SAP2000, se obtuvieron los diagramas de fuerzas internas que representan las variaciones de esfuerzos internos en los elementos estructurales bajo las condiciones de carga consideradas.

## Superficie lateral 1



**Figura 6.8: Diagrama de momentos (kN.m/m), dirección "Z".**

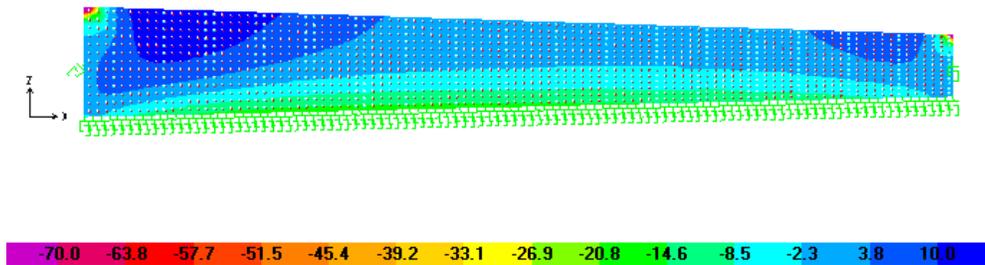
Fuente: Elaboración propia con ayuda de SAP 2000.



**Figura 6.9: Diagrama de cortantes (kN /m), dirección "Z".**

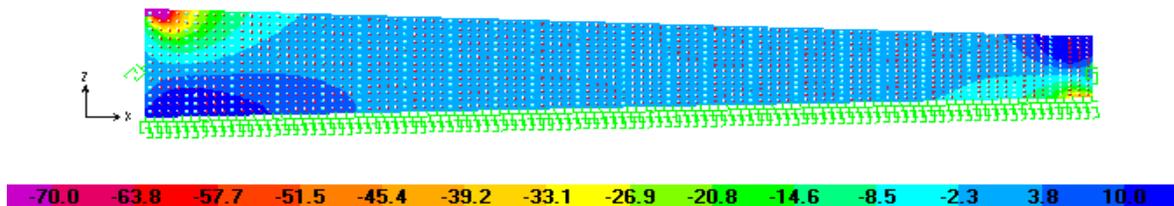
Fuente: Elaboración propia con ayuda de SAP 2000.

(Los momentos tienden a cero, debido a que el empuje del agua se contrarresta con el empuje del terreno).



**Figura 6.10: Diagrama de momentos (kN.m/m), dirección "X".**

Fuente: Elaboración propia con ayuda de SAP 2000.



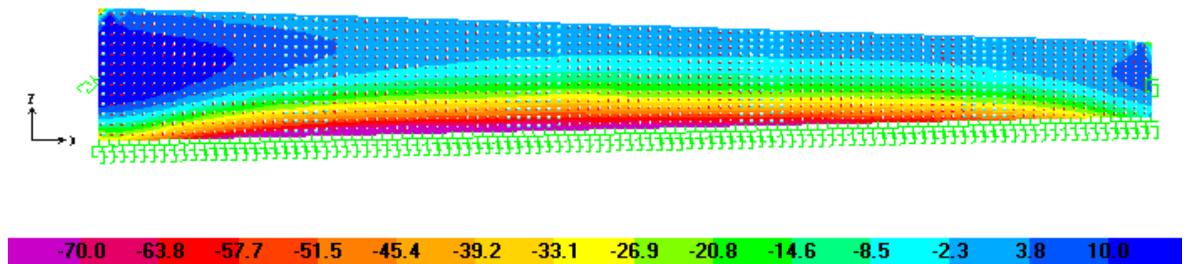
**Figura 6.11: Diagrama de cortantes (kN /m), dirección "X".**

Fuente: Elaboración propia con ayuda de SAP 2000.

## 6.4 Diagramas De Fuerzas Internas.

Este diagrama representa la distribución de los momentos flectores a lo largo de los elementos, los cuales son generados por cargas externas que producen flexión. El análisis del momento flector permite identificar las secciones críticas donde la estructura puede requerir refuerzo adicional.

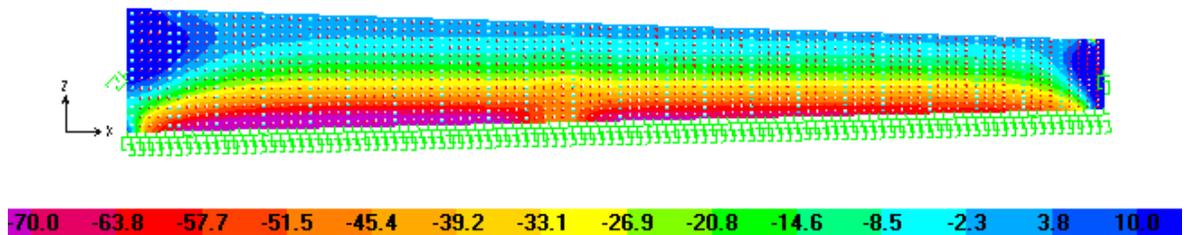
### Superficie lateral 2



**Figura 6.12: Diagrama de momentos (kN.m/m), dirección “Z”.**

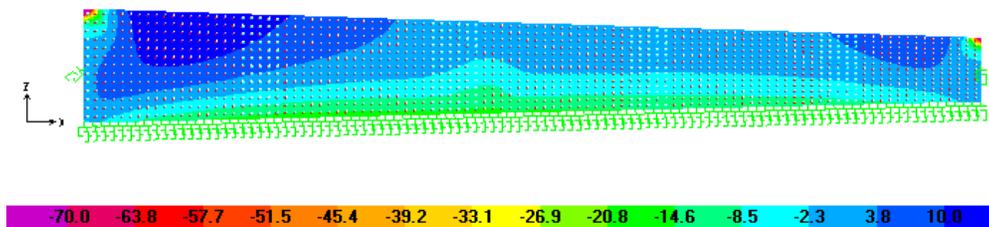
Fuente: Elaboración propia con ayuda de SAP 2000.

- **Diagrama de cortantes (vertical).**



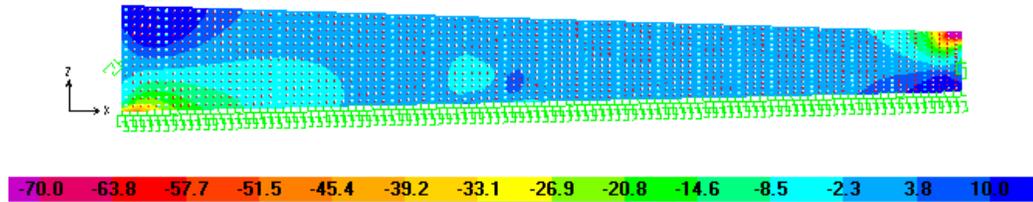
**Figura 6.13: diagrama de cortantes (vertical).**

Fuente: Elaboración propia con ayuda de SAP 2000.



**Figura 6.14: Diagrama de momentos (kN.m/m), dirección “X”.**

Fuente: Elaboración propia con ayuda de SAP 2000.



**Figura 6.15: diagrama de cortantes (horizontal).**

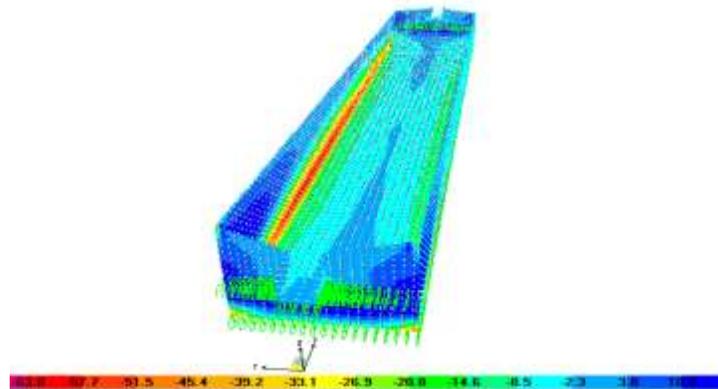
**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de SAP 2000.

### 6.5 Diagramas De Fuerzas Internas (Planta).

El diagrama de fuerzas axiales muestra la distribución de esfuerzos de tracción y compresión en los elementos de la planta. Este análisis fue necesario para garantizar que los materiales soporten las cargas longitudinales sin exceder su capacidad.

Los elementos sometidos a compresión se concentran en las zonas de soporte directo de las cargas verticales.

Las fuerzas de tracción predominan en los tirantes o elementos sujetos a tensiones inducidas por las cargas laterales.

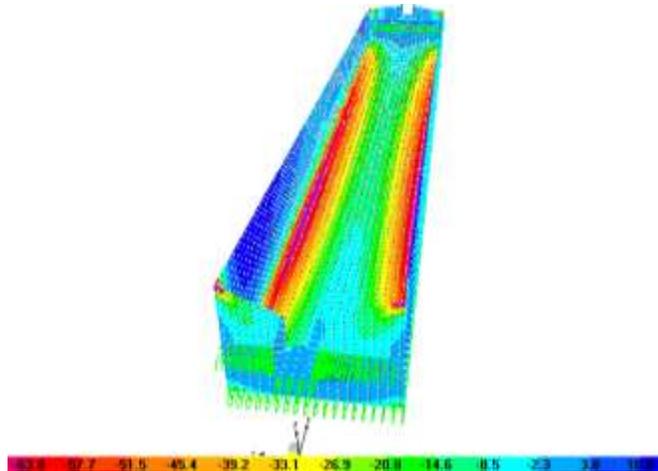


**Figura 6.16: diagrama de momentos en la dirección longitudinal (direccion2).**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de SAP 2000.

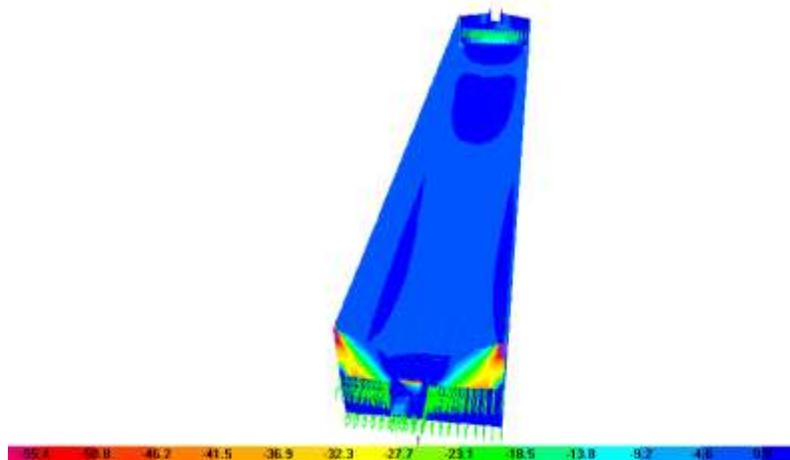
El diagrama de momentos en la dirección longitudinal proporciona una representación detallada de los esfuerzos de flexión a lo largo de los elementos estructurales principales de la planta en esa dirección. Este análisis permite identificar las zonas donde se generan los máximos momentos positivos y negativos, cruciales para el diseño y refuerzo de los elementos sometidos a flexión.

Estos resultados son fundamentales para garantizar la estabilidad y seguridad estructural frente a las cargas longitudinales.



**Figura 6.17: diagrama de momentos en la dirección transversal.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de SAP 2000.



**Figura 6.18: Cortantes máximas en vista en planta (sentido longitudinal).**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de SAP 2000.

### **6.6 Armado en caras laterales.**

El armado en las caras laterales de los elementos estructurales tiene como objetivo resistir los esfuerzos cortantes y de flexión que se generan debido a las cargas aplicadas. En elementos como vigas o muros, las barras de refuerzo colocadas en las caras laterales proporcionan la capacidad estructural necesaria para evitar fallos por cortante, especialmente en las zonas cercanas a los apoyos y en las regiones donde se presentan concentraciones de esfuerzos.

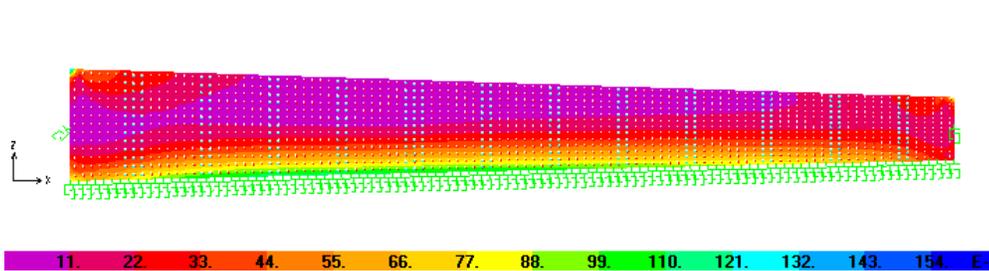
El diseño del armado en estas caras se realiza considerando:

Fuerzas Cortantes: Determinadas por el diagrama de cortante obtenido del análisis estructural.

Momento Flector: Se garantiza que las barras de refuerzo laterales colaboren en la distribución

uniforme de tensiones, especialmente en elementos sometidos a flexión biaxial.

Distancias entre Barras: Definidas según las normas de diseño estructural para asegurar una adecuada adherencia y distribución de esfuerzos



**Figura 6.19: Áreas máximas en cara top, dirección vertical ( $m^2/cm$ ).**

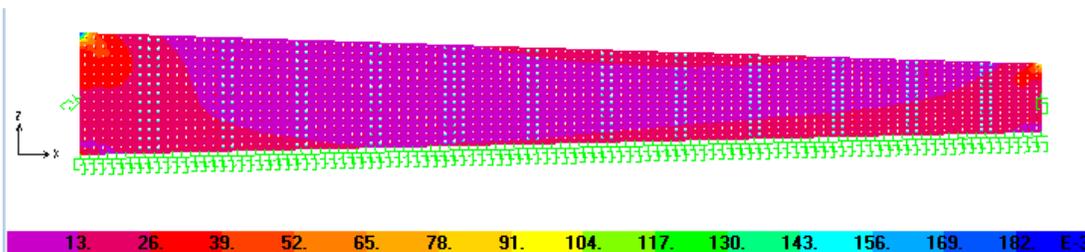
Fuente: Elaboración propia con ayuda de SAP 2000.

$A_s$  = área del acero.

$N^{\circ}$ barras = número de barras.

$$A_s = 120 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{cm} = 0,12 \cdot 100 = 12 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$\text{Si diámetro} = 16 \text{ mm} \Rightarrow \text{el } N^{\circ}\text{barras} = 12/2,01 = 6 \text{ barras/metro} \dots \dots \dots \varnothing 16 \text{ c}/15 \text{ cm}$$

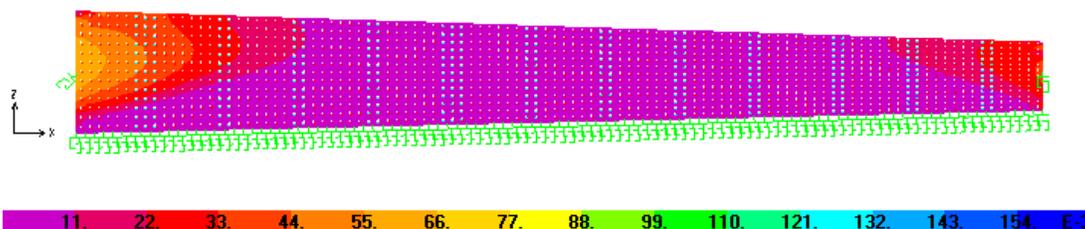


**Figura 6.20: Áreas máximas en cara top, horizontal ( $cm^2/cm$ ).**

Fuente: Elaboración propia con ayuda de SAP 2000.

$$A_s = 52 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{cm} = 0,052 \cdot 100 = 5,2 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$\text{Si diámetro} = 12 \text{ mm} \Rightarrow N^{\circ}\text{barras} = 5,2/1,13 = 5 \text{ barras/metro} \dots \dots \dots \varnothing 12 \text{ c}/20 \text{ cm}$$

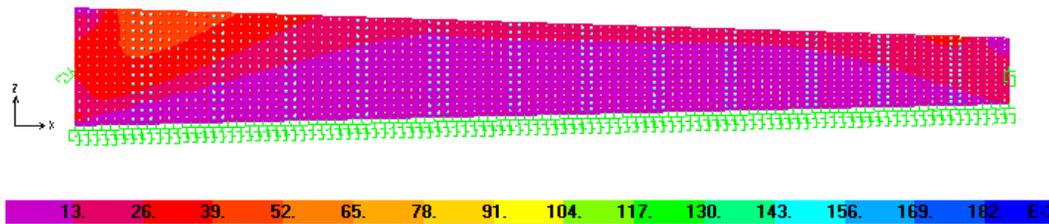


**Figura 6.21: Áreas máximas en cara botom, dirección vertical ( $cm^2/cm$ ).**

Fuente: Elaboración propia con ayuda de SAP 2000.

$$A_s = 66 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{cm} = 0,077 \cdot 100 = 6,6 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Sí diámetro= 12 mm  $\Rightarrow$  N<sup>o</sup>barras= 6,6/1,13= 6 barras/metro.....Ø12 c/15 cm



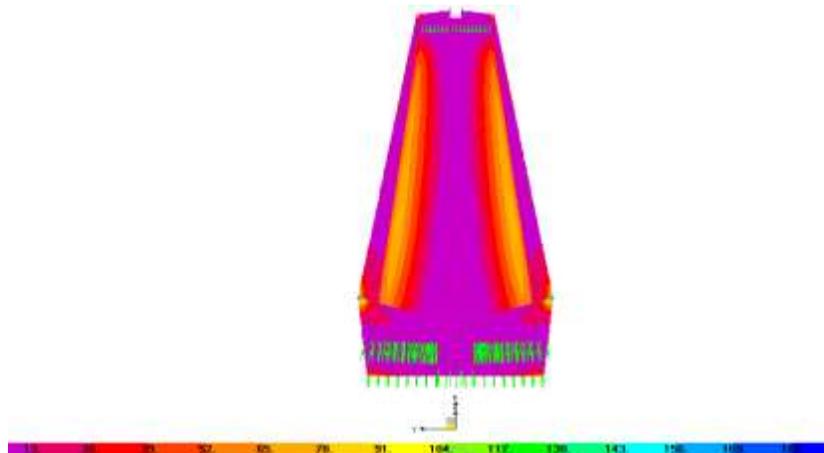
**Figura 6.22: Áreas máximas en cara botom, horizontal (cm<sup>2</sup>/cm).**

Fuente: Elaboración propia con ayuda de SAP 2000.

$$A_s = 52 * 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{cm} = 0,052 * 100 = 5,2 \text{ cm}^2/\text{m}$$

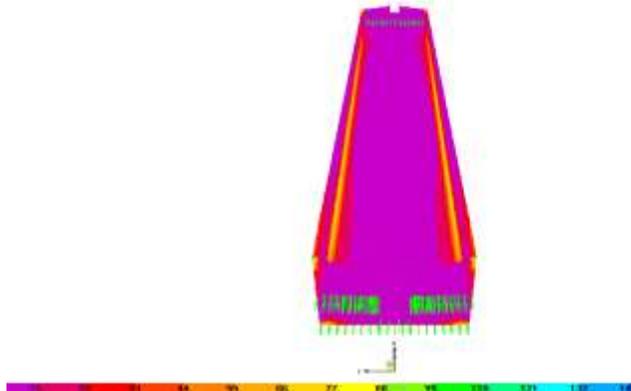
Sí diámetro= 12 mm  $\Rightarrow$  N<sup>o</sup>barras= 5,2/1,13= 5 barras/metro.....Ø12 c/20 cm

### 6.7 Armado en la base.



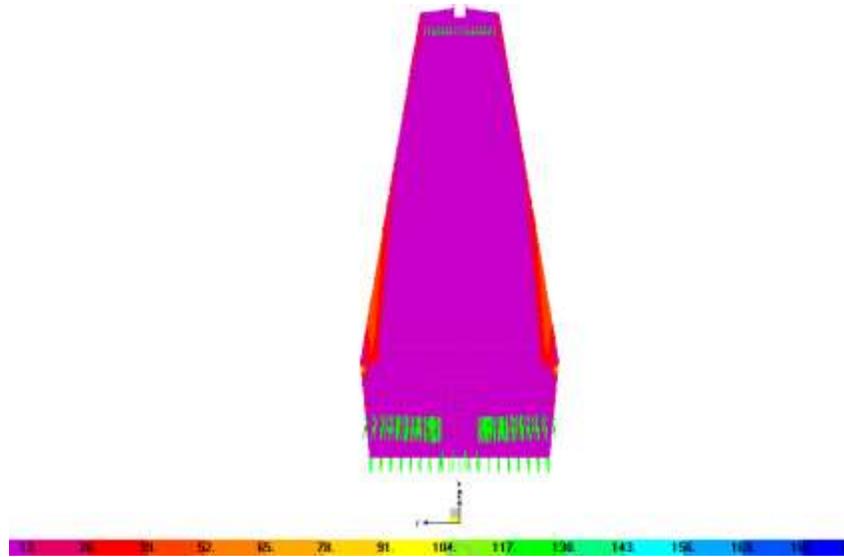
**Figura 6.23: Áreas máximas en cara top, transversal (cm<sup>2</sup>/cm).**

Fuente: Elaboración propia con ayuda de SAP 2000.



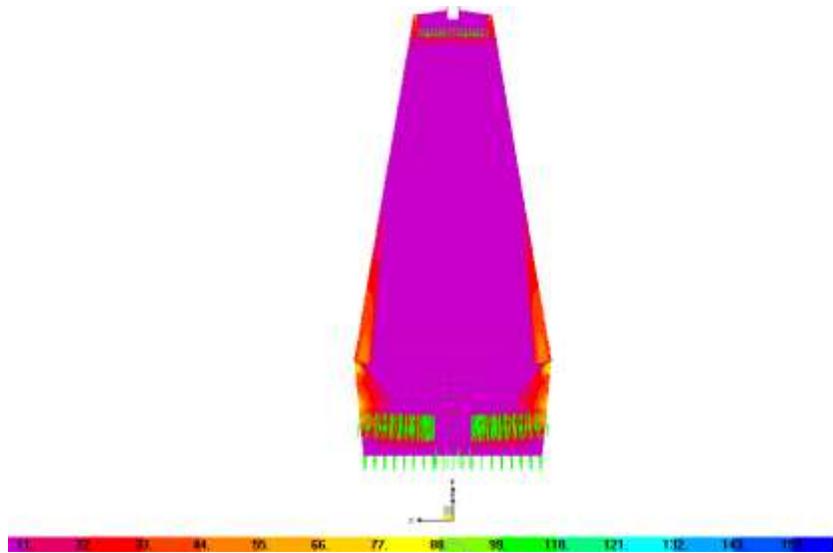
**Figura 6.24: Áreas máximas en cara top, longitudinal (cm<sup>2</sup>/cm).**

Fuente: Elaboración propia con ayuda de SAP 2000.



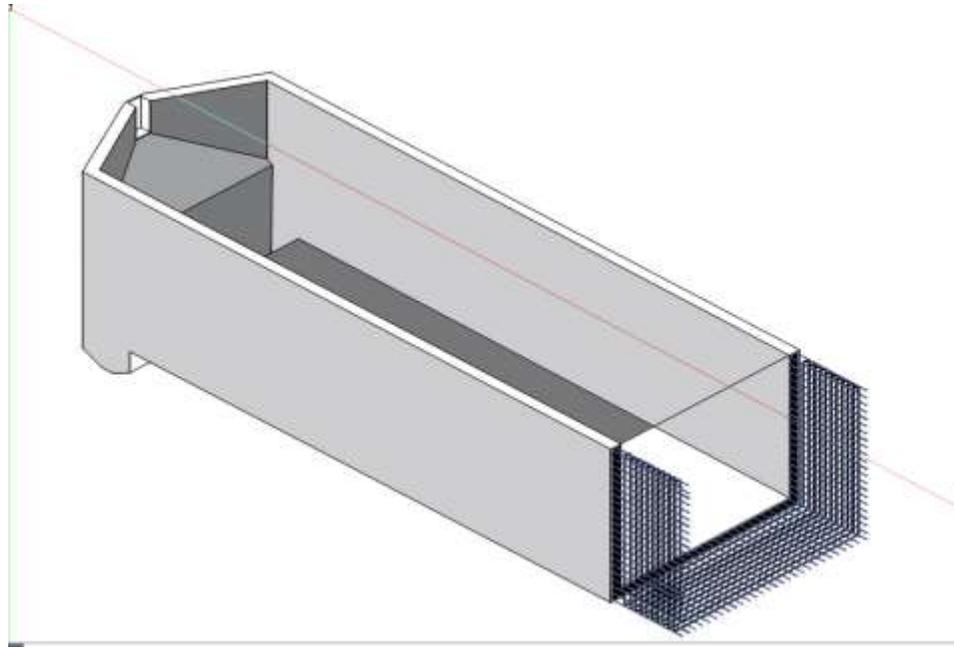
**Figura 6.25: Áreas máximas en cara top, longitudinal ( $\text{cm}^2/\text{cm}$ ).**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de SAP 2000.



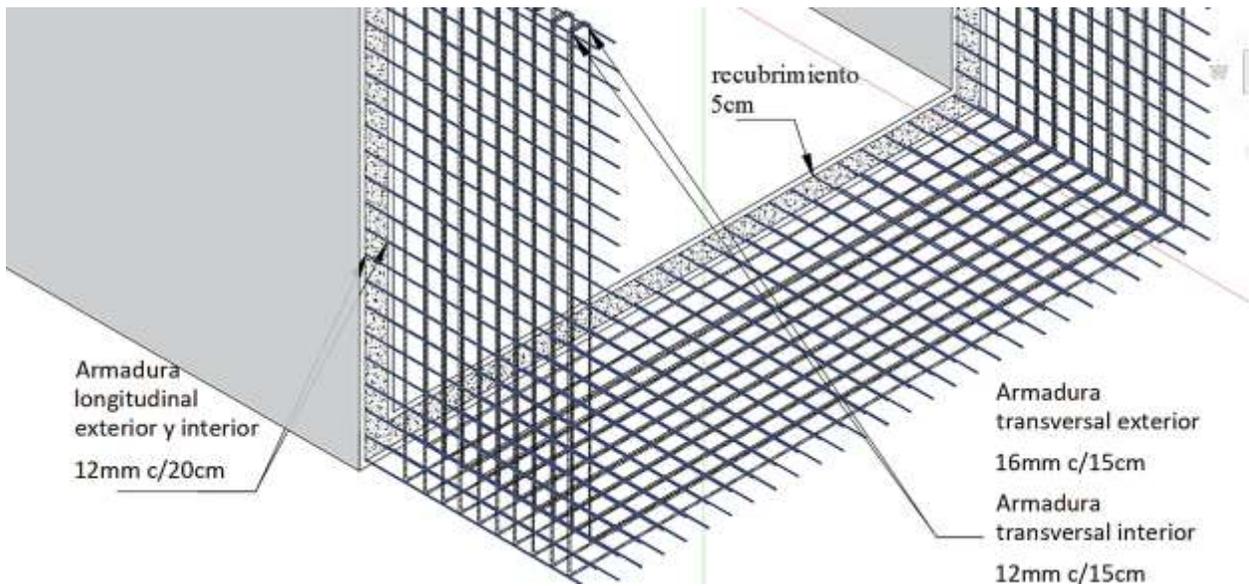
**Figura 6.26: Áreas máximas en cara botom, longitudinal ( $\text{cm}^2/\text{cm}$ ).**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de SAP 2000.



**Figura 6.27: Armadura longitudinal y transversal.**

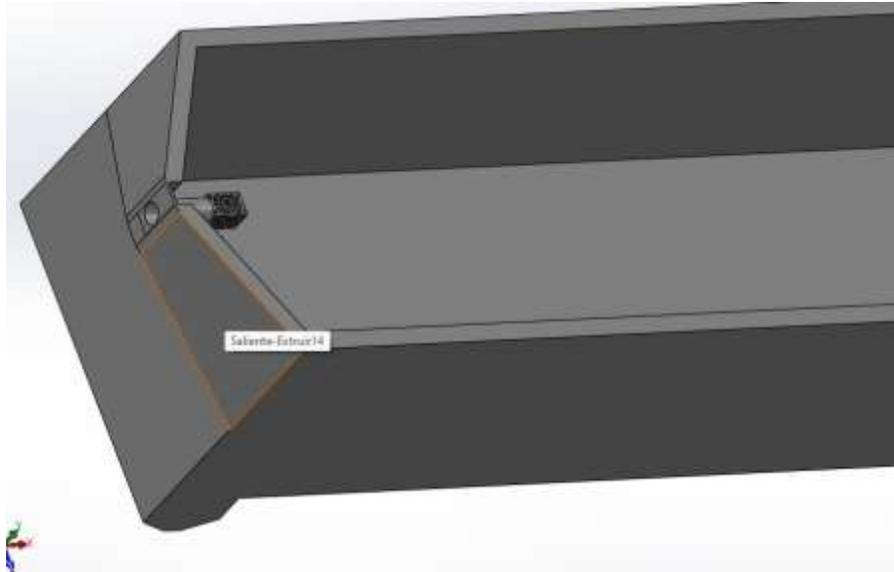
Fuente: Elaboración propia con ayuda de Civil 3d.



**Figura 6.28: Diámetros de armaduras longitudinal y transversal.**

Fuente: Elaboración propia con ayuda de Civil 3d.

- Acero
  - Armadura transversal exterior  $\varnothing 16$  c/15cm.
  - Armadura transversal interior  $\varnothing 12$  c/15cm.
  - Armadura longitudinal exterior e interior  $\varnothing 12$  c/20cm.



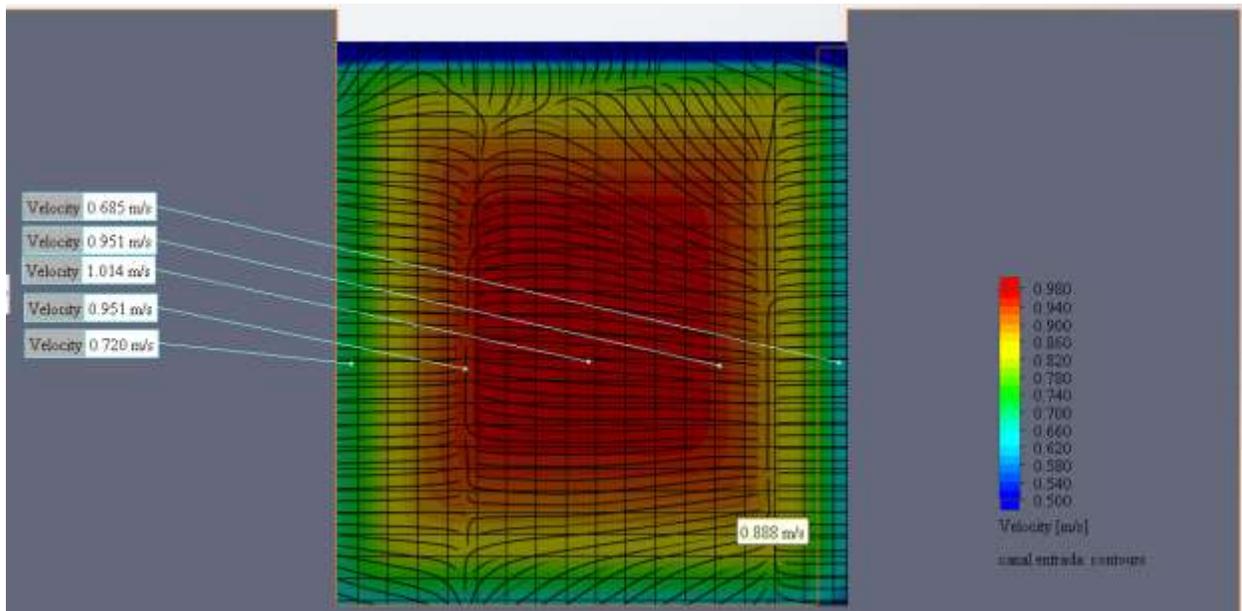
**Figura 6.29: desarenador más tubería de salida.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

### **6.8 Condiciones de Simulación.**

- Las simulaciones se realizaron considerando parámetros relevantes para aproximar las condiciones reales de operación del desarenador:
- Altitud geográfica: La ubicación del desarenador en Tarija influye en la presión atmosférica lo que afecta el comportamiento del flujo.
- Rugosidad del hormigón: Se incluyó el efecto de la rugosidad en las paredes del desarenador para reflejar la fricción real del flujo con las superficies.
- Caudal de entrada: Se simuló el caudal máximo de 339 l/s, correspondiente al tirante de 80 cm, para analizar el comportamiento del sistema en condiciones extremas.
- Dimensiones estructurales: Se modelaron las dimensiones propuestas para el nuevo diseño, permitiendo evaluar la distribución de velocidades.

## 6.9 Simulación del Nuevo Diseño.



**Figura 5.17** Sección canal de entrada.

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

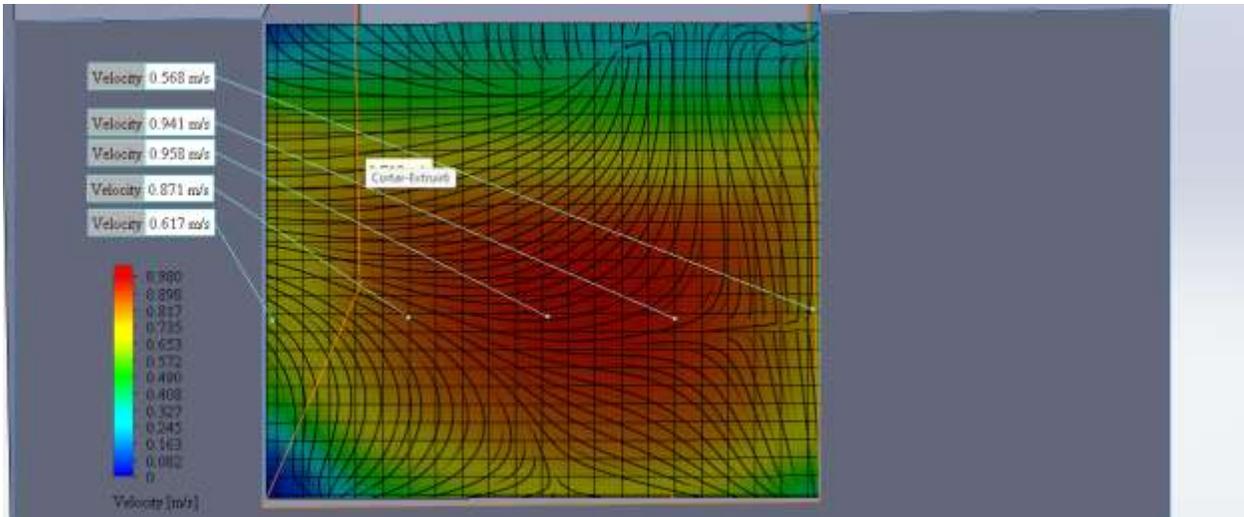
**Tabla: 18:** Velocidades en canal de entrada.

Tirante "y"	0,66 m	SECCIÓN EN CANAL DE ENTRADA "60cm"				
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5
		0,10 m	0,20 m	0,30 m	0,40 m	0,50 m
Profundidad (m)		velocidad leída en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad				
		1	2	3	4	5
0,6 y	0,396	0,685	0,951	1,014	0,951	0,72

**Fuente:** Elaboración propia.

En esta sección, se observa que las velocidades más altas se concentran en la parte media del canal, lo cual es un comportamiento típico en flujos confinados debido a la distribución del esfuerzo cortante en las paredes del canal. Este fenómeno ocurre porque la resistencia al flujo es mayor en las zonas cercanas a las paredes del canal, donde la fricción es más significativa, lo que provoca que las velocidades disminuyan en estas áreas.

Esta distribución de velocidades es una característica común de los perfiles de velocidad en flujos laminares o turbulentos dentro de canales abiertos.



**Figura 5.18 Sección canal de entrada con transición.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

**Tabla: 19: Velocidades en canal de entrada con transición.**

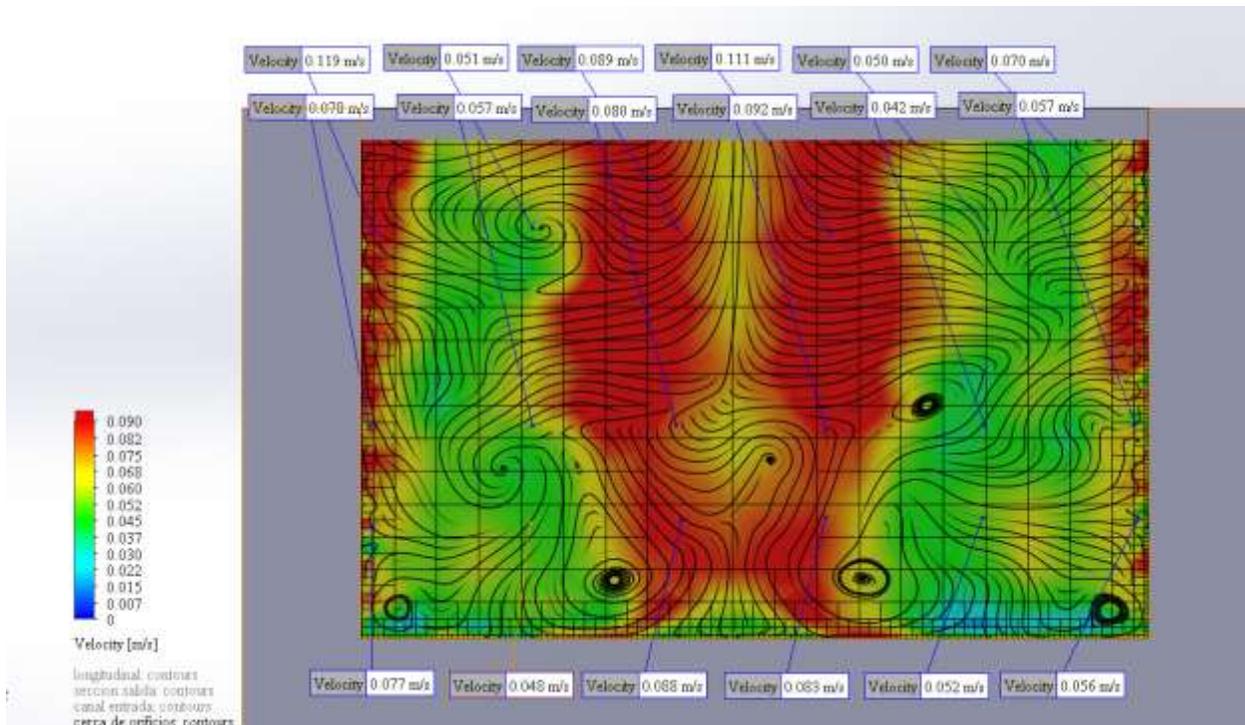
Tirante "y"	0,53 m	SECCIÓN DE ENTRADA CON TRANSICIÓN "85cm"				
Distancia de pared (m) horizontal	1		2		3	
	0,14 m	0,28 m	0,42 m	0,56 m	0,71 m	
Profundidad (m)	velocidad lecionada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
	1	2	3	4	5	
0,6 y	0,318	0,568	0,941	0,958	0,871	0,617

**Fuente:** Elaboración propia.

En el canal de entrada con transición, se observa que las velocidades más elevadas tienden a concentrarse en el centro de la sección del canal. Este comportamiento es característico de los flujos en canales abiertos, donde la mayor energía cinética se encuentra alejada de las paredes debido a la menor fricción hidráulica en esta zona.

Por otro lado, en las esquinas del canal, se nota una ligera disminución de las velocidades. Este fenómeno ocurre debido al efecto combinado de la resistencia al flujo generada por las paredes y el fondo del canal, lo que crea una gradiente de velocidad hacia los bordes.

La distribución de velocidades en esta sección, ilustrada en la figura correspondiente, es necesario para comprender el comportamiento hidráulico del flujo.



**Figura 5.19 Sección entrada a la zona de sedimentación.**

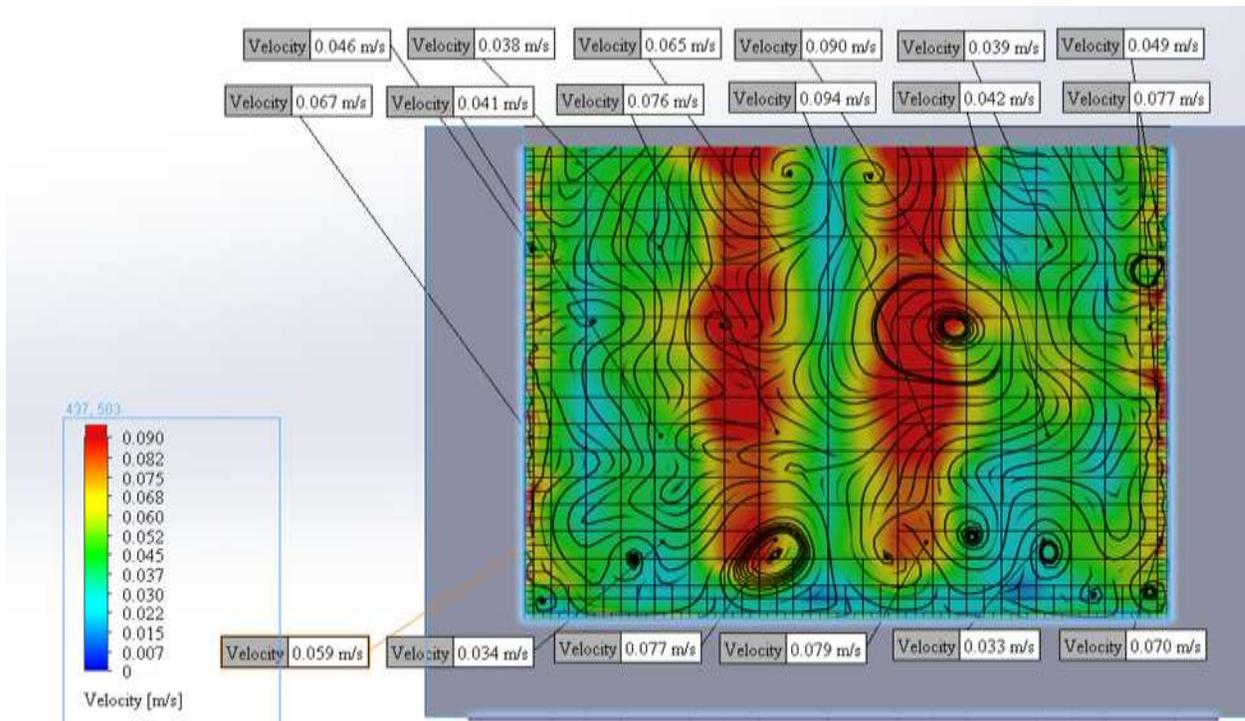
Fuente: Elaboración propia con ayuda de solidworks.

**Tabla: 20: Velocidades en la entrada a la zona de sedimentación.**

Tirante "y"	2,56 m	SECCIÓN EN LA ENTRADA A LA ZONA DE SEDIMENTACIÓN					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad letrada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,512	0,119	0,051	0,089	0,111	0,05	0,07
0,6 y	1,536	0,078	0,057	0,08	0,092	0,042	0,057
0,8 y	2,048	0,077	0,048	0,088	0,083	0,052	0,056

Fuente: Elaboración propia.

En esta sección, las velocidades del flujo disminuyen, logrando una distribución más uniforme. Se observa una reducción notable cerca de la base, favoreciendo el depósito de partículas densas, mientras que un leve aumento en las paredes laterales se debe al rebote del flujo, que genera pequeñas corrientes secundarias.



**Figura 5.20 Sección zona media de sedimentación.**

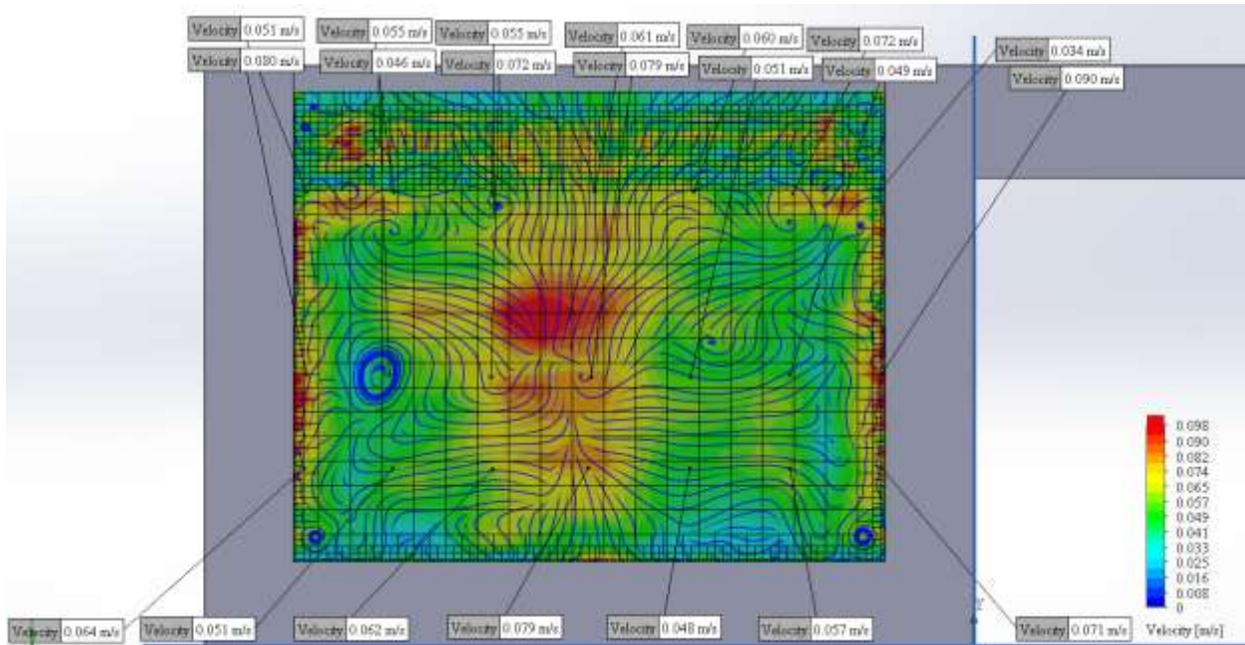
**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

**Tabla: 21: Velocidades en zona media de sedimentación.**

Tirante "y"	2,7 m	SECCIÓN ZONA MEDIA DE SEDIMENTACIÓN					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)	velocidad leída en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad						
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,525	0,046	0,038	0,065	0,09	0,039	0,049
0,6 y	1,575	0,067	0,041	0,076	0,094	0,042	0,077
0,8 y	2,1	0,059	0,034	0,077	0,079	0,033	0,07

**Fuente:** Elaboración propia.

En la zona media del sedimentador, las velocidades del flujo son bajas y uniformes, creando condiciones óptimas para la sedimentación de partículas. Aunque se observan pequeños remolinos que reflejan el comportamiento natural del flujo, estas perturbaciones presentan velocidades mínimas que no interfieren significativamente con el proceso de asentamiento de las partículas suspendidas.



**Figura 5.21 Sección en la zona de salida de sedimentación.**

Fuente: Elaboración propia con ayuda de solidworks.

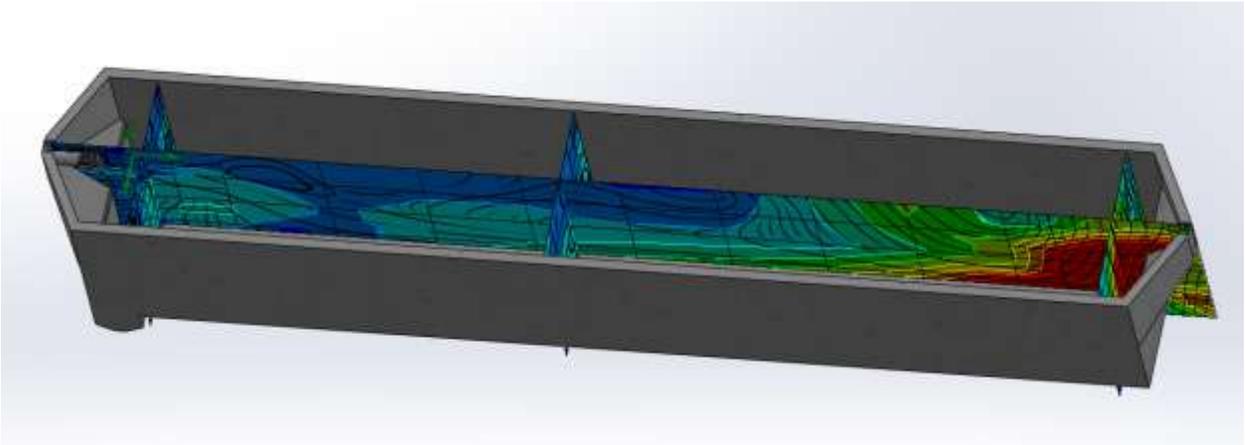
**Tabla: 22: Velocidades en zona de salida de sedimentación.**

Tirante "y"	3,1 m	SECCIÓN EN ZONA DE SALIDA					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad leída en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,536	0,051	0,055	0,055	0,061	0,072	0,034
0,6 y	1,608	0,08	0,046	0,072	0,079	0,049	0,09
0,8 y	2,144	0,064	0,051	0,062	0,079	0,057	0,071

Fuente: Elaboración propia con ayuda de solidworks.

En la salida del sedimentador, se puede apreciar cómo se comporta el flujo en esta sección, donde incluso los remolinos con bajas velocidades ya no se presentan. Las velocidades muy bajas ideales para el proceso de sedimentación, permitiendo que las partículas más pesadas se depositen completamente en el fondo del tanque. La ausencia de turbulencia y el control preciso de la velocidad del flujo evidencian la eficiencia del diseño hidrodinámico en esta etapa final del proceso de decantación.

- **Vista tridimensional de las secciones.**



**Figura 6.35: Vista isométrica del desarenador.**

**Fuente:** Elaboración propia con ayuda de solidworks.

En esta vista tridimensional, se puede observar claramente cómo el flujo entra al desarenador de manera brusca y con una velocidad alta, lo cual se representa en el gráfico mediante un color rojo. Esta alta velocidad inicial es característica de los flujos no controlados o con una configuración geométrica menos eficiente, lo que podría generar problemas como turbulencias o recirculaciones que afectan la eficiencia del proceso.

Sin embargo, a medida que el flujo avanza a lo largo del desarenador, se puede apreciar cómo las velocidades disminuyen de forma uniforme. Este comportamiento es indicativo de una mejora en el diseño, que permite que el flujo se distribuya de manera más eficiente, favoreciendo una mejor sedimentación de las partículas sólidas en suspensión. La reducción gradual de la velocidad a lo largo del sistema contribuye a la estabilización del flujo, lo que optimiza el rendimiento hidráulico y aumenta la efectividad del proceso de separación.

Esta representación gráfica proporciona una visión clara de la evolución del flujo y muestra cómo el nuevo diseño ha logrado reducir las velocidades en las zonas clave del desarenador, mejorando su eficiencia y funcionalidad. Esta vista tridimensional se puede apreciar como el flujo entra de manera brusca con una velocidad alta representado en el gráfico con un color rojo, pero a lo largo del desarenador se ve cómo va disminuyendo de manera uniforme.

### 6.9.1 Resultados de Velocidades.

**Tabla: 23: Velocidades de secciones de control.**

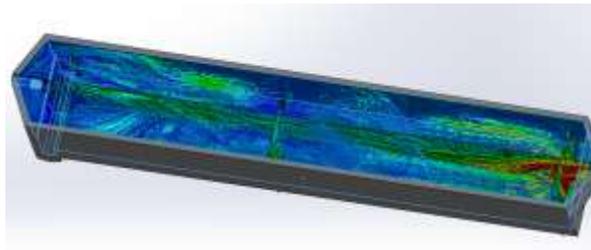
VELOCIDADES LECTURADAS EN DESARENADOR CON AYUDA DEL SOFTWARE "Q = 339 L/S"							
Tirante "y"	3,1m	SECCIÓN EN ZONA DE SALIDA					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad lecionada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,536	0,051	0,055	0,055	0,061	0,072	0,034
0,6 y	1,608	0,08	0,046	0,072	0,079	0,049	0,09
0,8 y	2,144	0,064	0,051	0,062	0,079	0,057	0,071
Tirante "y"	2,7m	SECCIÓN ZONA MEDIA DE SEDIMENTACIÓN					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad lecionada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,525	0,046	0,038	0,065	0,09	0,039	0,049
0,6 y	1,575	0,067	0,041	0,076	0,094	0,042	0,077
0,8 y	2,1	0,059	0,034	0,077	0,079	0,033	0,07
Tirante "y"	2,56m	SECCIÓN EN LA ENTRADA A LA ZONA DE SEDIMENTACIÓN					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad lecionada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,512	0,119	0,051	0,089	0,111	0,05	0,07
0,6 y	1,536	0,078	0,057	0,08	0,092	0,042	0,057
0,8 y	2,048	0,077	0,048	0,088	0,083	0,052	0,056
Tirante "y"	0,53m	SECCIÓN DE ENTRADA CON TRANSICIÓN "85cm"					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	
		0,14 m	0,28 m	0,42 m	0,56 m	0,71 m	
Profundidad (m)		velocidad lecionada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	
0,6 y	0,318	0,568	0,941	0,958	0,871	0,617	
Tirante "y"	0,66m	SECCIÓN EN CANAL DE ENTRADA "60cm"					

Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5
		0,10 m	0,20 m	0,30 m	0,40 m	0,50 m
Profundidad (m)		velocidad lecturada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad				
		1	2	3	4	5
0,6 y	0,396	0,685	0,951	1,014	0,951	0,72

Fuente: Elaboración propia.

Se puede ver la disipación de velocidades a lo largo de la estructura

### 6.9.2 Comportamiento del Flujo.

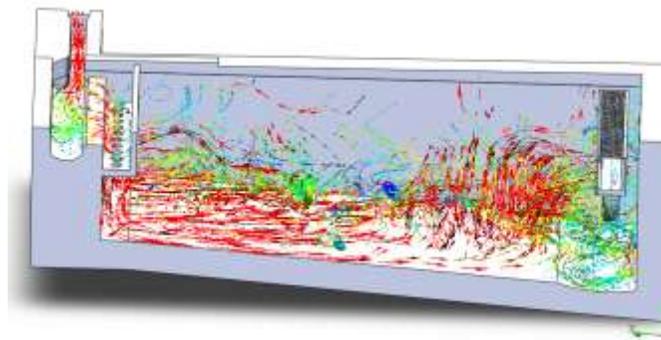


**Figura 5.22 Trayectoria de flujo.**

Fuente: Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

Se pudo apreciar una distribución uniforme de las velocidades a lo largo del desarenador. A medida que el flujo avanzaba por el sistema, las velocidades se distribuyeron de manera más equilibrada, lo que indica una mejora significativa en el control hidráulico. Esta distribución uniforme es fundamental para optimizar el proceso de sedimentación, ya que asegura que las partículas sólidas en suspensión tengan el tiempo y las condiciones adecuadas para sedimentarse correctamente sin que el flujo genere zonas de alta velocidad que puedan interferir con el proceso.

### 6.9.3 Desarenador Actual.



**Figura 5.23 Corte longitudinal, dirección de flujo.**

Fuente: Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

**Tabla: 24: Velocidades de las secciones de control.**

VELOCIDADES LECTURADAS EN DESARENADOR CON AYUDA DEL SOFTWARE "Q = 339 L/S"							
Tirante "y"	3,1m	SECCIÓN EN ZONA DE SALIDA					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)	velocidad lecionada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad						
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,536	0,398	0,349	0,289	0,283	0,307	0,322
0,6 y	1,608	0,263	0,225	0,223	0,196	0,182	0,155
0,8 y	2,144	0,218	0,228	0,18	0,142	0,119	0,114
Tirante "y"	2,7m	SECCIÓN ZONA MEDIA DE SEDIMENTACIÓN					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)	velocidad lecionada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad						
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,525	0,137	0,133	0,127	0,123	0,123	0,105
0,6 y	1,575	0,164	0,241	0,213	0,182	0,152	0,118
0,8 y	2,1	0,294	0,306	0,268	0,194	0,15	0,121
Tirante "y"	2,56m	SECCIÓN EN LA ENTRADA A LA ZONA DE SEDIMENTACIÓN					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)	velocidad lecionada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad						
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,512	0,034	0,107	0,119	0,051	0,064	0,053
0,6 y	1,536	0,228	0,232	0,132	0,091	0,057	0,038
0,8 y	2,048	0,182	0,369	0,249	0,109	0,043	0,027
Tirante "y"	0,53m	SECCIÓN DE ENTRADA CON TRANSICIÓN "85cm"					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	
		0,14 m	0,28 m	0,42 m	0,56 m	0,71 m	
Profundidad (m)	velocidad lecionada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad						
		1	2	3	4	5	

0,6 y	0,318	0,74	0,822	0,619	0,425	0,28
Tirante "y"	0,66m	SECCIÓN EN CANAL DE ENTRADA "60cm"				
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5
		0,10 m	0,20 m	0,30 m	0,40 m	0,50 m
Profundidad (m)		velocidad letrurada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad				
		1	2	3	4	5
0,6 y	0,396	0,842	0,871	0,816	0,871	0,842

Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar que las velocidades más altas se presentan en la base del desarenador la causa son los orificios al ingresar a la zona de sedimentación.

#### 6.9.4 Desarenador Optimizado.

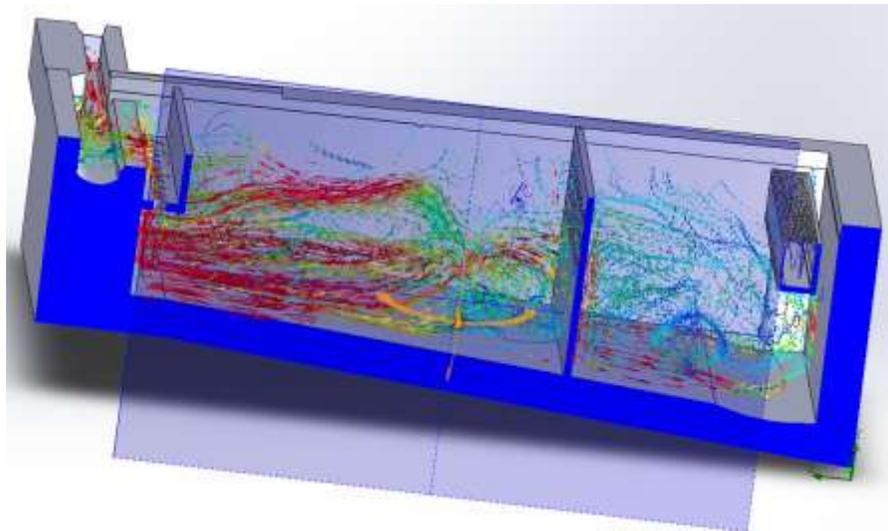


Figura 5.24 Corte longitudinal, dirección de flujo.

Fuente: Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

Tabla: 25: Velocidades en las secciones de control del diseño optimizado.

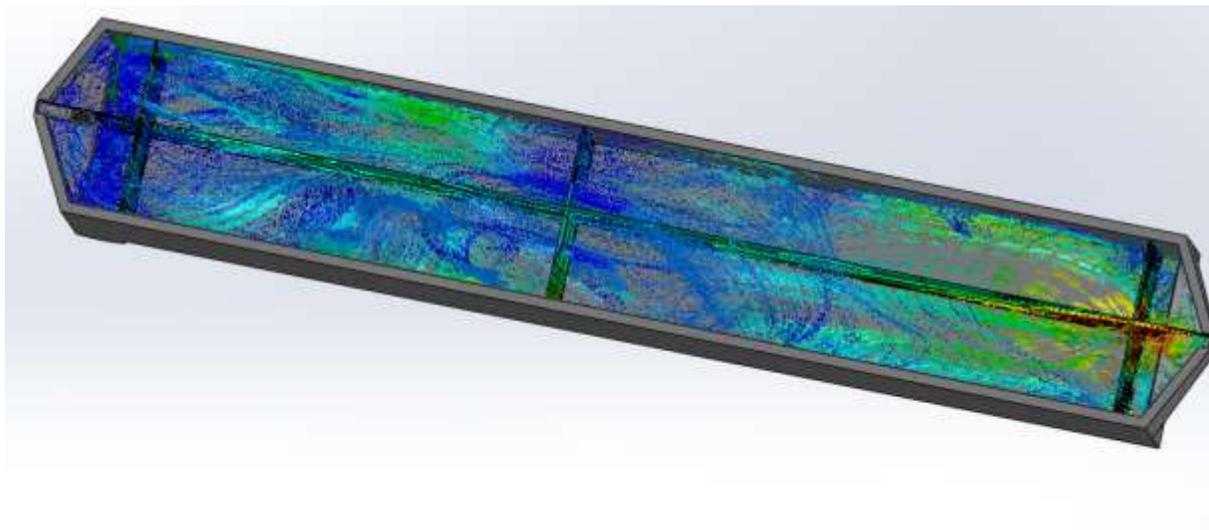
VELOCIDADES LECTURADAS EN DESARENADOR CON AYUDA DEL SOFTWARE "Q = 339 L/S"						
Tirante "y"	3,1m	SECCIÓN EN ZONA DE SALIDA				
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m

Profundidad (m)		velocidad leída en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,536	0,036	0,112	0,137	0,113	0,084	0,025
0,6 y	1,608	0,024	0,067	0,064	0,067	0,072	0,056
0,8 y	2,144	0,015	0,056	0,063	0,069	0,077	0,076
Tirante "y"	2,7m	<b>SECCIÓN ZONA MEDIA DE SEDIMENTACIÓN</b>					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad leída en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,525	0,045	0,143	0,139	0,125	0,112	0,037
0,6 y	1,575	0,065	0,205	0,199	0,149	0,109	0,034
0,8 y	2,1	0,073	0,228	0,221	0,149	0,101	0,042
Tirante "y"	2,56m	<b>SECCIÓN EN LA ENTRADA A LA ZONA DE SEDIMENTACIÓN</b>					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad leída en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,512	0,056	0,149	0,056	0,062	0,062	0,014
0,6 y	1,536	0,33	0,429	0,311	0,101	0,048	0,021
0,8 y	2,048	0,143	0,931	0,327	0,105	0,042	0,014
Tirante "y"	0,53m	<b>SECCIÓN DE ENTRADA CON TRANSICIÓN "85cm"</b>					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	
		0,14 m	0,28 m	0,42 m	0,56 m	0,71 m	
Profundidad (m)		velocidad leída en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	
0,6 y	0,318	0,938	1,002	0,788	0,378	0,34	
Tirante "y"	0,66m	<b>SECCIÓN EN CANAL DE ENTRADA "60cm"</b>					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	
		0,10 m	0,20 m	0,30 m	0,40 m	0,50 m	
Profundidad (m)		velocidad leída en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	
0,6 y	0,396	0,827	0,828	0,828	0,828	0,828	

Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar que si bien se reduce las velocidades al pasar la pantalla que se utilizó para optimizar el desarenador, antes de atravesarla las velocidades y direcciones del flujo varían bruscamente volviéndolo un flujo multidireccional y en algunas zonas generando recirculación Pero de la pantalla en adelante al atravesar los orificios reduce su velocidad y se estabiliza.

### 6.9.5 Desarenador con Nuevo Diseño.



**Figura 5.25 Sección de desarenador, dirección de flujo.**

Fuente: Elaboración propia con ayuda de Solidworks.

**Tabla: 26: Velocidades en desarenador, nuevo diseño.**

VELOCIDADES LECTURADAS EN DESARENADOR CON AYUDA DEL SOFTWARE "Q = 339 L/S"							
Tirante "y"	3,1m	SECCIÓN EN ZONA DE SALIDA					
Distancia de pared (m) horizontal	0 m	1	2	3	4	5	6
		1m	2 m	3 m	4 m	5 m	
Profundidad (m)	velocidad lecionada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad						
	1	2	3	4	5	6	
0,2 y	0,536	0,051	0,055	0,055	0,061	0,072	0,034
0,6 y	1,608	0,08	0,046	0,072	0,079	0,049	0,09
0,8 y	2,144	0,064	0,051	0,062	0,079	0,057	0,071
Tirante "y"	2,7m	SECCIÓN ZONA MEDIA DE SEDIMENTACIÓN					
Distancia de pared (m) horizontal	0 m	1	2	3	4	5	6
		1m	2 m	3 m	4 m	5 m	
Profundidad (m)	velocidad lecionada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad						

		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,525	0,046	0,038	0,065	0,09	0,039	0,049
0,6 y	1,575	0,067	0,041	0,076	0,094	0,042	0,077
0,8 y	2,1	0,059	0,034	0,077	0,079	0,033	0,07
Tirante "y"	2,56m	SECCIÓN EN LA ENTRADA A LA ZONA DE SEDIMENTACIÓN					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		velocidad letrada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,512	0,119	0,051	0,089	0,111	0,05	0,07
0,6 y	1,536	0,078	0,057	0,08	0,092	0,042	0,057
0,8 y	2,048	0,077	0,048	0,088	0,083	0,052	0,056
Tirante "y"	0,53m	SECCIÓN DE ENTRADA CON TRANSICIÓN "85cm"					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	
		0,14 m	0,28 m	0,42 m	0,56 m	0,71 m	
Profundidad (m)		velocidad letrada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	
0,6 y	0,318	0,568	0,941	0,958	0,871	0,617	
Tirante "y"	0,66m	SECCIÓN EN CANAL DE ENTRADA "60cm"					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	
		0,10 m	0,20 m	0,30 m	0,40 m	0,50 m	
Profundidad (m)		velocidad letrada en (m/s), Dist. Horizontal / profundidad					
		1	2	3	4	5	
0,6 y	0,396	0,685	0,951	1,014	0,951	0,72	

Fuente: Elaboración propia.

Aquí se puede observar que al cambiar las dimensiones del desarenador y quitando la pantalla que se encontrar al ingresar a la zona de sedimentación la cual dirigía el flujo hacia la base del desarenador

### 6.10 Comparación de Velocidades.

Se llevó a cabo una comparación detallada de las velocidades obtenidas en tres diseños distintos: el diseño actual, el diseño con pantalla optimizada, y el nuevo diseño propuesto. A continuación, se resumen las principales observaciones derivadas de esta comparación:

Se realizó una evaluación de la reducción de velocidades a lo largo del desarenador, utilizando

varios puntos de control clave para obtener un análisis preciso del comportamiento del flujo. Los puntos de control considerados fueron los siguientes:

- **Canal de entrada:** Este punto representó el inicio del flujo dentro del desarenador, donde las velocidades del agua fueron registradas antes de que el flujo interaccionara con la estructura del desarenador.
- **Canal de transición:** En este punto, el flujo comenzó a experimentar una transición hacia la zona de sedimentación, lo que permitió observar cómo las modificaciones en el diseño afectaban el comportamiento del flujo en esta fase intermedia.
- **Inicio de la zona de sedimentación:** Aquí se evaluó cómo las velocidades del flujo variaban al ingresar a la zona de sedimentación, donde el proceso de separación de partículas comienza a ser más efectivo.
- **Medio de la zona de sedimentación:** En este punto se analizó el comportamiento del flujo en la parte intermedia de la zona de sedimentación, un área crucial para determinar la eficiencia del proceso de sedimentación y la distribución de velocidades.
- **Salida de la zona de sedimentación:** Finalmente, se registraron las velocidades en la salida de la zona de sedimentación, ubicada cerca del canal recolector de salida, para evaluar cómo las modificaciones en el diseño influían en la salida del flujo y en la eficacia global del proceso de sedimentación.

### 6.10.1 Comparación de Velocidades: Estructura Actual vs. Estructura Optimizada con Pantalla.

Se realizó una comparación detallada de las velocidades obtenidas en tres diseños distintos del desarenador: el diseño actual, el diseño con pantalla optimizada y el nuevo diseño propuesto. Esta comparación tuvo como objetivo evaluar cómo las diferentes modificaciones en la estructura del desarenador afectaban el comportamiento del flujo.

se muestra el porcentaje de variación de la estructura optimizada con pantalla respecto a la estructura actual.

**Tabla: 27: Porcentaje de variación en estructura actual vs estructura optimizada.**

ESTRUCTURA OPTIMIZADA CON PANTALLA		
VELOCIDADES LECTURADAS EN DESARENADOR CON AYUDA DEL SOFTWARE "Q = 339 L/S"		
Tirante "y"	3,1m	SECCIÓN EN ZONA DE SALIDA

Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		PORCENTAJE DE VARIACIÓN					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,536	91%	68%	53%	60%	73%	92%
0,6 y	1,608	91%	70%	71%	66%	60%	64%
0,8 y	2,144	93%	75%	65%	51%	35%	33%
Tirante "y"	2,7m	SECCIÓN ZONA MEDIA DE SEDIMENTACIÓN					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		PORCENTAJE DE VARIACIÓN					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,525	67%	-8%	-9%	-2%	9%	65%
0,6 y	1,575	60%	15%	7%	18%	28%	71%
0,8 y	2,1	75%	25%	18%	23%	33%	65%
Tirante "y"	2,56m	SECCIÓN EN LA ENTRADA A LA ZONA DE SEDIMENTACIÓN					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		PORCENTAJE DE VARIACIÓN					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,512	-65%	-39%	53%	-22%	3%	74%
0,6 y	1,536	-45%	-85%	-136%	-11%	16%	45%
0,8 y	2,048	21%	-152%	-31%	4%	2%	48%
Tirante "y"	0,53m	SECCIÓN DE ENTRADA CON TRANSICIÓN "85cm"					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	
		0,14 m	0,28 m	0,42 m	0,56 m	0,71 m	
Profundidad (m)		PORCENTAJE DE VARIACIÓN					
		1	2	3	4	5	
0,6 y	0,318	-27%	-22%	-27%	11%	-21%	
Tirante "y"	0,66m	SECCIÓN EN CANAL DE ENTRADA "60cm"					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	
		0,10 m	0,20 m	0,30 m	0,40 m	0,50 m	
Profundidad (m)		PORCENTAJE DE VARIACIÓN					

		1	2	3	4	5
0,6 y	0,396	2%	5%	-1%	5%	2%

Fuente: Elaboración propia.

Se pudo observar la variación porcentual en las velocidades en cada uno de los puntos de control. Un porcentaje positivo indicó que la velocidad del flujo se había reducido en ese punto, lo que es indicativo de una mejora en el control del flujo y una mayor eficiencia del desarenador en esa zona. En contraste, un porcentaje negativo reflejó un aumento en la velocidad, lo que sugirió que el diseño no logró reducir las velocidades en ese punto específico.

A través del análisis de estas variaciones porcentuales, se identificó un patrón claro que destacó una mejora significativa en la reducción de las velocidades a lo largo del desarenador. Esto sugiere que, en general, las modificaciones realizadas en los diseños optimizados contribuyeron positivamente a la eficiencia hidráulica del sistema, logrando reducir las velocidades en las zonas críticas, lo que a su vez favoreció el proceso de sedimentación.

Este patrón de reducción de velocidades a través de los puntos de control refleja el éxito de las modificaciones implementadas en los diseños, especialmente en aquellas áreas donde la sedimentación es fundamental para el funcionamiento del desarenador.

### 6.10.2 Comparación de Velocidades Estructura Actual vs Estructura Nuevo Diseño.

**Tabla: 28: Porcentaje de variación en estructura con nuevo diseño vs estructura actual.**

ESTRUCTURA CON NUEVO DISEÑO							
VELOCIDADES LECTURADAS EN DESARENADOR CON AYUDA DEL SOFTWARE "Q = 339 L/S"							
Tirante "y"	3,1m	SECCIÓN EN ZONA DE SALIDA					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		PORCENTAJE DE VARIACIÓN					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,536	87%	84%	81%	78%	77%	89%
0,6 y	1,608	70%	80%	68%	60%	73%	42%
0,8 y	2,144	71%	78%	66%	44%	52%	38%
Tirante "y"	2,7m	SECCIÓN ZONA MEDIA DE SEDIMENTACIÓN					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		PORCENTAJE DE VARIACIÓN					
		1	2	3	4	5	6

0,2 y	0,525	66%	71%	49%	27%	68%	53%
0,6 y	1,575	59%	83%	64%	48%	72%	35%
0,8 y	2,1	80%	89%	71%	59%	78%	42%
Tirante "y"	2,56m	SECCIÓN EN LA ENTRADA A LA ZONA DE SEDIMENTACIÓN					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	6
		0 m	1m	2 m	3 m	4 m	5 m
Profundidad (m)		PORCENTAJE DE VARIACIÓN					
		1	2	3	4	5	6
0,2 y	0,512	-250%	52%	25%	-118%	22%	-32%
0,6 y	1,536	66%	75%	39%	-1%	26%	-50%
0,8 y	2,048	58%	87%	65%	24%	-21%	-107%
Tirante "y"	0,53m	SECCIÓN DE ENTRADA CON TRANSICIÓN "85cm"					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	
		0,14 m	0,28 m	0,42 m	0,56 m	0,71 m	
Profundidad (m)		PORCENTAJE DE VARIACIÓN					
		1	2	3	4	5	
0,6 y	0,318	23%	-14%	-55%	-105%	-120%	
Tirante "y"	0,66m	SECCIÓN EN CANAL DE ENTRADA "60cm"					
Distancia de pared (m) horizontal		1	2	3	4	5	
		0,10 m	0,20 m	0,30 m	0,40 m	0,50 m	
Profundidad (m)		PORCENTAJE DE VARIACIÓN					
		1	2	3	4	5	
0,6 y	0,396	19%	-9%	-24%	-9%	14%	

**Fuente:** Elaboración propia.

El nuevo diseño propuesto mostró una mejora significativa en comparación con los diseños anteriores, ya que presentó las velocidades más bajas en todas las secciones del desarenador. Esta reducción de las velocidades se tradujo directamente en una mejora sustancial en la eficiencia de sedimentación, ya que permitió una mejor retención de las partículas sólidas en suspensión, favoreciendo el proceso de separación y aumentando la capacidad del desarenador para eliminar los sedimentos de manera más efectiva.

### 6.11 Planos de Desarenador (Nuevo Diseño).

Las dimensiones de este nuevo desarenador se pueden apreciar al final de anexos, donde se incluyen una vista isométrica en corte, en la que es posible observar la distribución del acero, así como una vista en planta y los cortes A-A y B-B. Además, se presentan detalles específicos de la cámara, junto con una vista frontal y una vista lateral izquierda. Esta variedad de perspectivas permite un análisis detallado de la geometría y configuración estructural del desarenador, proporcionando una comprensión completa de su diseño y características técnicas desde múltiples ángulos de visualización.

- **Cronograma de actividades.**

**Tabla: 29: Cronograma de actividades.**

#### CRONOGRAMA DE EJECUCIÓN FÍSICA

N°	DESCRIPCIÓN	Und.	MES 1				MES 2				MES 3						
			1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4			
	<b>DESARENADOR</b>																
1	REPLANTEO DE ESTRUCTURAS Y EDIFICACIONES	m²		X													
2	REPLANTEO Y CONTROL DE LINEAS DE TUBERÍA	m		X													
3	EXCAVACIÓN CON RETROEXCAVADORAS	m³			X												
4	H°.A°. BASE H20 NBH-87	m³				X	X										
5	H°.A°. MUROS H20 NBH-87	m³						X	X	X							
6	PROV. COLOCACIÓN DE ACCESORIOS LLAVE DE PASO F.F. 8 Pulg	pza										X					
7	PROV. Y TENDIDO DE TUBERÍA PVC D=8" - C-6 (JUNTA DE GOMA)	m										X					
8	CAMA DE ARENA PARA ASIENTO DE TUBERÍA	m³											X				
9	RELLENO Y COMPACTADO CON MATERIAL SELECCIONADO	m³											X				
10	RELLENO COMPACT. C/SALTARIN CON TIERRA COMÚN	m³											X				
11	H°.A°. CAMARA	m³												X	X		
12	DEMOLICIÓN MAMPOSTERÍA DE PIEDRA/CEMENTO	m³	X														

**Fuente:** Elaboración Propia

- **Cómputos métricos de desarenador**

**Tabla: 30: Cómputos métricos de desarenador.**

COMPUTOS MÉTRICOS

DESARENADOR

N°	ACTIVIDAD	UNIDAD	PARTES IGUALES	LARGO	ANCHO/DIAMETRO	ALTO	AREA	PARCIAL	TOTAL
				m	m	m	m <sup>2</sup>		
1	REPLANTEO DE ESTRUCTURAS Y EDIFICACIONES								184,72
	DESARENADOR	m <sup>2</sup>	1	33,91	5,40			183,11	
	CAMARA		1	1,40	1,15			1,61	
2	REPLANTEO Y CONTROL DE LINEAS DE TUBERÍA								24,00
	TUBO PVC 8" CLASE 6	m	1	24,00				24,00	
3	EXCAVACIÓN CON RETROEXCAVADORAS								686,05
	DESARENADOR (CON SOBRECANTO DE 1 METRO)		1	35,91	7,40	2,50		664,34	
	TUBO PVC 8" CLASE 6	m <sup>3</sup>	1	24,00	0,60	1,00		14,40	
	CAMARA		1	2,15	3,40	1,00		7,31	
4	H°.A°. BASE H20 NBH-87	m <sup>3</sup>							33,26
	CANAL		2	2,00	0,80	0,20		0,64	
	T. ENTRADA		1			0,20	3,59	0,72	
	DESARENADOR		1	31,00	5,00	0,20		31,00	
	T. SALIDA		1			0,20	3,59	0,72	
	CAMARA		1	1,00	0,95	0,20		0,19	
5	H°.A°. MUROS H20 NBH-87	m <sup>3</sup>							54,46
	CANAL		2	2,00	0,20	1,00		0,80	
	T. ENTRADA		2			1,50	0,55	1,66	
	DESARENADOR		2	31,00	0,20	4,00		49,60	
	T.SALIDA		2			1,50	0,55	1,66	
	CAMARA		2	1,15	0,20	1,00		0,46	
			1	1,40	0,20	1,00		0,28	
6	PROVISIÓN Y COLOCADO DE ACCESORIOS LLAVE DE PASO	pza	1					1,00	1,00
7	PROV. Y TENDIDO DE TUBERIA PVC 8" - C-6 (JUNTA DE GOMA)	m	1	24,00				24	24
8	CAMA DE ARENA PARA ASIENTO DE TUBERÍA	m <sup>3</sup>	1	24,00	0,6	0,1		1,44	1,44
9	RELLENO Y COMPACTADO CON MATERIAL SELECCIONADO	m <sup>3</sup>	1	24,00	0,6	0,4		5,76	5,76
10	RELLENO COMPACT. C/SALTARIN CON TIERRA COMÚN	m <sup>3</sup>							186,75
	EN TUBERÍA		1	24,00	0,6	0,5		7,20	
	LATERALES EXTERIORES DEL DESARENADOR		2	35,91	1	2,5		179,55	
11	H°.A°. CAMARA	m <sup>3</sup>							1,23
	LOSA PASARELA DESARENADOR		1	2,00	5,40	0,10		1,08	
	TAPA DE LA CAMARA DE LLAVES		1	1,40	1,35	0,08		0,15	
12	DEMOLICIÓN MAMPOSTERIA DE PIEDRA/CEMENTO	m <sup>3</sup>							14,26
	BASE		1	35,66	0,8	0,2		5,71	
	MUROS		2	35,66	0,2	0,6		8,56	

Fuente: Elaboración propia

- **Precio unitario**

**Tabla: 31: Ítem 1.**

**1**      **Item: REPLANTEO DE ESTRUCTURAS Y EDIFICACIONES**      **Unidad: m<sup>2</sup>**  
**Proyecto: DESARENADOR**      **Fecha : 12/11/2024**  
**Módulo: (M02) - DESARENADOR**      **Tipo de cambio: 6,96 Bs/USD**

Nº	P.	Insumo/Parámetro	Und.	Cant.	Unit. (Bs)	Parcial (Bs)
	<b>A</b>	<b>MATERIALES</b>				
1	-	VARIOS DE REPLANTEO	glb	1,00	2,67	2,67
>	<b>D</b>	<b>TOTAL MATERIALES</b>			<b>(A) =</b>	<b>2,67</b>
	<b>B</b>	<b>MANO DE OBRA</b>				
1	-	TOPÓGRAFO	h	0,04	20,00	0,80
2	-	PEÓN	h	0,04	12,00	0,48
>	<b>E</b>	<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>			<b>(B) =</b>	<b>1,28</b>
	F	Cargas Sociales		55,00% de	(E) =	0,70
	O	Impuesto al Valor Agregado		14,94% de	(E+F) =	0,30
>	<b>G</b>	<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>			<b>(E+F+O) =</b>	<b>2,28</b>
	<b>C</b>	<b>EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTA</b>				
	H	Herramientas menores		5,00% de	(G) =	0,11
>	<b>I</b>	<b>TOTAL HERRAMIENTAS Y EQUIPO</b>			<b>(C+H) =</b>	<b>0,11</b>
>	<b>J</b>	<b>SUB TOTAL</b>			<b>(D+G+I) =</b>	<b>5,06</b>
	L	Gastos grales. y administrativos		10,00% de	(J) =	0,51
	M	Utilidad		10,00% de	(J+L) =	0,56
>	<b>N</b>	<b>PARCIAL</b>			<b>(J+L+M) =</b>	<b>6,13</b>
	P	Impuesto a las Transacciones		3,09% de	(N) =	0,19
>	<b>Q</b>	<b>TOTAL PRECIO UNITARIO</b>			<b>(N+P) =</b>	<b>6,32</b>
>		<b>PRECIO ADOPTADO:</b>				<b>6,32</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla: 32: Ítem 2.**

2      **Item: REPLANTEO Y CONTROL DE LINEAS DE TUBERÍA**      **Unidad: m**  
**Proyecto: DESARENADOR**      **Fecha : 12/11/2024**  
**Módulo: (M02) - DESARENADOR**      **Tipo de cambio: 6,96 Bs/USD**

N°	P.	Insumo/Parámetro	Und.	Cant.	Unit. (Bs)	Parcial (Bs)
	A	MATERIALES				
1	-	ESTACAS(2X2X0.30)	pza	2,00	1,69	3,38
>	<b>D</b>	<b>TOTAL MATERIALES</b>			<b>(A) =</b>	<b>3,38</b>
	B	MANO DE OBRA				
1	-	TOPÓGRAFO	h	0,01	17,50	0,18
2	-	ALARIFE	h	0,01	12,00	0,12
	-					
>	<b>E</b>	<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>			<b>(B) =</b>	<b>0,30</b>
	F	Cargas Sociales		55,00% de	(E) =	0,16
	O	Impuesto al Valor Agregado		14,94% de	(E+F) =	0,07
>	<b>G</b>	<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>			<b>(E+F+O) =</b>	<b>0,53</b>
	C	EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTA				
	H	Herramientas menores		5,00% de	(G) =	0,03
>	<b>I</b>	<b>TOTAL HERRAMIENTAS Y EQUIPO</b>			<b>(C+H) =</b>	<b>0,03</b>
>	<b>J</b>	<b>SUB TOTAL</b>			<b>(D+G+I) =</b>	<b>3,93</b>
	L	Gastos grales. y administrativos		10,00% de	(J) =	0,39
	M	Utilidad		10,00% de	(J+L) =	0,43
>	<b>N</b>	<b>PARCIAL</b>			<b>(J+L+M) =</b>	<b>4,76</b>
	P	Impuesto a las Transacciones		3,09% de	(N) =	0,15
>	<b>Q</b>	<b>TOTAL PRECIO UNITARIO</b>			<b>(N+P) =</b>	<b>4,90</b>
>		<b>PRECIO ADOPTADO:</b>				<b>4,90</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla: 33: Ítem 3.**

**3**      **Item: EXCAVACIÓN CON RETROEXCAVADORAS**      **Unidad: m<sup>3</sup>**  
**Proyecto: DESARENADOR**      **Fecha : 12/11/2024**  
**Módulo: (M02) - DESARENADOR**      **Tipo de cambio: 6,96 Bs/USD**

N°	P.	Insumo/Parámetro	Und.	Cant.	Unit. (Bs)	Parcial (Bs)
	A	MATERIALES				
		RETROEXCAVADORA,	h	0,06	210,00	12,60
>	<b>D</b>	<b>TOTAL MATERIALES</b>			<b>(A) =</b>	<b>12,60</b>
	B	MANO DE OBRA				
1	-	OPERADOR DE EQUIPO PESADO	h	0,07	23,00	1,61
2	-	AYUDANTE	h	0,05	15,00	0,75
>	<b>E</b>	<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>			<b>(B) =</b>	<b>2,36</b>
	F	Cargas Sociales		55,00% de	(E) =	1,30
	O	Impuesto al Valor Agregado		14,94% de	(E+F) =	0,55
>	<b>G</b>	<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>			<b>(E+F+O) =</b>	<b>4,20</b>
	C	EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTA				
1	-	RETROEXCAVADORA	h	0,05	420,00	21,00
	H	Herramientas menores		5,00% de	(G) =	0,21
>	<b>I</b>	<b>TOTAL HERRAMIENTAS Y EQUIPO</b>			<b>(C+H) =</b>	<b>21,21</b>
>	<b>J</b>	<b>SUB TOTAL</b>			<b>(D+G+I) =</b>	<b>38,01</b>
	L	Gastos grales. y administrativos		10,00% de	(J) =	3,80
	M	Utilidad		10,00% de	(J+L) =	4,18
>	<b>N</b>	<b>PARCIAL</b>			<b>(J+L+M) =</b>	<b>46,00</b>
	P	Impuesto a las Transacciones		3,09% de	(N) =	1,42
>	<b>Q</b>	<b>TOTAL PRECIO UNITARIO</b>			<b>(N+P) =</b>	<b>47,42</b>
>		<b>PRECIO ADOPTADO:</b>				<b>47,42</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla: 34: Ítem 4.**

**4**      **Item: H°.A°. BASE H20 NBH-87**  
**Proyecto: DESARENADOR**  
**Módulo: (M02) - DESARENADOR**

**Unidad: m³**  
**Fecha : 12/11/2024**  
**Tipo de cambio: 6,96 Bs/USD**

N°	P.	Insumo/Parámetro	Und.	Cant.	Unit. (Bs)	Parcial (Bs)
	A	MATERIALES				
1	-	CEMENTO PORTLAND	kg	350,00	1,15	402,50
2	-	ARENA	m³	0,45	120,00	54,00
3	-	GRAVA	m³	0,92	140,00	128,80
4	-	MADERA DE ENCOFRADO	pie²	70,00	8,00	560,00
5	-	ACERO ALTA RESISTENCIA	kg	55,00	8,42	463,10
6	-	ALAMBRE NEGRO DE AMARRE	kg	1,00	14,00	14,00
7	-	CLAVOS	kg	0,80	14,00	11,20
>	<b>D</b>	<b>TOTAL MATERIALES</b>			<b>(A) =</b>	<b>1.633,60</b>
	B	MANO DE OBRA				
1	-	ALBAÑIL	h	24,00	20,00	480,00
2	-	PEÓN	h	24,00	15,00	360,00
>	<b>E</b>	<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>			<b>(B) =</b>	<b>840,00</b>
	F	Cargas Sociales		55,00% de	(E) =	462,00
	O	Impuesto al Valor Agregado		14,94% de	(E+F) =	194,52
>	<b>G</b>	<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>			<b>(E+F+O) =</b>	<b>1.496,52</b>
	C	EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTA				
1	-	HORMIGONERA	h	1,00	24,00	24,00
2	-	VIBRADORA	h	0,80	15,00	12,00
	H	Herramientas menores		5,00% de	(G) =	74,83
>	<b>I</b>	<b>TOTAL HERRAMIENTAS Y EQUIPO</b>			<b>(C+H) =</b>	<b>110,83</b>
>	<b>J</b>	<b>SUB TOTAL</b>			<b>(D+G+I) =</b>	<b>3.240,94</b>
	L	Gastos grales. y administrativos		10,00% de	(J) =	324,09
	M	Utilidad		10,00% de	(J+L) =	356,50
>	<b>N</b>	<b>PARCIAL</b>			<b>(J+L+M) =</b>	<b>3.921,54</b>
	P	Impuesto a las Transacciones		3,09% de	(N) =	121,18
>	<b>Q</b>	<b>TOTAL PRECIO UNITARIO</b>			<b>(N+P) =</b>	<b>4.042,72</b>
>		<b>PRECIO ADOPTADO:</b>				<b>4.042,72</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla: 35: Ítem 5.**

**5**      **Item: H°.A°. MUROS H20 NBH-87**  
**Proyecto: DESARENADOR**  
**Módulo: (M02) - DESARENADOR**

**Unidad: m³**  
**Fecha : 12/11/2024**  
**Tipo de cambio: 6,96 Bs/USD**

N°	P.	Insumo/Parámetro	Und.	Cant.	Unit. (Bs)	Parcial (Bs)
	A	MATERIALES				
1	-	CEMENTO PORTLAND	kg	350,00	1,15	402,50
2	-	ARENA	m³	0,45	120,00	54,00
3	-	GRAVA	m³	0,92	140,00	128,80
4	-	MADERA DE ENCOFRADO	pie²	70,00	8,00	560,00
5	-	ACERO ALTA RESISTENCIA	kg	110,00	8,42	926,20
6	-	ALAMBRE NEGRO DE AMARRE	kg	1,00	14,00	14,00
7	-	CLAVOS	kg	0,80	14,00	11,20
>	<b>D</b>	<b>TOTAL MATERIALES</b>			<b>(A) =</b>	<b>2.096,70</b>
	B	MANO DE OBRA				
1	-	ALBAÑIL	h	24,00	20,00	480,00
2	-	PEÓN	h	24,00	15,00	360,00
>	<b>E</b>	<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>			<b>(B) =</b>	<b>840,00</b>
	F	Cargas Sociales		55,00% de	(E) =	462,00
	O	Impuesto al Valor Agregado		14,94% de	(E+F) =	194,52
>	<b>G</b>	<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>			<b>(E+F+O) =</b>	<b>1.496,52</b>
	C	EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTA				
1	-	HORMIGONERA	h	1,00	24,00	24,00
2	-	VIBRADORA	h	0,80	15,00	12,00
	H	Herramientas menores		5,00% de	(G) =	74,83
>	<b>I</b>	<b>TOTAL HERRAMIENTAS Y EQUIPO</b>			<b>(C+H) =</b>	<b>110,83</b>
>	<b>J</b>	<b>SUB TOTAL</b>			<b>(D+G+I) =</b>	<b>3.704,04</b>
	L	Gastos grales. y administrativos		10,00% de	(J) =	370,40
	M	Utilidad		10,00% de	(J+L) =	407,44
>	<b>N</b>	<b>PARCIAL</b>			<b>(J+L+M) =</b>	<b>4.481,89</b>
	P	Impuesto a las Transacciones		3,09% de	(N) =	138,49
>	<b>Q</b>	<b>TOTAL PRECIO UNITARIO</b>			<b>(N+P) =</b>	<b>4.620,38</b>
>		<b>PRECIO ADOPTADO:</b>				<b>4.620,38</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla: 36: Ítem 6.**

**6**      **Item: PROVISIÓN Y COLOCADO DE ACCESORIOS LLAVE DE PASO**      **Unidad: m**  
**Proyecto: DESARENADOR**      **Fecha : 12/11/2024**  
**Módulo: (M02) - DESARENADOR**      **Tipo de cambio: 6,96 Bs/USD**

N°	P.	Insumo/Parámetro	Und.	Cant.	Unit. (Bs)	Parcial (Bs)
	A	MATERIALES				
1	-	LLAVE DE PASO + ACCESORIOS	glb	1,00	2.500,00	2.500,00
>	<b>D</b>	<b>TOTAL MATERIALES</b>			<b>(A) =</b>	<b>2.500,00</b>
	B	MANO DE OBRA				
1	-	PLOMERO	h	8,00	18,00	144,00
2	-	AYUDANTE	h	16,00	13,00	208,00
>	<b>E</b>	<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>			<b>(B) =</b>	<b>352,00</b>
	F	Cargas Sociales		55,00% de	(E) =	193,60
	O	Impuesto al Valor Agregado		14,94% de	(E+F) =	81,51
>	<b>G</b>	<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>			<b>(E+F+O) =</b>	<b>627,11</b>
	C	EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTA				
	H	Herramientas menores		5,00% de	(G) =	31,36
>	<b>I</b>	<b>TOTAL HERRAMIENTAS Y EQUIPO</b>			<b>(C+H) =</b>	<b>31,36</b>
>	<b>J</b>	<b>SUB TOTAL</b>			<b>(D+G+I) =</b>	<b>3.158,47</b>
	L	Gastos grales. y administrativos		10,00% de	(J) =	315,85
	M	Utilidad		10,00% de	(J+L) =	347,43
>	<b>N</b>	<b>PARCIAL</b>			<b>(J+L+M) =</b>	<b>3.821,75</b>
	P	Impuesto a las Transacciones		3,09% de	(N) =	118,09
>	<b>Q</b>	<b>TOTAL PRECIO UNITARIO</b>			<b>(N+P) =</b>	<b>3.939,84</b>
>		<b>PRECIO ADOPTADO:</b>				<b>3.939,84</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla: 37: Ítem 7.**

7 **Item: PROVISIÓN Y TENDIDO DE TUBERIA PVC D=8" C-6 (JUNTA DE GOMA)**  
**Proyecto: DESARENADOR** **Unidad: m**  
**Módulo: (M02) - DESARENADOR** **Fecha : 12/11/2024**

**Tipo de cambio: 6,96 Bs/USD**

N°	P.	Insumo/Parámetro	Und.	Cant.	Unit. (Bs)	Parcial (Bs)
	A	MATERIALES				
1	-	TUBERIA PVC D=8" C-6 (JUNTA DE GOMA)	m	1,00	421,80	421,80
		LUBRICANTE	l	0,02	40,00	0,80
>	<b>D</b>	<b>TOTAL MATERIALES</b>			<b>(A) =</b>	<b>422,60</b>
	B	MANO DE OBRA				
1	-	PLOMERO	h	0,10	18,00	1,80
2	-	AYUDANTE	h	0,10	13,00	1,30
>	<b>E</b>	<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>			<b>(B) =</b>	<b>3,10</b>
	F	Cargas Sociales		55,00% de	(E) =	1,71
	O	Impuesto al Valor Agregado		14,94% de	(E+F) =	0,72
>	<b>G</b>	<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>			<b>(E+F+O) =</b>	<b>5,52</b>
	C	EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTA				
	H	Herramientas menores		5,00% de	(G) =	0,28
>	<b>I</b>	<b>TOTAL HERRAMIENTAS Y EQUIPO</b>			<b>(C+H) =</b>	<b>0,28</b>
>	<b>J</b>	<b>SUB TOTAL</b>			<b>(D+G+I) =</b>	<b>428,40</b>
	L	Gastos grales. y administrativos		10,00% de	(J) =	42,84
	M	Utilidad		10,00% de	(J+L) =	47,12
>	<b>N</b>	<b>PARCIAL</b>			<b>(J+L+M) =</b>	<b>518,36</b>
	P	Impuesto a las Transacciones		3,09% de	(N) =	16,02
>	<b>Q</b>	<b>TOTAL PRECIO UNITARIO</b>			<b>(N+P) =</b>	<b>534,38</b>
>		<b>PRECIO ADOPTADO:</b>				<b>534,38</b>

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla: 38: Ítem 8.**

**8**      **Item: CAMA DE ARENA PARA ASIENTO DE TUBERÍA**      **Unidad: m³**  
**Proyecto: DESARENADOR**      **Fecha : 12/11/2024**  
**Módulo: (M02) - DESARENADOR**      **Tipo de cambio: 6,96 Bs/USD**

Nº	P.	Insumo/Parámetro	Und.	Cant.	Unit. (Bs)	Parcial (Bs)
	A	MATERIALES				
1	-	TIERRA SELECCIONADA	m³	1,00	50,00	50,00
>	<b>D</b>	<b>TOTAL MATERIALES</b>			<b>(A) =</b>	<b>50,00</b>
	B	MANO DE OBRA				
1	-	ALBAÑIL	h	0,05	20,00	1,00
2	-	PEÓN	h	0,10	15,00	1,50
>	<b>E</b>	<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>			<b>(B) =</b>	<b>2,50</b>
	F	Cargas Sociales		55,00% de	(E) =	1,38
	O	Impuesto al Valor Agregado		14,94% de	(E+F) =	0,58
>	<b>G</b>	<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>			<b>(E+F+O) =</b>	<b>4,45</b>
	C	EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTA				
	H	Herramientas menores		5,00% de	(G) =	0,22
>	<b>I</b>	<b>TOTAL HERRAMIENTAS Y EQUIPO</b>			<b>(C+H) =</b>	<b>0,22</b>
>	<b>J</b>	<b>SUB TOTAL</b>			<b>(D+G+I) =</b>	<b>54,68</b>
	L	Gastos grales. y administrativos		10,00% de	(J) =	5,47
	M	Utilidad		10,00% de	(J+L) =	6,01
>	<b>N</b>	<b>PARCIAL</b>			<b>(J+L+M) =</b>	<b>66,16</b>
	P	Impuesto a las Transacciones		3,09% de	(N) =	2,04
>	<b>Q</b>	<b>TOTAL PRECIO UNITARIO</b>			<b>(N+P) =</b>	<b>68,20</b>
>		<b>PRECIO ADOPTADO:</b>				<b>68,20</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla: 39: Ítem 9.**

**9**      **Item: RELLENO Y COMPACTADO CON MATERIAL SELECCIONADO**      **Unidad: m³**  
**Proyecto: DESARENADOR**      **Fecha : 12/11/2024**  
**Módulo: (M02) - DESARENADOR**      **Tipo de cambio: 6,96 Bs/USD**

Nº	P.	Insumo/Parámetro	Und.	Cant.	Unit. (Bs)	Parcial (Bs)
	A	MATERIALES				
1	-	TIERRA SELECCIONADA	m³	1,00	50,00	50,00
>	<b>D</b>	<b>TOTAL MATERIALES</b>			<b>(A) =</b>	<b>50,00</b>
	B	MANO DE OBRA				
1	-	ALBAÑIL	h	0,10	20,00	2,00
2	-	AYUDANTE	h	0,20	15,00	3,00
>	<b>E</b>	<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>			<b>(B) =</b>	<b>5,00</b>
	F	Cargas Sociales		55,00% de	(E) =	2,75
	O	Impuesto al Valor Agregado		14,94% de	(E+F) =	1,16
>	<b>G</b>	<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>			<b>(E+F+O) =</b>	<b>8,91</b>
	C	EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTA				
	H	Herramientas menores		5,00% de	(G) =	0,45
>	<b>I</b>	<b>TOTAL HERRAMIENTAS Y EQUIPO</b>			<b>(C+H) =</b>	<b>0,45</b>
>	<b>J</b>	<b>SUB TOTAL</b>			<b>(D+G+I) =</b>	<b>59,35</b>
	L	Gastos grales. y administrativos		10,00% de	(J) =	5,94
	M	Utilidad		10,00% de	(J+L) =	6,53
>	<b>N</b>	<b>PARCIAL</b>			<b>(J+L+M) =</b>	<b>71,82</b>
	P	Impuesto a las Transacciones		3,09% de	(N) =	2,22
>	<b>Q</b>	<b>TOTAL PRECIO UNITARIO</b>			<b>(N+P) =</b>	<b>74,04</b>
>		<b>PRECIO ADOPTADO:</b>				<b>74,04</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla: 40: Ítem 10.**

**10**      **Item: RELLENO COMPACTADO CON SALTARIN Y TIERRA COMÚN**      **Unidad: m³**  
**Proyecto: DESARENADOR**      **Fecha : 12/11/2024**  
**Módulo: (M02) - DESARENADOR**      **Tipo de cambio: 6,96 Bs/USD**

Nº	P.	Insumo/Parámetro	Und.	Cant.	Unit. (Bs)	Parcial (Bs)
	A	MATERIALES				
		TIERRA COMÚN	m³	1,00	50,00	50,00
>	<b>D</b>	<b>TOTAL MATERIALES</b>			<b>(A) =</b>	<b>50,00</b>
	B	MANO DE OBRA				
1	-	PEÓN	h	1,00	15,00	15,00
2	-	OPERADOR DE COMPACTADORA	h	0,50	21,00	10,50
>	<b>E</b>	<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>			<b>(B) =</b>	<b>25,50</b>
	F	Cargas Sociales		55,00% de	(E) =	14,03
	O	Impuesto al Valor Agregado		14,94% de	(E+F) =	5,91
>	<b>G</b>	<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>			<b>(E+F+O) =</b>	<b>45,43</b>
	C	EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTA				
1	-	COMPACTADORA DE PLANCHA	h	0,50	38,00	19,00
	H	Herramientas menores		5,00% de	(G) =	2,27
>	<b>I</b>	<b>TOTAL HERRAMIENTAS Y EQUIPO</b>			<b>(C+H) =</b>	<b>21,27</b>
>	<b>J</b>	<b>SUB TOTAL</b>			<b>(D+G+I) =</b>	<b>116,70</b>
	L	Gastos grales. y administrativos		10,00% de	(J) =	11,67
	M	Utilidad		10,00% de	(J+L) =	12,84
>	<b>N</b>	<b>PARCIAL</b>			<b>(J+L+M) =</b>	<b>141,21</b>
	P	Impuesto a las Transacciones		3,09% de	(N) =	4,36
>	<b>Q</b>	<b>TOTAL PRECIO UNITARIO</b>			<b>(N+P) =</b>	<b>145,57</b>
>		<b>PRECIO ADOPTADO:</b>				<b>145,57</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla: 41: Ítem 11.**

**11**      **Item: H°.A°. CAMARA**  
**Proyecto: DESARENADOR**  
**Módulo: (M02) - DESARENADOR**

**Unidad: m³**  
**Fecha : 12/11/2024**  
**Tipo de cambio: 6,96 Bs/USD**

N°	P.	Insumo/Parámetro	Und.	Cant.	Unit. (Bs)	Parcial (Bs)
	A	MATERIALES				
1	-	CEMENTO PORTLAND	kg	350,00	1,15	402,50
2	-	ARENA	m³	0,40	120,00	48,00
3	-	GRAVA	m³	0,80	140,00	112,00
4	-	MADERA DE ENCOFRADO	pie²	20,00	8,00	160,00
5	-	ACERO ALTA RESISTENCIA	kg	120,00	8,42	1.010,40
6	-	ALAMBRE NEGRO DE AMARRE	kg	2,00	14,00	28,00
7	-	CLAVOS	kg	2,00	14,00	28,00
>	<b>D</b>	<b>TOTAL MATERIALES</b>			<b>(A) =</b>	<b>1.788,90</b>
	B	MANO DE OBRA				
1	-	ALBAÑIL	h	33,00	20,00	660,00
2	-	PEÓN	h	38,00	15,00	570,00
>	<b>E</b>	<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>			<b>(B) =</b>	<b>1.230,00</b>
	F	Cargas Sociales		55,00% de	(E) =	676,50
	O	Impuesto al Valor Agregado		14,94% de	(E+F) =	284,83
>	<b>G</b>	<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>			<b>(E+F+O) =</b>	<b>2.191,33</b>
	C	EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTA				
1	-	HORMIGONERA	h	0,50	24,00	12,00
2	-	VIBRADORA	h	0,50	15,00	7,50
	H	Herramientas menores		5,00% de	(G) =	109,57
>	<b>I</b>	<b>TOTAL HERRAMIENTAS Y EQUIPO</b>			<b>(C+H) =</b>	<b>129,07</b>
>	<b>J</b>	<b>SUB TOTAL</b>			<b>(D+G+I) =</b>	<b>4.109,30</b>
	L	Gastos grales. y administrativos		10,00% de	(J) =	410,93
	M	Utilidad		10,00% de	(J+L) =	452,02
>	<b>N</b>	<b>PARCIAL</b>			<b>(J+L+M) =</b>	<b>4.972,25</b>
	P	Impuesto a las Transacciones		3,09% de	(N) =	153,64
>	<b>Q</b>	<b>TOTAL PRECIO UNITARIO</b>			<b>(N+P) =</b>	<b>5.125,89</b>
>		<b>PRECIO ADOPTADO:</b>				<b>5.125,89</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla: 42: Ítem 12.**

12      **Ítem: DEMOLICIÓN MAMPOSTERIA DE PIEDRA/CEMENTO**      **Unidad: m³**  
**Proyecto: DESARENADOR**      **Fecha : 12/11/2024**  
**Módulo: (M02) - DESARENADOR**      **Tipo de cambio: 6,96 Bs/USD**

N°	P.	Insumo/Parámetro	Und.	Cant.	Unit. (Bs)	Parcial (Bs)
	A	MATERIALES				
>	<b>D</b>	<b>TOTAL MATERIALES</b>			<b>(A) =</b>	<b>0,00</b>
	B	MANO DE OBRA				
1	-	ALBAÑIL	h	2,00	20,00	40,00
2	-	PEÓN	h	10,00	15,00	150,00
>	<b>E</b>	<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>			<b>(B) =</b>	<b>190,00</b>
	F	Cargas Sociales		55,00% de	(E) =	104,50
	O	Impuesto al Valor Agregado		14,94% de	(E+F) =	44,00
>	<b>G</b>	<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>			<b>(E+F+O) =</b>	<b>338,50</b>
	C	EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTA				
1	-	MARTILLO NEUMATICO	h	0,50	24,00	12,00
2	-	VOLQUETA	h	0,50	15,00	7,50
	H	Herramientas menores		5,00% de	(G) =	16,92
>	<b>I</b>	<b>TOTAL HERRAMIENTAS Y EQUIPO</b>			<b>(C+H) =</b>	<b>36,42</b>
>	<b>J</b>	<b>SUB TOTAL</b>			<b>(D+G+I) =</b>	<b>374,92</b>
	L	Gastos grales. y administrativos		10,00% de	(J) =	37,49
	M	Utilidad		10,00% de	(J+L) =	41,24
>	<b>N</b>	<b>PARCIAL</b>			<b>(J+L+M) =</b>	<b>453,66</b>
	P	Impuesto a las Transacciones		3,09% de	(N) =	14,02
>	<b>Q</b>	<b>TOTAL PRECIO UNITARIO</b>			<b>(N+P) =</b>	<b>467,68</b>
>		<b>PRECIO ADOPTADO:</b>				<b>467,68</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

- **Presupuesto general**

**Tabla: 43: Presupuesto general.**

**PRESUPUESTO GENERAL**

**DESARENADOR**

<b>Nº</b>	<b>Descripción</b>	<b>Und.</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unitario</b>	<b>Parcial (Bs)</b>
1	REPLANTEO DE ESTRUCTURAS Y EDIFICACIONES	m <sup>2</sup>	184,72	6,32	1.166,96
2	REPLANTEO Y CONTROL DE LINEAS DE TUBERÍA	m	24,00	4,90	117,71
3	EXCAVACIÓN CON RETROEXCAVADORAS	m <sup>3</sup>	686,05	47,42	32.531,91
4	H°.A°. BASE H20 NBH-87	m <sup>3</sup>	33,26	4.042,72	134.477,00
5	H°.A°. MUROS H20 NBH-87	m <sup>3</sup>	54,46	4.620,38	251.644,63
6	PROV. COLOCACIÓN DE ACCESORIOS LLAVE DE PASO F.F. 8 Pulg	m <sup>2</sup>	1,00	3.939,84	3.939,84
7	PROV. Y TENDIDO DE TUBERIA PVC D=8" - C-6 (JUNTA DE GOMA)	m	24,00	534,38	12.825,13
8	CAMA DE ARENA PARA ASIENTO DE TUBERÍA	m <sup>3</sup>	1,44	68,20	98,21
9	RELLENO Y COMPACTADO CON MATERIAL SELECCIONADO	m <sup>3</sup>	5,76	74,04	426,45
10	RELLENO COMPACT. C/SALTARIN CON TIERRA COMÚN	m <sup>3</sup>	186,75	145,57	27.185,61
11	H°.A°. CAMARA	m <sup>3</sup>	1,23	5.125,89	6.311,00
12	DEMOLICIÓN MAMPOSTERÍA DE PIEDRA/CEMENTO	m <sup>3</sup>	14,26	467,68	6.670,92
	<b>Total presupuesto:</b>				<b>477.395,36</b>

**Fuente:** Elaboración propia

## 7. Conclusiones y Recomendaciones.

### 7.1 Conclusiones.

- La modelación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) permitió visualizar y analizar efectivamente la distribución de velocidades en el desarenador del sistema de agua potable de la ciudad de Tarija, cumpliendo con lo planteado en la hipótesis. Los resultados indicaron que, si bien el desarenador actual opera de manera eficiente con un caudal de diseño de 93 L/s, presenta deficiencias al ser sometido a un caudal máximo de 339 L/s. Esto llevó a implementar una optimización con una pantalla deflectora como referencia para compararla con el nuevo diseño propuesto, que contempla una relación largo-ancho de 6,2:1. El análisis comparativo evidenció que el nuevo diseño ofrece un mejor desempeño al tratar caudales mayores, reafirmando el valor del (CFD) como herramienta para evaluar y proponer soluciones efectivas en estructuras hidráulicas.
- Para el análisis de velocidades en estructuras que funcionan con velocidades bajas como los desarenadores y sedimentadores, por debajo de 0,3 m/s es necesario realizar con un equipo moderno con sensibilidad para registrar las velocidades bajas.
- Dentro del desarenador, hay velocidades en sentido transversal, inclinado, incluso en contrasentido, situación que dificulta la medición con un molinete tradicional ya que a simple vista no se puede apreciar el sentido del flujo en el interior de esta estructura.
- Del análisis de las velocidades experimentales medidas con el molinete electromagnético OTT MF pro, con caudal de 93 L/s, se verifica en casi todas secciones que las velocidades son bajas acordes para que se produzca la sedimentación de las arenas. La velocidad más alta en casi todas las secciones transversales se presenta en el medio de la sección, por de la superficie del agua.
- En la simulación con el software Solidworks, se presenta un comportamiento variable de las velocidades en las secciones transversales y en el sentido de flujo, con velocidades más altas en la superficie y margen derecho. Las velocidades bajas esta sobre todo en el fondo, esto favorece a la sedimentación de las arenas e incluso a la sedimentación de partículas más pequeñas que la arena.
- En la gráfica tridimensional para el caudal de 93 L/s, se puede ver que las velocidades presentan direcciones en varios sentidos, describiendo movimientos circulares en sentido horizontal y vertical, esto pudiera deberse al choque del agua con las paredes, pero, al ser

velocidades muy pequeñas, no representa un peligro para el funcionamiento del desarenador.

- Los resultados de velocidades de la simulación en Solidworks, para el caudal máximo de 339 L/s, presenta valores altos en varias zonas, incluyendo en el fondo del desarenador, situación que es desfavorable para una buena sedimentación.
- La colocación de cualquier estructura dentro del desarenador, provocara la reducción de sección hidráulica en ciertos lugares del volumen de agua, provocando un aumento de velocidades en algunos lugares, lo cual no sería beneficioso para la decantación de las arenas. En todo caso para caudales más grandes se requiere secciones también más grandes que garanticen bajas velocidades.
- Las velocidades de diseño de desarenadores recomiendan velocidades de flujo horizontal por debajo de 0,3 m/s y velocidad vertical de sedimentación por debajo de 0,02 m/s aproximadamente. Los valores de velocidades experimentales y simulados para el caudal de 93 L/s cumplen con esta recomendación, por lo que este desarenador está capacitado para decantar las arenas que se pudieran presentar, pero no sucede lo mismo para el caudal máximo de 339 L/s, ya que en la simulación se puede ver que varias velocidades superan los 0,02 m/s, lo que indica condiciones no apropiadas para la decantación de las arenas. Se deduce que el caudal máximo que puede tratar este desarenador está por debajo de 339 L/s.
- La modelación mediante (CFD) permitió validar las mediciones experimentales y proporcionó una comprensión más profunda de los patrones de flujo tridimensionales que no son evidentes mediante la instrumentación tradicional.
- Se identificó que la geometría actual del desarenador genera zonas de recirculación que, si bien no afectan significativamente el proceso de sedimentación a caudales bajos, podrían optimizarse mediante modificaciones estructurales menores.
- El análisis comparativo entre las mediciones in situ y la simulación computacional demostró una correlación aceptable, con diferencias atribuibles principalmente a las limitaciones del equipo de medición para detectar velocidades muy bajas y flujos multidireccionales.

## **7.2 Recomendaciones.**

- Usar equipo especializado capaz de registrar velocidades muy bajas y en diferentes direcciones de flujo.
- Realizar más mediciones para graficar la variación de la velocidad en cada sección transversal y en varias secciones longitudinales, lo que permitirá analizar con más detalle el comportamiento de la velocidad en todo el volumen.
- Limitar el ingreso de caudales grandes para condiciones de 339 L/s, ya que no se presentan condiciones ideales para la sedimentación de las arenas, lo que provoca la presencia de velocidades más altas en el fondo del desarenador.
- No permitir que el desarenador actual supere un caudal de 160 l/s, mientras que el nuevo diseño debe estar optimizado para manejar un caudal máximo de 339 l/s. Este incremento en la capacidad asegura una mejor adaptación a mayores demandas de flujo.
- Evaluar la factibilidad de implementar unidades modulares en paralelo en casos donde se requiera aumentar la capacidad de tratamiento, basándose en los resultados de este estudio para determinar las dimensiones óptimas.
- Realizar un análisis (CFD) preliminar en desarenadores existentes para identificar zonas problemáticas y patrones de flujo desfavorables antes de implementar cualquier modificación estructural.
- Considerar la implementación de una zona de transición más gradual entre el canal de entrada y la cámara de sedimentación en el diseño de nuevos desarenadores, para reducir la formación de flujos turbulentos que afecten el proceso de sedimentación.