CAPÍTULO I

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

La gestión eficaz de las aguas residuales urbanas es un aspecto fundamental para garantizar la protección del medio ambiente y la salud pública. En este contexto, las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) juegan un papel crucial. Un componente esencial de estas plantas es el reactor biológico de lodos activados, el cual permite el tratamiento secundario del agua a través de procesos aeróbicos.

El comportamiento fluidodinámico dentro de estos reactores es clave para asegurar una adecuada mezcla y oxigenación del agua residual. Un diseño fluidodinámico ineficaz puede dar lugar a problemas como zonas muertas, cortocircuitos y una distribución desigual del oxígeno, lo que impacta negativamente en la eficiencia del proceso de tratamiento (Metcalf & Eddy, 2003).

Además, mejorar la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales está directamente relacionado con el Objetivo de Desarrollo Sostenible número seis, de las Naciones Unidas: Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos (ONU, 2015). Este objetivo reconoce la importancia de reducir el vertido de aguas contaminadas, mejorar la calidad del agua, y aumentar el tratamiento seguro y eficaz de aguas residuales.

En este estudio, se propone analizar el comportamiento fluidodinámico del reactor biológico de lodos activados de la PTAR San Blas, ubicada en la ciudad de Tarija, Bolivia. El análisis se llevará a cabo utilizando simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) a través del software SolidWorks. Estas simulaciones permitirán modelar y evaluar las características del flujo de agua dentro del reactor,

identificando posibles problemas fluidodinámicos, así también poder proponer mejoras en el proceso operativo del sistema.

1.2 Antecedentes de investigación

1.2.1 Antecedentes internacionales

Sánchez Fernández, F. (2019). En su tesis doctoral, se centró en el análisis y mejora de la fluidodinámica en estaciones depuradoras de aguas residuales, enfocándose en la identificación y corrección de ineficiencias como zonas muertas de paso rápido o sin renovación, que afectan el tratamiento. A través de la aplicación de herramientas de mecánica de fluidos computacionales como él (CFD), complementadas con métodos analíticos y experimentales para permitir la validación de los modelos, para ellos se estudiaron instalaciones reales de tratamiento secundario (reactor biológico) y terciario (canal UV). Los resultados proporcionaron una comprensión detallada de los fenómenos fluidodinámicos, biológicos y radiactivos, permitiendo identificar ineficiencias significativas y proponer modificaciones geométricas del reactor, para optimizar los procesos. Asimismo, se analizó la aplicabilidad, el potencial y las limitaciones de las metodologías empleadas, aportando al diseño eficiente de estas instalaciones.

Ramírez Ruiz, C. (2019). En su tesis de maestría, abordó el análisis hidrodinámico de sedimentadores de alta tasa en plantas potabilizadoras, utilizando herramientas computacionales como Ansys Fluent®, combinadas con técnicas experimentales y modelos matemáticos, para evaluar zonas muertas, cortocircuitos hidráulicos y la eficiencia de sedimentación. Se critica la dependencia de criterios empíricos en los diseños tradicionales, destacando la necesidad de emplear metodologías modernas que integren simulaciones

CFD y datos experimentales. Esta combinación permite optimizar tanto el diseño como el funcionamiento hidrodinámico de estas unidades, mejorando su eficiencia operativa.

Hernández Aguilar E. (2015), En su tesis de doctorado, aplico modelación CFD para desarrollar una estrategia de mezclado mediante el estudio y análisis del régimen de flujo en reactores ovoides de digestión anaeróbica de lodo residual. Mediante la aplicación de la herramienta CFD se ha corroborado que los reactores con forma ovoide tienen un desempeño de mezclado en el cual no existen zonas muertas, esto es favorable para el mezclado del lecho reaccionante. También observo que tener alimentaciones con baja velocidad favorece al proceso en el mezclado, debido a que las recirculaciones internas generadas, tienen un mayor efecto de mezclado en el lecho de reacción. El modelo CFD desarrollado permitió definir en principio una zona de operación y posteriormente seleccionar la mejor velocidad de alimentación en función del tiempo de residencia.

Gonzalías Manjarrés A. (2019), realizo un estudio para simular y analizar la hidrodinámica del fluido de un floculador hidráulico de agua potable mediante el desarrollo de un modelo FCD. Observo que para reducir los cortos circuitos y zonas muertas en el flujo de agua del floculador se debe cerrar las ventanas de limpieza durante la operación. También mediante modelación observo que al momento de operar el floculador se deben evitar los cambios bruscos de caudal, ya que la unidad es muy vulnerable a estas variaciones y fácilmente se forman cortos circuitos, especialmente en la parte superior de las cámaras. Demostró que los modelos CFD poseen el potencial suficiente para representar la hidrodinámica del floculador y fenómenos más complejos como la formación y transporte de los flocs. Pudo validar el modelo CFD con los resultados experimentales del ensayo de trazadores, mostrando la existencia de zonas muertas y cortos circuitos.

Recomienda hacer un análisis CFD más exhaustivo en esta unidad en el cual se tengan en cuenta fenómenos como la formación y transporte de los flocs, la colisión entre partículas y el rompimiento de estos, con el objetivo de obtener una mayor y mejor aproximación al comportamiento real del floculador.

Laín S., Cruz C., Valencia Y., Torres P. y Montoya C. (2011), realizaron un estudio para estimar el comportamiento hidráulico en un tanque de almacenamiento de agua potable haciendo uso de la simulación de dinámica computacional de fluidos CFD. Observaron que el análisis CFD puede utilizarse como una aproximación conveniente para determinar el comportamiento hidrodinámico de los tanques de almacenamiento, pues arroja como resultado un mayor conocimiento del campo de velocidades, lo que permite establecer el mejor modelo del tanque para un estudio de la calidad del agua. También observaron que la modelación muestra cómo para un tanque de dimensiones importantes, los mecanismos de entrada y de salida generan un flujo hidráulico que corresponde a una combinación de flujo pistón y completamente mezclado.

1.3 Alcance

El estudio se realiza en la planta de tratamiento de San Blas, ubicándose en la provincia Cercado, departamento de Tarija, Bolivia. Con el software de CFD de SolidWorks.

1.4 Delimitación temporal

Este estudio se basa en un análisis de datos históricos de operación de la planta, abarcando un período aproximado de tres años. Los datos de caudales, recogidos durante este tiempo se emplearán para modelar las condiciones reales de funcionamiento del reactor y analizar su comportamiento fluidodinámico.

1.5 Delimitación espacial

El análisis se centra exclusivamente en el reactor biológico de lodos activados de la PTAR de San Blas, que forma parte del tratamiento secundario de la planta. No se considerarán otros componentes de la planta en este estudio, ya que el enfoque es el comportamiento fluidodinámico dentro del reactor.

1.6 Planteamiento del problema

El problema surge en la planta de tratamiento de aguas residuales de San Blas, donde la falta de estudios exhaustivos, basados en datos operacionales y rendimientos dentro del reactor biológico de lodos activados han generado desafíos significativos. La falta de seguimiento y propuesta de mejoras operativas, ya que compromete la eficiencia del tratamiento y la calidad del agua. La importancia de entender cómo se comporta el flujo dentro del reactor, permitirá llenar ese vacío utilizando simulaciones CFD, con el objetivo de mejorar la comprensión y optimización del proceso, contribuyendo así a un tratamiento más efectivo y sostenible.

1.6.1 Formulación del problema

¿Cómo afectan los problemas fluidodinámicos (zonas muertas y los cortocircuitos) a la distribución del flujo dentro del reactor biológico de lodos activados de la PTAR San Blas?

1.6.2 Pregunta de investigación general

¿Cómo es el comportamiento fluidodinámico del reactor biológico de lodos activados de la PTAR San Blas, y de qué manera la aplicación de la modelación (CFD) puede proporcionar propiedades fluidodinámicas para conocer las variaciones que presentan dentro del reactor?

1.6.3 Preguntas de investigación

¿Cómo varían las velocidades del flujo en la sección del reactor?

¿Cuál es la variación de presiones, simulados en el reactor?

¿Existen zonas muertas dentro del reactor biológico?

1.7 Justificación.

El análisis del comportamiento fluidodinámico del reactor biológico de la PTAR San Blas es crucial para optimizar su operación. La identificación de problemas como zonas muertas o cortocircuitos permitirá proponer soluciones que mejoren la distribución del flujo y por lo tanto, el rendimiento del sistema de tratamiento de aguas residuales.

El uso de simulaciones CFD con el software SolidWorks permite realizar estudios detallados del comportamiento fluidodinámico del reactor, sin la necesidad de interrumpir la operación normal de la planta. Esto es especialmente importante en infraestructuras críticas como las plantas de tratamiento de aguas residuales, donde las interrupciones pueden tener consecuencias graves para la salud pública y el medio ambiente (Ramin et al., 2014). A través de este análisis, se espera proporcionar una base técnica sólida para la optimización del reactor biológico, contribuyendo a la mejora continua del proceso de tratamiento en la PTAR San Blas.

El estudio de la dinámica de fluidos de un reactor de lodos activados donde intervienen agua residual y aire. Dentro de sus ventajas incluye:

- Evaluar posibles escenarios para optimizar los procesos.
- Brindar soporte en la toma de decisiones para la operación de la planta.

- Presentar datos de un fluido con gran precisión.
- Ahorrar en tiempo, dinero, prototipos y simulaciones reales.
- Visualizar la animación del proceso según las variables del fluido.
- Conocer la variación de velocidades, presiones e identificar zonas muertas.

1.8 Objetivos.

1.8.1 Objetivo general.

Realizar el análisis fluidodinámico del reactor biológico de lodos activados de la PTAR San Blas mediante simulaciones CFD en SolidWorks, para identificar el comportamiento en la distribución del flujo.

1.8.2 Objetivos específicos.

Realizar la construcción de un modelo CFD en el reactor biológico de lodos activados, basado en las características operativas de la planta.

Modelar la distribución de las variaciones de velocidad en el flujo del reactor biológico, mediante simulaciones CFD, con el fin de analizar el comportamiento del fluido en diferentes zonas del reactor.

Realizar la modelación de la distribución de presiones en el reactor biológico de lodos activados, utilizando simulaciones CFD, para identificar áreas de mayor y menor presión durante el tratamiento.

Identificar las zonas muertas dentro del reactor biológico, a través de simulaciones CFD.

CAPÍTULO II

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1 Marco conceptual

2.1.1 Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR)

Una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) es una infraestructura diseñada para eliminar los contaminantes presentes en el agua residual, permitiendo su retorno seguro al medio ambiente o su reutilización. El tratamiento se divide en varias fases que incluyen procesos físicos, químicos y biológicos para la remoción de sólidos, materia orgánica, nutrientes y microorganismos patógenos.

Tabla 1. Procesos generales de tratamiento de aguas residuales

ETAPA	PROCESO	DESCRIPCIÓN
Pretratamiento	Rejas y tamices	Remueven objetos grandes y sólidos flotantes como basura, ramas y trapos.
	Desarenado	Elimina partículas pesadas y arena que pueden dañar los equipos.
	Desengrasado	Remueve aceites y grasas flotantes.
Tratamiento Primario	Sedimentación primaria	Permite la sedimentación de sólidos suspendidos en tanques de sedimentación, reduciendo la carga de sólidos en las etapas posteriores.
Tratamiento Secundario	Tratamiento biológico	Utiliza microorganismos para descomponer la materia orgánica disuelta y en suspensión.
	Lodos activados	Un proceso de aireación donde se mezcla el agua residual con lodo activado, facilitando la digestión de materia orgánica por microorganismos.
	Filtros percoladores	El agua residual es rociada sobre un medio filtrante donde crecen los microorganismos.
Tratamiento Terciario	Filtración	Remoción de partículas finas mediante filtros de arena, carbón activado u otros medios filtrantes.
	Desinfección	Eliminación de patógenos mediante cloración, ozonización o radiación ultravioleta (UV).
Tratamiento de Lodos	Espesamiento	Reducción del volumen de los lodos mediante la eliminación de agua.

Digestión	Tratamiento de los lodos para estabilizarlos y reducir su volumen y olor, ya sea por métodos anaeróbicos o aeróbicos.
Deshidratación	Remoción adicional de agua de los lodos mediante centrifugación, filtros prensa o camas de secado.
Disposición final	Disposición de los lodos tratados mediante aplicación en terrenos, compostaje, incineración o disposición en rellenos sanitarios.

Fuente. Elaboración propia

2.1.2 Sistema de lodos activados

Un sistema de lodos activados es un proceso de tratamiento de aguas residuales que utiliza microorganismos para degradar la materia orgánica y otros contaminantes. En este sistema, se introduce aire en un reactor aeróbico donde las bacterias descomponen la materia orgánica, y luego el agua tratada se lleva a un sedimentador, donde los lodos se asientan y se recirculan al reactor para mantener una alta concentración de microorganismos. Este proceso es eficiente en la eliminación de sólidos suspendidos, materia orgánica y nutrientes, y es adaptable a diferentes flujos y cargas de contaminantes, aunque puede ser sensible a cambios en las condiciones operativas. Los sistemas de lodos activados son ampliamente utilizados en plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas e industriales debido a su efectividad y simplicidad.

2.1.2.1 Componentes de sistema de lodos activados

Los componentes de un sistema de lodos activados son:

- El reactor o el tanque de aireación: es donde los microorganismos se mantienen en suspensión y aireados. Es la parte fundamental de un sistema de lodos activados, su diseño y operación dependen de numerosas variables como la carga orgánica, la temperatura o la presencia de sustancias tóxicas.

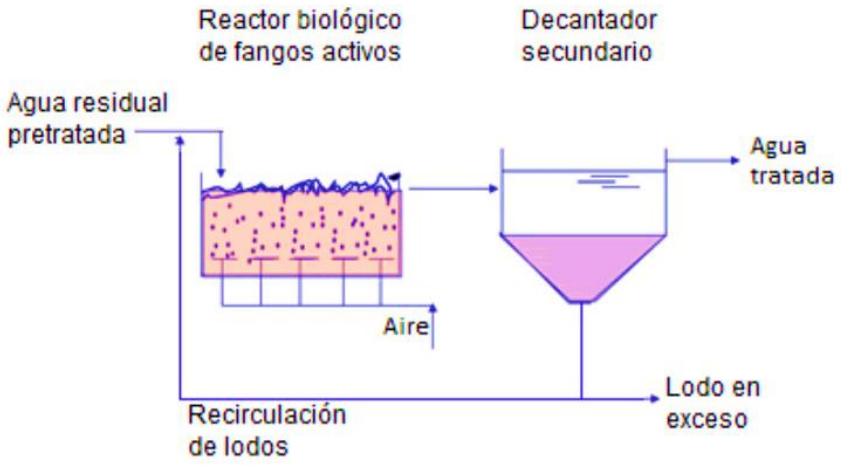
- Fuente de aireación: permite airear y transferir el oxígeno al sistema. Puede ser un soplador con difusores, aeración mecánica o a través de la inyección de oxígeno puro.

- Sistema de separación de sólidos (tanque de sedimentación): se utiliza para separar los sólidos biológicos del agua tratada.

- Sistema de tuberías y bomba: sirve para recircular los sólidos biológicos (microorganismos y solidos inertes) del sedimentador al reactor biológico. Este proceso también se le conoce como la "recirculación de lodos activados".

- Tubería de desecho: se desechan lodos biológicos del sistema que quedan en exceso. A este proceso también se denomina "purga de lodos".

Figura 1. Esquema del sistema de lodos activados



Fuente. Https://blog.cbr-ingenieria.com.mx, que es un sistema de lodos activados, (2024)

2.1.3 Reactor biológico

El reactor biológico es el corazón del sistema de lodos activados. Aquí es donde los microorganismos en suspensión oxidan y degradan la materia orgánica presente en el agua residual. El reactor puede diseñarse con diferentes configuraciones según los requerimientos del tratamiento, ya sea como reactor completamente mezclado o reactor de flujo pistón. Según Henze et al. (2008), la configuración del reactor influye directamente en la eficiencia del tratamiento (p. 112).

2.1.3.1 Tipos de flujo

Existen varios tipos de flujo de acuerdo al diseño del reactor biológico.

2.1.3.1.1 Flujo completamente mezclado

Es un tipo de flujo donde el contenido del reactor se encuentra uniformemente distribuido, asegurando que cualquier entrada de sustancia se mezcle rápidamente y de manera homogénea en todo el volumen. Este flujo es típico en reactores con agitación intensa o aireación constante.

2.1.3.1.2 Flujo de pistón

En este flujo, el fluido avanza de manera ordenada y paralela, sin mezcla entre las capas. Cada partícula de fluido tiene el mismo tiempo de residencia en el reactor, lo que permite un control preciso de las reacciones.

2.1.3.1.3 Flujo disperso

Es un estado intermedio entre el flujo de pistón y el completamente mezclado. Hay una cierta mezcla longitudinal que crea un gradiente de concentración a lo largo del reactor, lo cual es común en sistemas con geometrías que inducen dispersión parcial.

2.1.4 Partes de un reactor

Un reactor biológico de lodos activados típicamente incluye las siguientes partes.

2.1.4.1 Zona de aireación

Es la sección del reactor donde se introduce oxígeno al sistema, generalmente mediante difusores de burbuja fina o gruesa o mediante otros sistemas de inyección de aire. La aireación es esencial para proporcionar oxígeno a los microorganismos aeróbicos, que descomponen la materia orgánica presente en el agua residual. Esta zona debe estar diseñada para maximizar la transferencia de oxígeno y promover un entorno óptimo para el crecimiento microbiano y la degradación de los contaminantes.

2.1.4.2 Sistema de mezcla

Este sistema es responsable de mantener una distribución homogénea de los lodos activados y del oxígeno en toda la zona de tratamiento. La mezcla adecuada evita la formación de zonas muertas y asegura que los microorganismos tengan un contacto constante con los sustratos y el oxígeno. Los sistemas de mezcla pueden ser mecánicos (agitadores) o hidrodinámicos (mediante la circulación del aire).

2.1.4.3 Entrada y salida

La entrada del reactor permite el flujo controlado del agua residual al sistema, mientras que la salida regula la descarga del agua tratada y, en algunos casos, el retorno de los lodos recirculados. Un buen diseño de las entradas y salidas es crucial para evitar problemas de cortocircuitos hidráulicos y asegurar un tiempo de retención adecuado dentro del reactor, optimizando la eficiencia del proceso de tratamiento.

2.1.5 Sistema de aireación

Consiste en difusores de aire, agitadores o sistemas de inyección de oxígeno que suministran el oxígeno necesario para el metabolismo de los microorganismos. Este sistema garantiza una mezcla adecuada y una distribución uniforme del oxígeno en el tanque de aireación.

2.1.5.1 Difusor de aire de burbuja fina

La membrana de estos difusores tiene pequeñas perforaciones que permiten el paso del aire en forma homogénea, entregando pequeñas burbujas que facilitan la transferencia de oxígeno en su recorrido ascendente, sin que ingrese líquido a las cañerías sumergidas, facilitando el arranque de los sopladores de aire y protegiendo las cañerías y difusores de sobrepresiones.

Figura 2. Difusor de aire de burbuja fina



Fuente. Gpconsultora.com, difusores de burbuja fina, (2024)

2.1.5.2 Sopladores

Los sopladores de aire son dispositivos utilizados en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para proporcionar el aire necesario en los sistemas de aireación. Estos equipos son esenciales para suministrar oxígeno al agua residual y promover la descomposición biológica de los contaminantes por parte de microorganismos aeróbicos.

Figura 3. Soplador de aire marca REPICKY



Fuente. Gpconsultora.com, sopladores rotativos, (2024)

2.2 Modelación fluidodinámica CFD

2.2.1 Introducción

En este apartado se presentan las bases de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), sobre las cuales está sustentada la presente investigación. Se describe un marco teórico de las principales aplicaciones en la modelación y simulación de flujos. Así mismo, se describen las etapas y procedimientos generales para llevar a cabo un análisis. Además,

se muestran los modelos y ecuaciones matemáticas en las que se basa, para la simulación de flujos.

se describen los modelos de turbulencia y esquemas numéricos de solución más comunes que complementan el análisis con CFD. (Boris miguel López rebollar, 2015, p. 1)

2.2.2 Que es CFD

Es una herramienta informática utilizada para entender y predecir el comportamiento de un fluido en unas condiciones determinadas.

Este comportamiento se podría estudiar en cada punto del fluido con las ecuaciones de Navier-Stokes, pero son demasiado complejas y por eso se recurre a las modelaciones.

Hay varios «tipos» de CFD, pero el más utilizado es el de «Volúmenes Finitos «, basado en dividir el fluido en pequeños «bloques» y simular el comportamiento en los vértices de cada uno. Es decir, en vez de tratar las «infinitas» moléculas del fluido, se tratarán un número finito.

Sobre ese fluido, el comportamiento que se busca comprender se basa en el movimiento, velocidad y presión, aunque también hay otros parámetros que se pueden estudiar.

Figura 4. Dinámica de fluidos computacionales



Fuente. Introducción a la modelación numérica con (CFD). Ramírez Ruíz, C. 2024.

2.2.3 Aplicaciones del software Flow simulation

"Es una plataforma del SolidWorks que puede simular el flujo de fluidos, transferencia de calor, en estado estable, transitorio: y las fuerzas de fluidos fundamentales para el éxito del diseño" (Palaguachi Romel, 2016. P. 39).

2.2.4 Objetivos del CFD en su aplicación.

- Hallar un diseño óptimo que satisfaga las condiciones necesarias de uso en algún elemento. Determinar el comportamiento de circulación del flujo del fluido.
- Revisar (mejorar) y desarrollar nuevos diseños. Antes de construirlos físicamente.
- Identificar fenómenos físicos como: esfuerzos, tensiones, cavitación, velocidad, flujo másico, caudal, etc. y sus causas, verificar si estos fenómenos pueden ocasionar alguna inconveniencia como deterioro en el equipo o accesorio.
- Tener una perspectiva real del funcionamiento o comportamiento de algún elemento o equipo.

Entre otros objetivos, que dependen de la necesidad de encontrar algún objetivo específico, ya que el CFD estudia se utiliza para analizar fluidos compresibles, incompresibles, newtonianos, no newtonianos estables, no estables transitorios etc.

2.2.5 Principios fundamentales en la dinámica de fluidos

Los fundamentos de la dinámica de fluidos se basan en tres leyes clave que describen cómo los fluidos se mueven y cómo se comportan bajo diferentes condiciones. Estas leyes son esenciales para comprender y analizar el flujo de fluidos en una variedad de contextos, desde aplicaciones ingenieriles hasta procesos naturales.

2.2.5.1 Ecuaciones (CFD)

Las ecuaciones de trasporte de continuidad (conservación de masa) y Navier-Stokes (segunda ley de Newton). Ayudan a predecir el movimiento del fluido, su solución se lo hace con una computadora dado su complejidad. (Knut, 2005).

2.2.5.1.1 Ley de la conservación de la masa (continuidad):

Esta ley establece que la masa no se crea ni se destruye en un flujo de fluido. En otras palabras, la cantidad total de masa en un sistema cerrado se mantiene constante a lo largo del tiempo. Para un flujo incompresible, esto se traduce en que el flujo volumétrico de un fluido a través de una sección transversal de un conducto permanece constante, siempre que no haya acumulación o pérdida de masa en esa sección. Matemáticamente, esto se expresa como:

$$\nabla \cdot \underline{V} = 0 \qquad \textbf{Ec. 1}$$

Esto implica que el campo de velocidad $\underline{V}$ es solenoidal, es decir, no hay cambios en el volumen del fluido a medida que se mueve.

2.2.5.1.2 Ley de conservación del momento (ecuaciones de Navier-Stokes)

Esta ley se basa en el principio de que el cambio en la cantidad de movimiento (momento) de un fluido es igual a la suma de las fuerzas que actúan sobre él. Las ecuaciones de Navier-Stokes, que describen esta conservación del momento, consideran tanto los efectos de la presión como la viscosidad en el flujo de fluidos. En un flujo incompresible, estas ecuaciones se simplifican para describir cómo las fuerzas internas y externas afectan al fluido:

$$\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{x}} + \frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{y}} + \frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{z}} = 0 \qquad \textbf{Ec. 2}$$

Donde:

$\frac{\partial u}{\partial x} =$ es la derivada parcial de la velocidad en la dirección x

$\frac{\partial v}{\partial y} =$ es la derivada parcial de la velocidad en la dirección y

$\frac{\partial w}{\partial z} =$ es la derivada parcial de la velocidad en la dirección z

U = es la componente vectorial de la velocidad en x.

V = es la componente vectorial de la velocidad en y.

W = es la componente vectorial de la velocidad en z.

Considerando un flujo incompresible y de viscosidad constante (son características de un fluido como el agua), el desarrollo de las ecuaciones de momento para un flujo tridimensional y tridireccional es:

$$\boldsymbol{\rho}\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho g_x + u\left(\frac{\partial^2(u)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(u)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(u)}{\partial z^2}\right) \qquad \textbf{Ec. 3}$$

$$\boldsymbol{\rho}\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \rho g_y + u\left(\frac{\partial^2(v)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(v)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(v)}{\partial z^2}\right) \qquad \textbf{Ec. 4}$$

$$\boldsymbol{\rho}\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho g_z + u\left(\frac{\partial^2(w)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(w)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(w)}{\partial z^2}\right) \qquad \textbf{Ec. 5}$$

2.2.5.1.3 Ley de conservación de la energía

Esta ley afirma que la energía total en un sistema de fluidos se conserva. En el contexto de la dinámica de fluidos, esto implica que la energía interna del fluido, así como la energía cinética y potencial, (ecuación de Bernoulli), deben ser consideradas en el análisis del flujo. La ecuación de conservación de energía para un flujo compresible es:

$$\partial t\,\partial(\rho e) + \nabla \cdot (\rho e v) = -p(\nabla \cdot v) + \nabla \cdot (k\nabla T) + \Phi \qquad \textbf{Ec. 6}$$

Donde:

$\boldsymbol{\rho}$ = densidad del fluido

$\boldsymbol{e}$ = energía interna específica del fluido.

$\boldsymbol{v}$ = (U, V y W) = campo de velocidad en las direcciones (X, Y y Z)

$\boldsymbol{p}$ = presión.

$\boldsymbol{k}$ = conductividad térmica

$\boldsymbol{T}$ = temperatura.

$\boldsymbol{\Phi}$ = término de disipación viscosa.

2.3 Variables operacionales

2.3.1 Velocidad

La ecuación de continuidad es un principio de conservación de masa que establece que, para un flujo incompresible en un conducto o canal, la cantidad de fluido que entra debe ser igual a la cantidad de fluido que sale. La fórmula general de la ecuación de continuidad es:

$$Q = A \times V \qquad \textbf{Ec. 7}$$

Donde:

Q = caudal volumétrico (m^3/s)

A = área de la sección transversal del conducto o canal (m^2)

V = velocidad del flujo (m/s)

Despejamos la velocidad de la ecuación, para conocer la velocidad de flujo de la ecuación:

$$V = \frac{Q}{A} \qquad \textbf{Ec. 8}$$

Esta fórmula se aplica tanto a conductos cerrados (como tuberías) como a canales abiertos y reactores, siempre que se considere el flujo constante y uniforme.

2.3.2 Reynolds

La fórmula del número de Reynolds se usa para determinar el régimen de flujo (laminar, transicional o turbulento) en diferentes geometrías. Aquí te presento cómo se formula para una tubería y para una sección rectangular.

2.3.2.1 Número de reynolds para una tubería

El número de Reynolds para el flujo en una tubería circular se define como:

$$Re = \frac{\rho \times V \times D}{\mu} \qquad \textbf{Ec. 9}$$

Dónde:

$\rho =$ Densidad del fluido (kg/m³)

V = Velocidad media del flujo (m/s)

D = Diámetro hidráulico de la tubería (m)

$\mu =$ Viscosidad dinámica del fluido (Pa·s o kg/(m·s))

También se puede expresar en función de la viscosidad cinemática:

$$Re = \frac{V \times D}{\nu} \qquad \textbf{Ec. 10}$$

Dónde:

$\nu =$ viscosidad cinemática (m²/s).

2.3.2.2 Número de reynolds para un canal o área rectangular (como un reactor)

En el caso de un área rectangular, se utiliza el diámetro hidráulico para definir el número de Reynolds:

$$A_h = b \times Y \quad \textbf{Ec. 11}$$

$$P_h = 2 \times Y + b \quad \textbf{Ec. 12}$$

$$D_H = \frac{4 \times A_h}{P_h} \quad \textbf{Ec. 13}$$

Dónde:

$A_h =$ Área hidráulica de la sección transversal (m²)

$P_h =$ Perímetro hidráulico (m)

$D_H =$ Diámetro hidráulico (m)

El número de Reynolds para el reactor es:

$$Re = \frac{V \times D_H}{\nu} \quad \textbf{Ec. 14}$$

Este enfoque es útil para evaluar el régimen de flujo en reactores abiertos o en canales que tienen geometrías no circulares.

- **Laminar**: Ordenado, Re < 2000
- **Transitorio**: Inestable, 2000 ≤ Re ≤ 4000
- **Turbulento**: Desordenado, Re > 4000 Re

2.3.3 Ecuación de Bernoulli

Para un fluido incompresible y en flujo estable, la ecuación de Bernoulli expresa la conservación de energía entre dos puntos en una corriente de fluido:

$$P + \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 + \rho \times g \times h = ctte. \quad \textbf{Ec. 15}$$

Donde:

P = Presión del fluido (Pa)

$\rho =$ Densidad del fluido (kg/m³)

V = Velocidad del fluido (m/s)

g = Aceleración debido a la gravedad (m/s²)

h = Altura respecto a un nivel de referencia (m)

Interpretación de la ecuación de Bernoulli:

$P =$ Presión, representa la energía de presión del fluido.

$\frac{1}{2} \times \rho \times V^2 =$ Energía cinética (debido a la velocidad del fluido).

$\rho \times g \times h =$ Energía potencial (debido a la altura del fluido con respecto a un nivel de referencia).

2.3.4 Presión hidrostática

La presión hidrostática **es** la presión que un fluido ejerce cuando está en reposo o cuando se mide en un punto donde el fluido no está en movimiento.

La fórmula para la presión hidrostática es:

$$P_{estatica} = \rho \times g \times h \quad \textbf{Ec. 16}$$

Donde:

$P_{estatica}$= presión hidrostática (Pa o N/m²)

ρ = densidad del fluido (kg/m³)

g= aceleración debido a la gravedad (9.81 m/s²)

h = altura del fluido desde el punto de referencia (m)

2.3.5 Presión dinámica

La presión dinámica está asociada con el movimiento del fluido. Para un fluido en movimiento, se calcula usando la siguiente fórmula:

$$P_{dinamica} = \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \qquad \textbf{Ec. 17}$$

Donde:

P dinámica = presión dinámica (Pa o N/m²)

ρ = densidad del fluido (kg/m³)

v= velocidad del fluido (m/s)

La velocidad (v) puede ser calculada de acuerdo con el perfil de flujo en el reactor, o se puede medir si es conocida la tasa de flujo y las dimensiones del reactor.

2.3.6 Presión total

Si deseas calcular la presión total **(**absoluta**)** en un punto dentro del reactor, puedes sumar la presión hidrostática, la presión dinámica y la presión atmosférica:

$$P_{total} = P_{estatica} + P_{dinamica} + P_{atmosferica} \qquad \textbf{Ec. 17}$$

La presión atmosférica = 10.332 m.c.a.

CAPÍTULO III

CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO

El estudio se enfoca en un análisis computacional de carácter (descriptivo-analítico), basado en simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD). Este enfoque permite observar el comportamiento de los fluidos dentro de un reactor biológico sin realizar experimentos físicos, lo cual es útil para evaluar condiciones de operación en un contexto realista sin la intervención experimental directa.

La investigación es **no experimental** y se basa en la modelación computacional. Se describe como **descriptiva** porque busca explicar y caracterizar el comportamiento del flujo, y **analítica** debido al uso de modelos matemáticos para interpretar los resultados de la simulación.

3.1 Descripción de la planta de tratamiento de aguas residuales

A continuación, se describe en detalle la PTAR de San Blas, presentando su ubicación, infraestructura y características operativas, con énfasis en los aspectos relevantes para el análisis fluidodinámico del reactor.

3.2 Ubicación y capacidad de la PTAR

3.2.1 Ubicación geográfica

Se encuentra a una altura de 1821 metros sobre el nivel del mar y la ubicación geográfica de la planta de tratamiento de aguas residuales de San Blas, es la siguiente:

Tabla 2. Ubicación (U.T.M.) de la PTAR de San Blas

COORDENADAS		
Punto 1	X=322999.5134	Y=7613663.9367
Punto 2	X=323027.0150	Y=7613652.1560
Punto 3	X=323026.7311	Y=7613642.3180
Punto 4	X=323089.4943	Y=7613595.2814
Punto 5	X=323098.9169	Y=7613664.2792
Punto 6	X=323092.9166	Y=7613731.1114
Punto 7	X=323071.0668	Y=7613797.9532
Punto 8	X=323032.7341	Y=7613906.2411
Punto 9	X=322921.3136	Y=7613828.1977
Punto 10	X=322953.0113	Y=7613771.1568

Fuente. EDTP (pág. 80), por GAMT, 2019

Figura 5. Ubicación geográfica, zona de San Blas



Fuente. Google Earth pro, 2024

3.2.2 Capacidad de tratamiento

La planta de tratamiento de San Blas, está diseñada para procesar un caudal máximo de 210 L/s, actualmente la planta opera a un caudal de 70 L/s, lo que representa

aproximadamente un tercio de su capacidad total. Siendo este el funcionamiento de 2 reactores biológicos.

Para la configuración de las condiciones de operación en el análisis CFD del reactor, tomamos en cuenta la operación de solamente 1 reactor biológico.

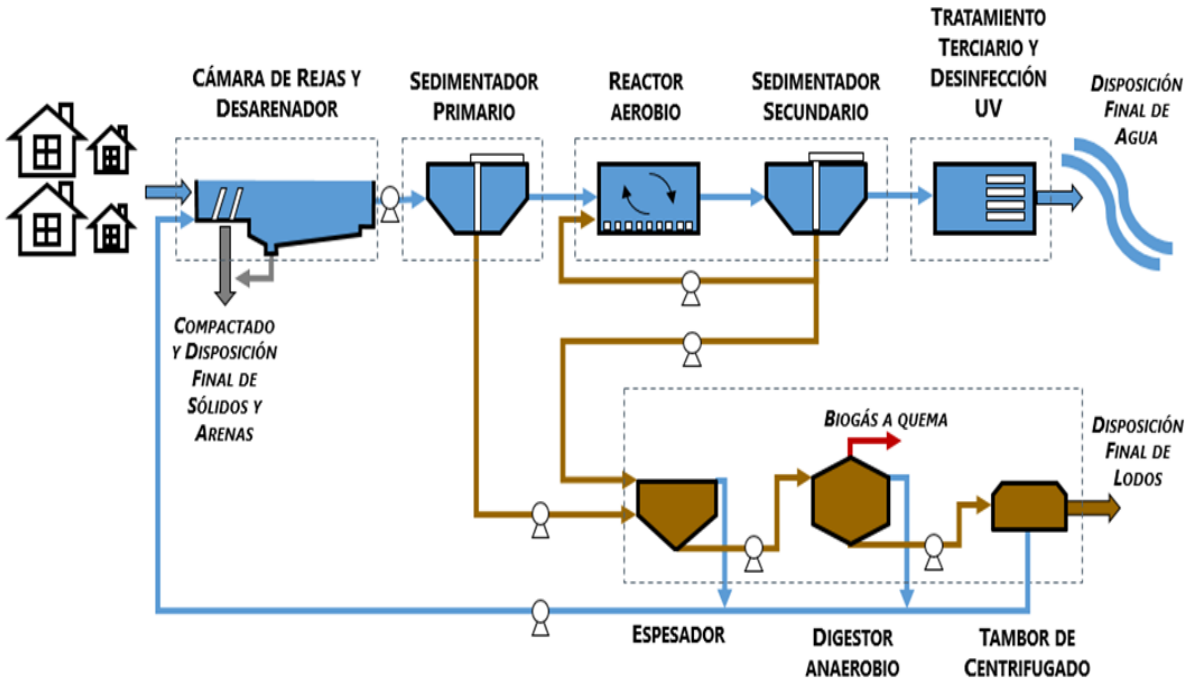
3.2.3 Procesos y componentes principales de la planta

Tabla 3. Procesos y componentes de la PTAR de San Luis

PROCESOS	DESCRIPCIÓN
Pretratamiento:	Incluye sistemas para la retención y eliminación de sólidos grandes y flotantes a través de canales de entrada, rejas gruesas y finas, y cámaras de bombeo con control automático. Estos sistemas protegen las etapas posteriores y optimizan el rendimiento del reactor biológico.
Tratamiento Primario:	La planta cuenta con tanques de sedimentación circulares en los que se elimina la mayoría de los sólidos en suspensión y parte de la materia orgánica, reduciendo la carga en el tratamiento biológico.
Tratamiento Secundario (Biológico):	Aquí se encuentra el reactor de lodos activados, diseñado para maximizar el procesamiento de la materia orgánica y con difusores de burbujas finas instalados a 4 metros de profundidad. Este reactor es el objeto principal del estudio, ya que en él ocurre la mayor parte de la mezcla y transferencia de oxígeno, elementos críticos en el proceso de tratamiento.
Tratamiento de Lodos:	Para el manejo de los residuos sólidos, el tratamiento de lodos incluye un espesador y un digestor anaeróbico. Estos equipos procesan los lodos residuales, reduciendo su volumen y estabilizándolos para su disposición final.

Fuente. Elaboración propia

Figura 6. Diagrama esquemático de las unidades presentes en la PTAR



Fuente. Informe EDTP, pág. 88 (2024)

3.3 Descripción del reactor biológico

Figura 7. Reactor biológico de la Planta de Tratamiento de San Blas



Fuente. Elaboración propia.

Figura 8. Reactor Biológico de la PTAR de San Blas



Fuente. Elaboración propia

Figura 9. Tuberías de ingreso, para el suministro de aire al reactor



Fuente. Elaboración propia

Figura 10. Tuberías el de afluente y recirculación



Fuente. Elaboración propia

Figura 11. Levantamiento de datos, geometría del reactor



Fuente. Elaboración propia

Figura 12. Reactor biológico, geometría interna



Fuente. Elaboración propia

Toda la información medida y recolectada del reactor se presenta a continuación en los siguientes puntos.

3.3.1 Características geométricas

El reactor es rectangular y está abierto en su parte superior, lo que permite el contacto con el aire. La simulación CFD considerará estas características, modelando el reactor con la misma geometría para representar fielmente el entorno físico.

Tabla 4. Dimensiones del reactor

GEOMETRÍA DEL REACTOR		
Ancho	12	m
Profundidad hidráulica	4	m
Largo	20	m
Altura de total	4,8	m

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 5. Geometría del canal de distribución

GEOMETRÍA DEL CANAL DISTRIBUCION		
Ancho	10	m
Largo	0.46	m
Altura de total	0.36	m
separación de platino (46x3x1cm)	0.5	m

Fuente. Elaboración propia.

3.3.2 Sistema de aireación y difusión

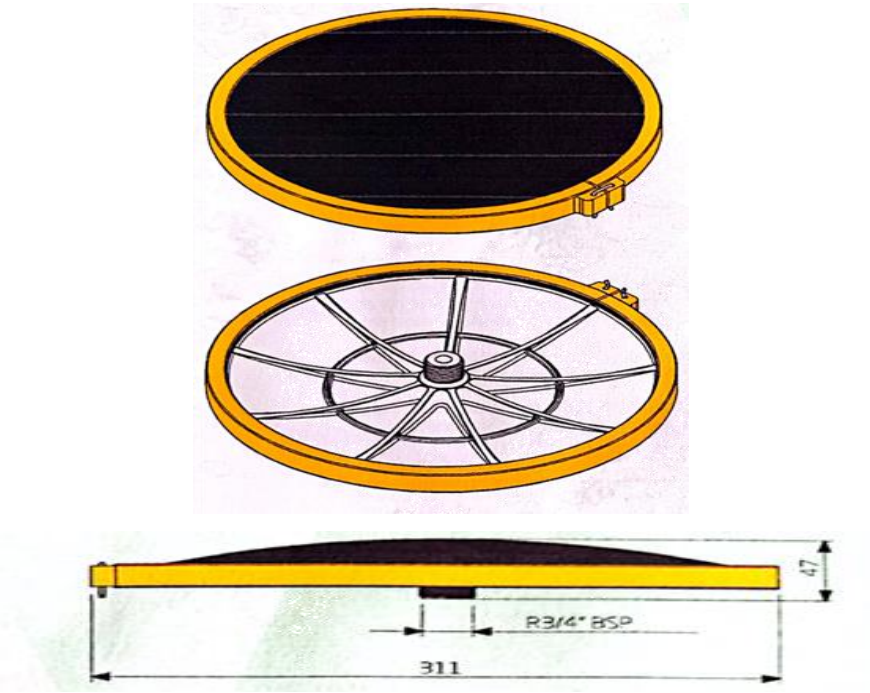
El sistema de aireación utiliza difusores de burbuja fina a 4 metros de profundidad, diseñados para generar una distribución uniforme de oxígeno a través del reactor. En el análisis CFD, se simulará este sistema de difusión para estudiar cómo el oxígeno se distribuye dentro del volumen del reactor. A continuación, en la tabla 6 se presenta las características del difusor de burbuja fina.

Tabla 6. Características del difusor de aire

PARÁMETROS	VALOR	UNIDAD
Diámetro de la membrana	300	mm
diámetro de la conexión roscada	3/4	plg BSP
Diámetro total	311	mm
Peso total unitario	620	gr
Rango de caudal para uso continuo	2-8	m3/h
Caudal máximo para mantenimiento	9	m3/h
Área activa de membrana	0,0375	m2
Rango de temperaturas de operación (aire)	5 a 60	º C
Materiales		
Membrana	EPDM	
Traba	AISI 304	
Código ADX	PCDRG300-PPG	

Fuente. Manual de operación de mantenimiento, PTAR de San Blas (2024)

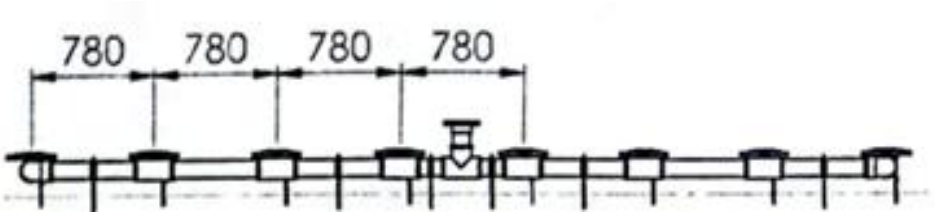
Figura 13. Difusor de aire de burbuja fina, tipo RG300



Fuente. https://www. repicky.com.ar difusor de aire de burbuja fina rg300 (2024).

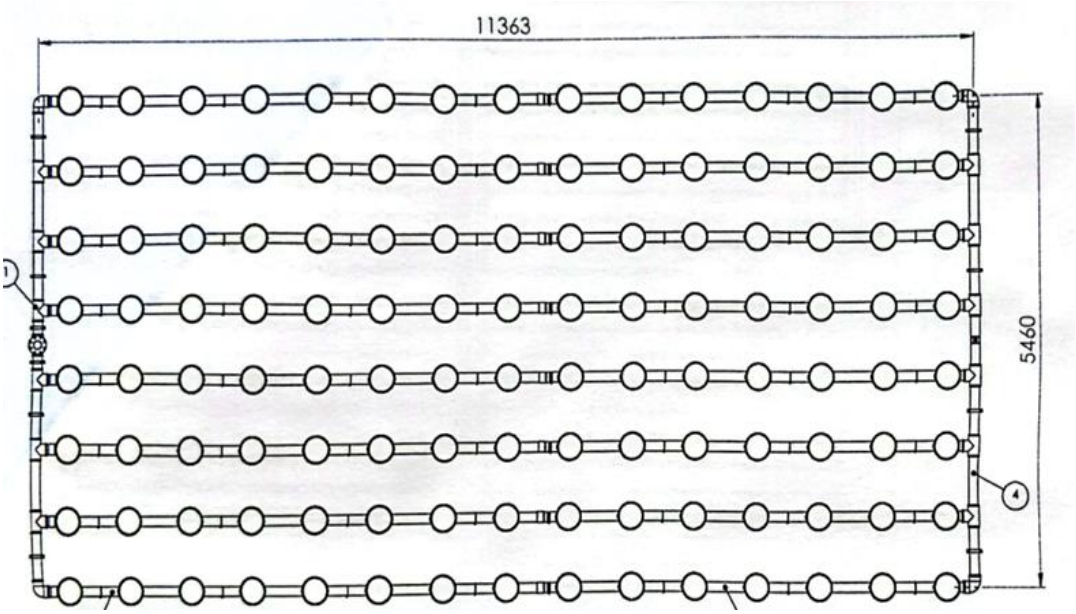
El reactor biológico cuenta 360 difusores, dividido en 3 parrillas, de las cuales cada parrilla cuenta con 120 difusores, la ubicación de cada difusor y parrillas se encuentra en las figuras siguientes.

Figura 14. Distancia de entre difusores, de lado más corto en (mm)



Fuente. Manual de instalación, operación y mantenimiento

Figura 15. Dimensiones de una parrilla en (mm)



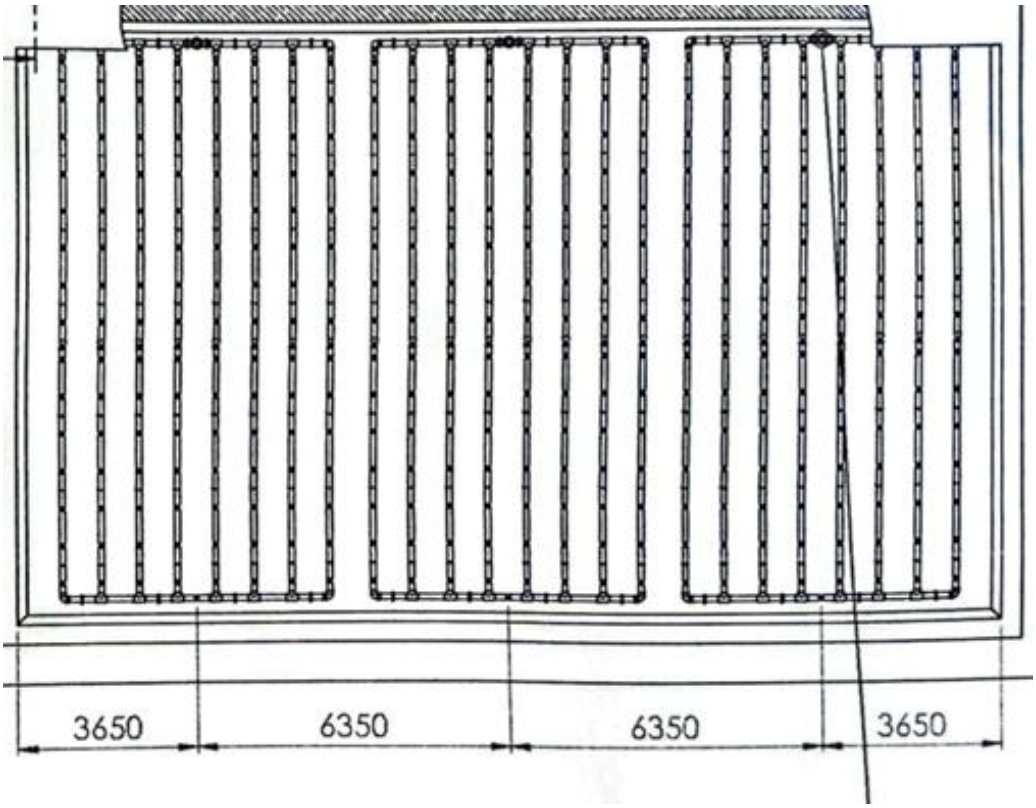
Fuente. Manual de instalación, operación y mantenimiento

Figura 16. Parrilla con 120 difusores



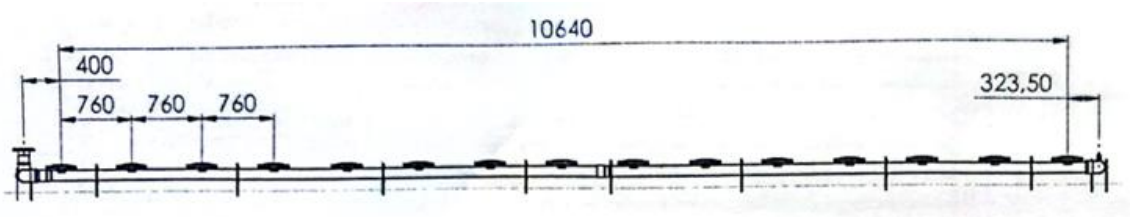
Fuente. Manual de instalación, operación y mantenimiento

Figura 17. Distancias entre parrillas en (mm)



Fuente. Manual de instalación, operación y mantenimiento

Figura 18. Distancias entre difusores de lado más largo en (mm)



Fuente. Manual de instalación, operación y mantenimiento

3.3.2.1 Sistema de aireación

El suministro de aire se realiza mediante un sistema de compresores o sopladores que inyectan aire al reactor. Estos sistemas deben ser dimensionados para proporcionar el aire necesario para cubrir la demanda de O2 para la respiración de las bacterias.

El sistema de difusión se encuentra conectados al sistema de sopladores, esto es con la finalidad de garantizar la proporción de aire deseado y debido a los mantenimientos preventivos y correctivos que pueda atravesar algún equipo, en caso de fallar alguno de ellos.

Tabla 7. Características del soplador de aire

CARACTERÍSTICAS SOPLADOR REPICKY SMITH 76		
Modelo	RT2034	
Caudal	1655	m3/h
Presión	0,6	kg/cm2
N°	305	
Revoluciones	2811	rpm
Potencia	50,3	hp

Fuente. Elaboración propia

Figura 19. Sala de máquinas, sopladores de aire



Fuente. PTAR de San Blas

Figura 20. Medidor de flujo de aire



Fuente. PTAR de San Blas

3.4 Parámetros hidráulicos de operación

Entre los parámetros de operación del reactor, incluye el caudal de ingreso de agua residual, el caudal de recirculación, ingreso de aire del soplador hacia los difusores dentro del reactor, temperatura, densidad del aire estos parámetros son fundamentales para configuración de la simulación y para representar las condiciones reales de funcionamiento. Los valores de caudales fueron obtenidos en base del registro histórico, bajo una descripción estadística, dando lugar al caudal máximo en la gestión 2023.

3.4.1 Velocidad del afluente de agua residual

Datos:

$Q_{afluente} = 77{,}3\ \frac{L}{s}$

$DN = 315\ mm$

$$Q = 77{,}3 \frac{L}{s} \times \frac{1\ m^3}{1000\ L} = 0.0773\ \frac{m^3}{s}$$

$$DN = 315\ mm\ \times \frac{1m}{1000\ mm} = 0.315\ m$$

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4} = \frac{\pi \times (0.315m)^2}{4} = 0.07793\ m^2$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.0773 \frac{m^3}{s}}{0.07793\ m^2} = 0.992 \frac{m}{s}$$

Donde:

$Q_{afluente}$ = Caudal de afluente (L/s)

DN = Diámetro nominal (mm)

V = $Velociadad\ de\ flujo$ (m/s)

A = Área de orificio (m^2)

3.4.2 Velocidad del caudal de recirculación

Datos:

$Q_{rec} = 12\ \frac{L}{s}$

$DN = 200\ mm$

$$Q = 12 \frac{L}{s} \times \frac{1\ m^3}{1000\ L} = 0.012\ \frac{m^3}{s}$$

$$DN = 200\ mm\ \times \frac{1m}{1000\ mm} = 0.2\ m$$

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4} = \frac{\pi \times (0.2m)^2}{4} = 0.031416m^2$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.012 \frac{m^3}{s}}{0.031416m^2} = 0.382 \frac{m}{s}$$

Donde:

Q_{rec} = Caudal de recirculación (L/s)

DN = Diámetro nominal (mm)

V = $Velociadad\ de\ flujo$ (m/s)

A = Área de orificio (m^2)

3.4.3 Velocidad de aire del sistema de difusores

Para calcular la velocidad del aire en todo el sistema de difusores, primero debemos convertir el flujo masico de kg/h a m3/s. usamos la densidad del aire a 70°C, dato obtenido del medidor del sistema de control, de aire

Datos:

$\dot{m} =$ 1119.84 kg/h,

$\rho =$ 1.164 kg/m^3

T = 70 °C

$$\dot{m} = \frac{1119.84\ \frac{kg}{h}}{3600\frac{s}{h}} = 0.31107\frac{hg}{s}$$

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{flujo\ masico}{densidad} = \frac{0.31107\ \frac{kg}{s}}{1.164\frac{kg}{m^3}} = 0.267\frac{m^3}{s}$$

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4} = \frac{\pi \times (0.3m)^2}{4} = 0.0707m^2$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.267\frac{m^3}{s}}{0.0707m^2} = 3.78\frac{m}{s}$$

$$V = \frac{3.78\frac{m}{s}}{360} = 0.0105\frac{m}{s}$$

Donde:

$\dot{m} =$ Flujo masico (kg/h), (kg/s)

$\rho =$ densidad (kg/m^3)

V = $Velociadad\ del\ aire$ (m/s)

A = Área de orificio (m^2)

Q = Caudal volumétrico (m^3/s)

La velocidad en todo el sistema es de 3.78m/s, la velocidad en cada difusor, es de 0.0105m/s.

3.4.4 Caudal de aire del sistema de difusores

Del cálculo anterior se obtiene el caudal del flujo, para realizar la siguiente operación en otra unidad y así realizar posteriormente una comparativa de caudales con el rango de funcionamiento del difusor.

$$Q = 0.267\frac{m^3}{s} \times \frac{3600s}{1h} = 961.2\frac{m^3}{h}$$

$$Q = \frac{961.2\frac{m^3}{h}}{360} = 2.67\frac{m^3}{h}$$

El caudal de flujo de aire en todo el sistema es de 961.2 m^3/h, el caudal de flujo de aire en cada difusor, es de 2.67m^3/h.

3.4.5 Velocidad promedio dentro del reactor

Tomar en cuenta que el área se obtiene de la sección transversal del reactor.

Datos.

$Q_{afluente} = 77.3\ \frac{L}{s}$

L = 20 m

W = 12m

$$Q = 77.3\frac{L}{s} \times \frac{1\ m^3}{1000\ L} = 0.0773\ \frac{m^3}{s}$$

$$A_{reactor} = L \times W$$

$$A_{reactor} = 4m \times 12m = \ 48m^2$$

$$V_{prom} = \frac{Q}{A_{reactor}}$$

$$V_{prom} = \frac{0.0773\ \frac{m^3}{s}}{48m^2} = \ 0.00146\ m/s$$

donde:

V prom = Velocidad promedio del fluido en el reactor (m/s),

Q = es el caudal volumétrico del flujo (m^3/s),

A = Área de la sección transversal del reactor (m^2).

L = longitud del reactor

W = ancho del reactor

3.4.6 Presión total

Si el fluido es agua con una densidad de 1000 kg/m^3 (a 20°C) y asumiendo la velocidad del fluido es 0.5 m/s, la presión dinámica sería:

$$P_{dinamica} = \frac{1}{2} \times \rho \times V^2$$

$$P_{dinamica} = \frac{1}{2} \times (1000\ \frac{kg}{m^3}) \times (0.5 \frac{m}{s})^2 = 125\ Pa$$

Si el fluido está a una altura h=4 m la presión hidrostática sería:

$$P_{hidrostatica} = \rho \times g \times h$$

$$P_{hidrostatica} = (1000 \frac{kg}{m^3}) \times (9.81 \frac{m}{s^2}) \times (4m) = \ 39240\ Pa$$

La presión total en ese punto sería:

$$P_{total} = \ P_{hidrostatica} + \ P_{dinamica} + P_{atmosferica}$$

$$P_{total} = 39240\ Pa + \ 125\ Pa \ + \ 101325 = \ 140690\ Pa$$

$$P_{total} = \ 140690\ Pa \ \times \frac{1\ m.c.a.}{9806.65} = 14.34 m.c.a.$$

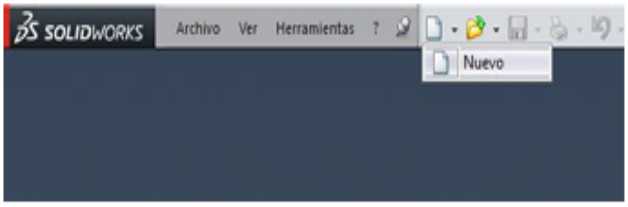
CAPÍTULO IV

CAPITULO IV MODELO FLUIDODINÁMICO DEL REACTOR BIOLÓGICO

4.1 Modelación geométrica en SolidWorks 2022

En este apartado se explicará el proceso seguido para crear, mediante el software utilizado, las piezas que conforman el reactor biológico de lodos activados en este estudio. Se detallará cómo se trasladaron al entorno digital cada uno de los elementos, considerando las medidas previamente mencionadas.

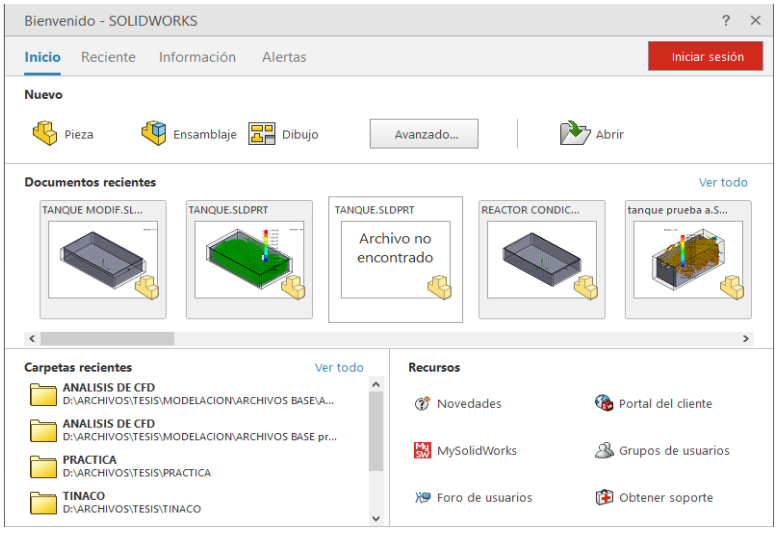
Figura 21. Abrir un nuevo archivo



Fuente. SolidWorks

Para abrir un archivo nuevo, debes hacer clic en la cinta superior sobre el icono que se muestra en la Figura 21 y luego seleccionar “Nuevo”. A continuación, aparecerá el cuadro de diálogo ilustrado en la Figura 22.

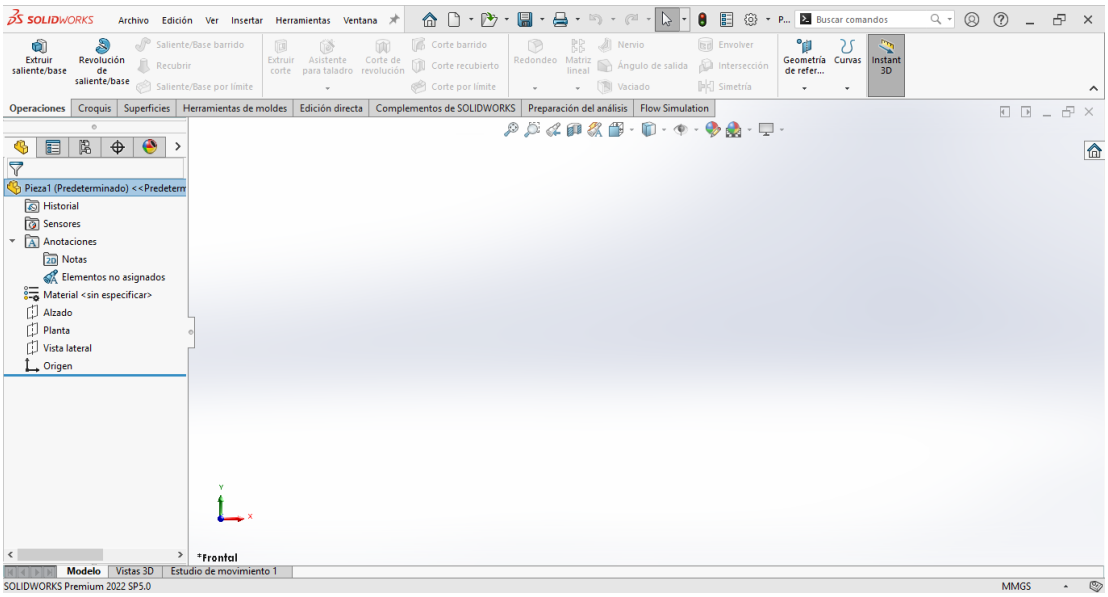
Figura 22. Nueva pieza



Fuente. SolidWorks

En este cuadro de diálogo se presentan tres opciones. La primera permite crear un archivo de pieza, en el cual se puede modelar un componente individual. La segunda opción permite unir varias piezas previamente generadas para formar un ensamblaje completo. Finalmente, la tercera opción permite generar planos de taller, generalmente de una pieza o un ensamblaje ya existente o por crear. Para el caso abordado en este apartado, se debe seleccionar la casilla de pieza para comenzar a modelar el reactor biológico. A continuación, se muestra lo descrito en la Figura 23.

Figura 23. Ventana de inicio de pieza nueva

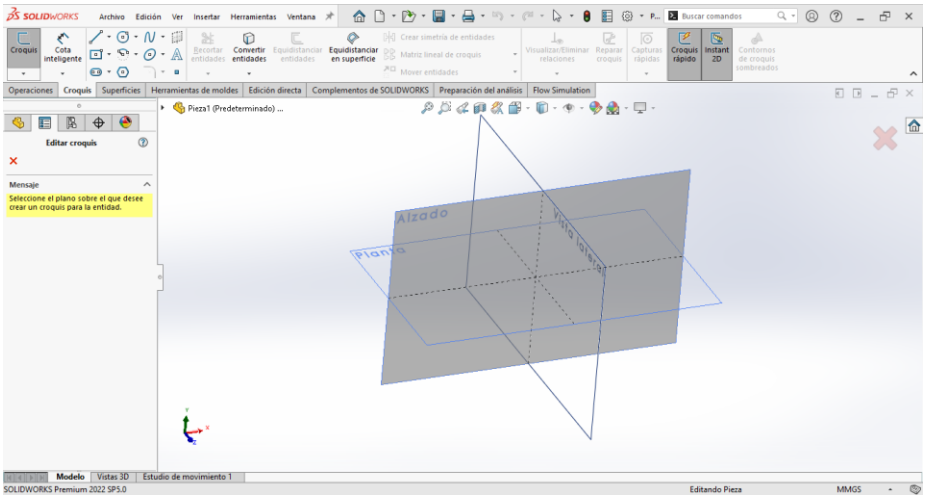


Fuente. SolidWorks

En esta ventana se pueden observar varias pestañas en la cinta superior. A continuación, se describen las pestañas utilizadas durante todo el proceso de modelado de la geometría. La primera, “Operaciones”, permite crear volúmenes y formas de diversos tipos a partir de croquis de geometría cerrada, en la mayoría de los casos. La segunda, “Croquis”, permite realizar los dibujos necesarios para generar el modelo 3D. La última, “Flow Simulation”, se utiliza para simular y analizar la geometría creada.

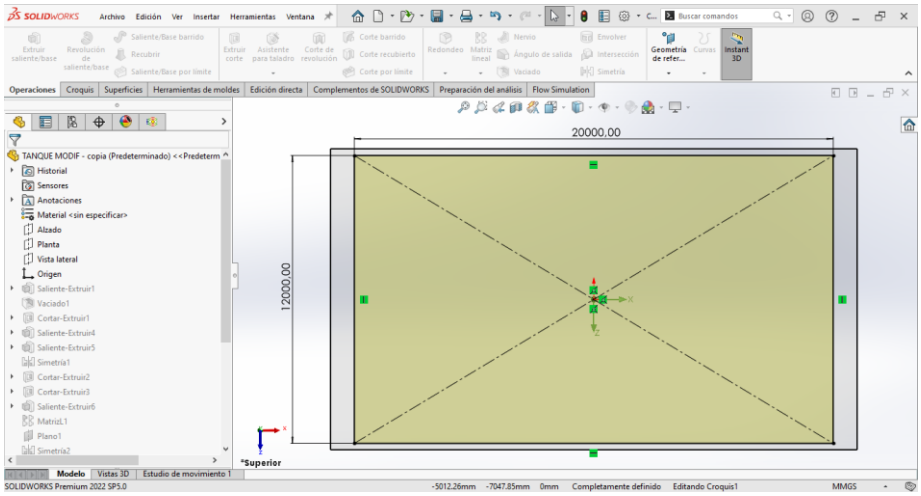
Para generar la geometría del reactor, se comenzará realizando un croquis a partir de vista en planta, que posteriormente será revolucionado para obtener el modelo 3D. Para esto, en la pestaña “Croquis”, se selecciona la opción “Croquis” y, a continuación, se elige el plano “Planta” para plasmar el dibujo (ver Figura 24). Al seleccionar el plano “Planta”, el programa ajustará automáticamente la vista a una posición normal al plano, lo que facilita la creación de un croquis de manera más clara y precisa.

Figura 24. Selección de tipo de vista, para inicio de trazado



Fuente. SolidWorks

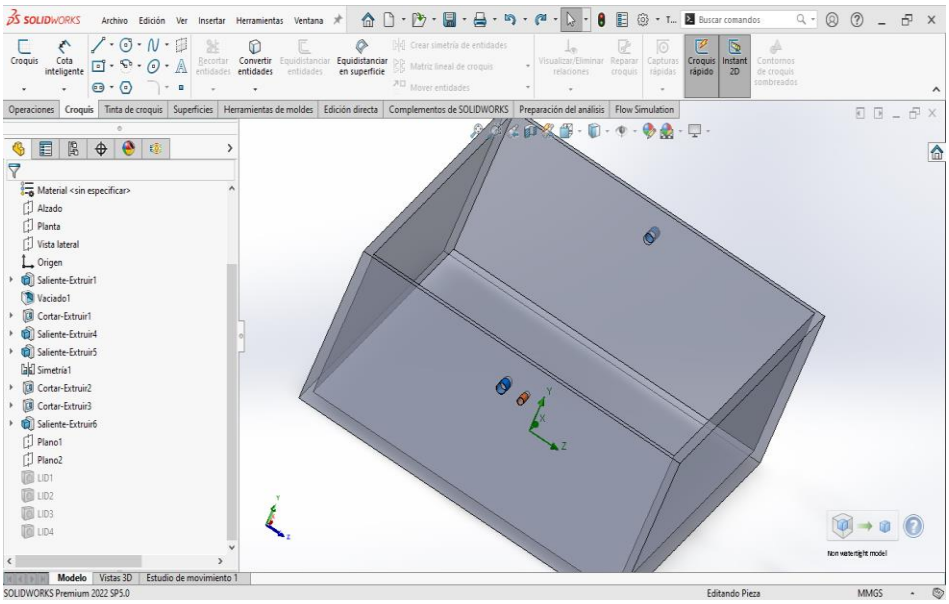
Figura 25. Trazado de dimensiones del reactor



Fuente. SolidWorks

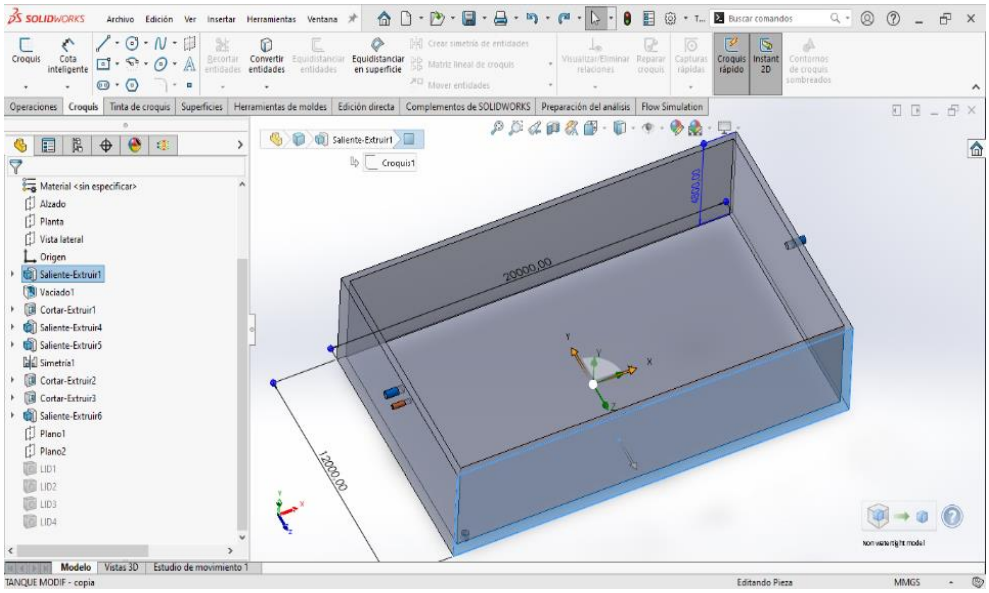
Como se puede observar, la geometría dibujada del reactor, plasmando cada dimensión de lo físico a lo digital. Utilizando la herramienta “Cota inteligente”, ubicada en la cinta superior, se pueden agregar cotas de manera precisa y clara. Con esta herramienta, basta con hacer clic entre los dos puntos donde se desea colocar la cota para que esta aparezca. Si se busca determinar la longitud de una línea, solo es necesario hacer clic sobre ella para acotarla. Del mismo modo, esto aplica a las circunferencias, permitiendo establecer sus dimensiones con un solo clic.

Figura 26. Vista 3D del reactor, con tuberías de ingreso



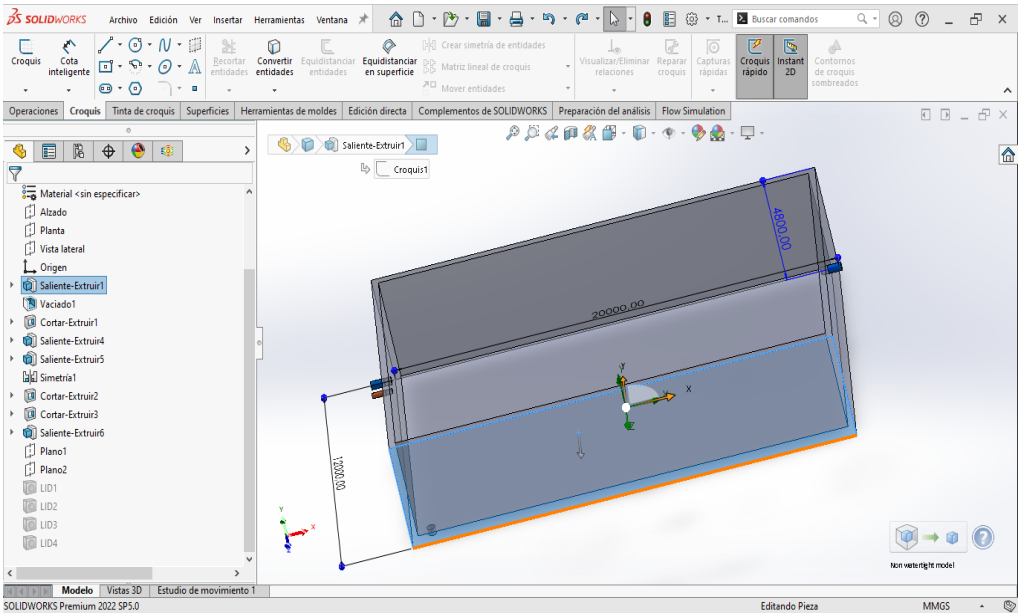
Fuente. SolidWorks

Figura 27. Vista 3D, con sus dimensiones



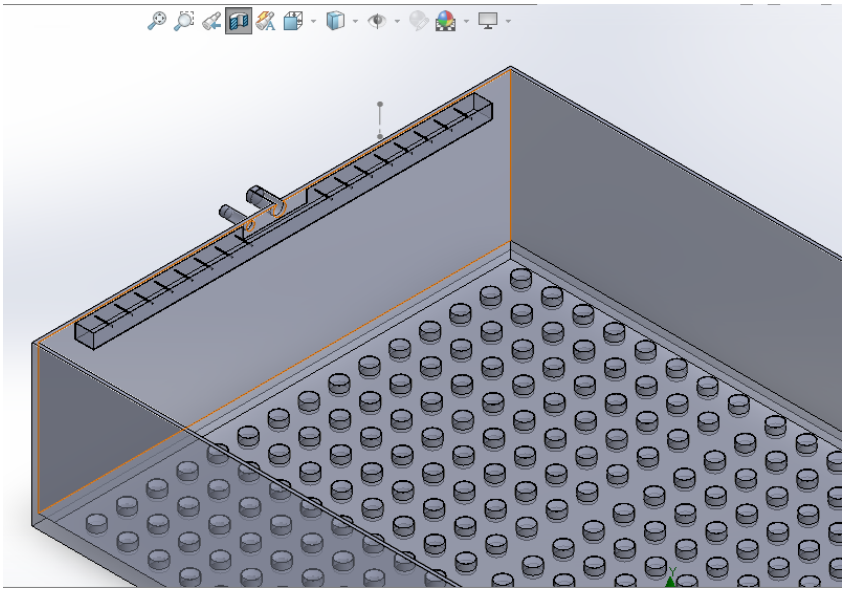
Fuente. SolidWorks

Figura 28. Reactor con sus dimensiones y tuberías de ingreso y salida



Fuente. SolidWorks

Figura 29. Cámara de distribución dentro del reactor



Fuente. SolidWorks

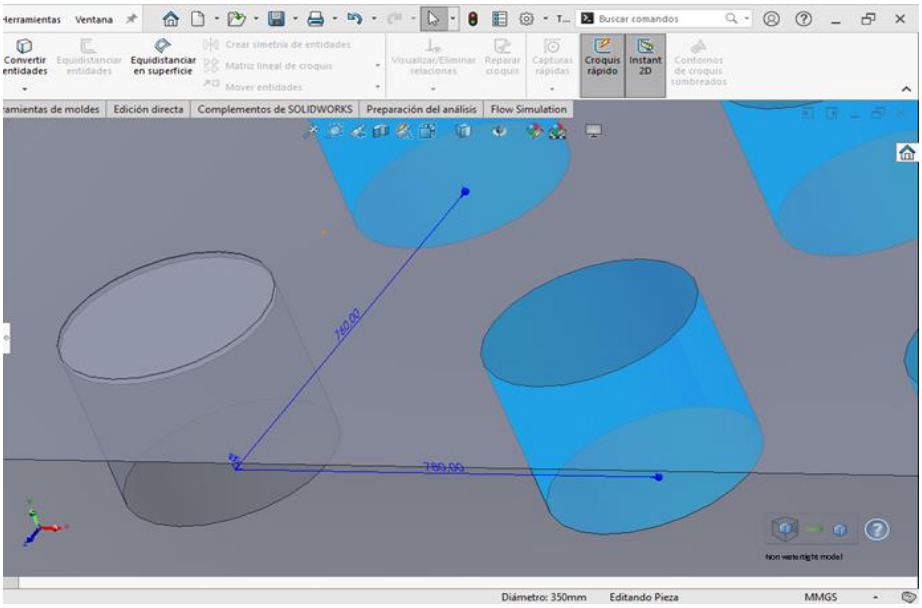
4.1.1 Modelo geométrico de sistema de difusores

El modelado geométrico del sistema de difusores se llevó a cabo respetando las distancias entre las parrillas, así como las distancias entre el muro y las parrillas. Además, se consideraron las separaciones entre los difusores, tanto en sentido horizontal como vertical. En total, se modelaron 3 parrillas, cada una con 120 difusores.

4.1.1.1 Difusores

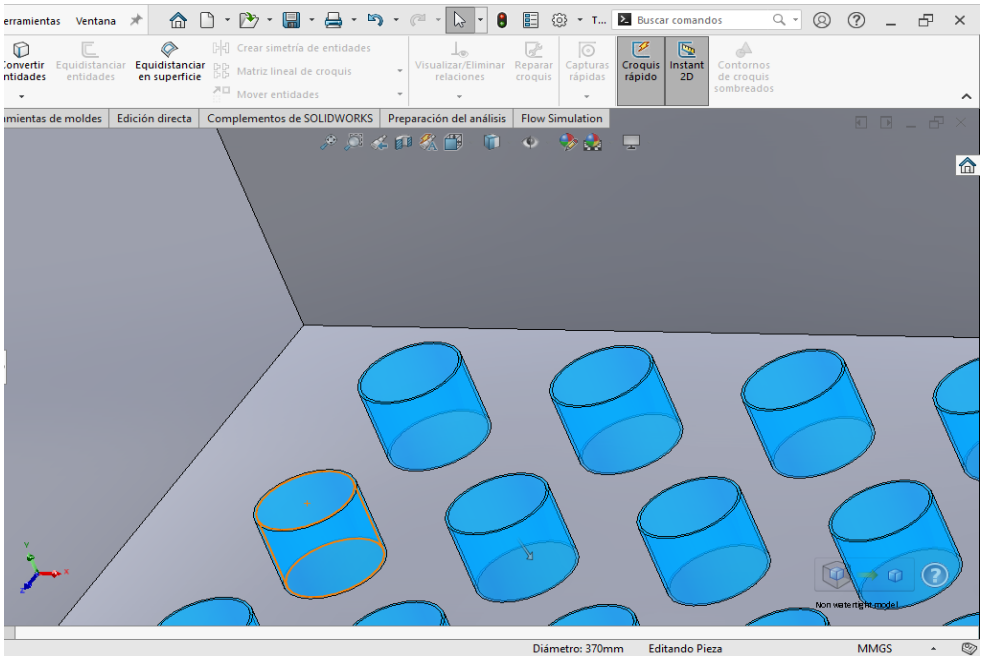
En este punto, se crea la geometría completa del sistema de difusores de aire dentro del reactor, tomando en cuenta los datos mencionados anteriormente. A continuación, se presenta el modelo resultante. Es importante destacar que la forma cilíndrica es una representación simplificada de un difusor. Aunque en la realidad un difusor está compuesto por varias partes, en el modelado no es necesario detallar cada componente, ya que el enfoque está en su funcionamiento. En este modelo, el diámetro del difusor es de 300 mm y se encuentra a una altura de 225 mm desde el piso hasta la membrana.

Figura 30. Modelo geométrico de un difusor, con sus respectivas distancias



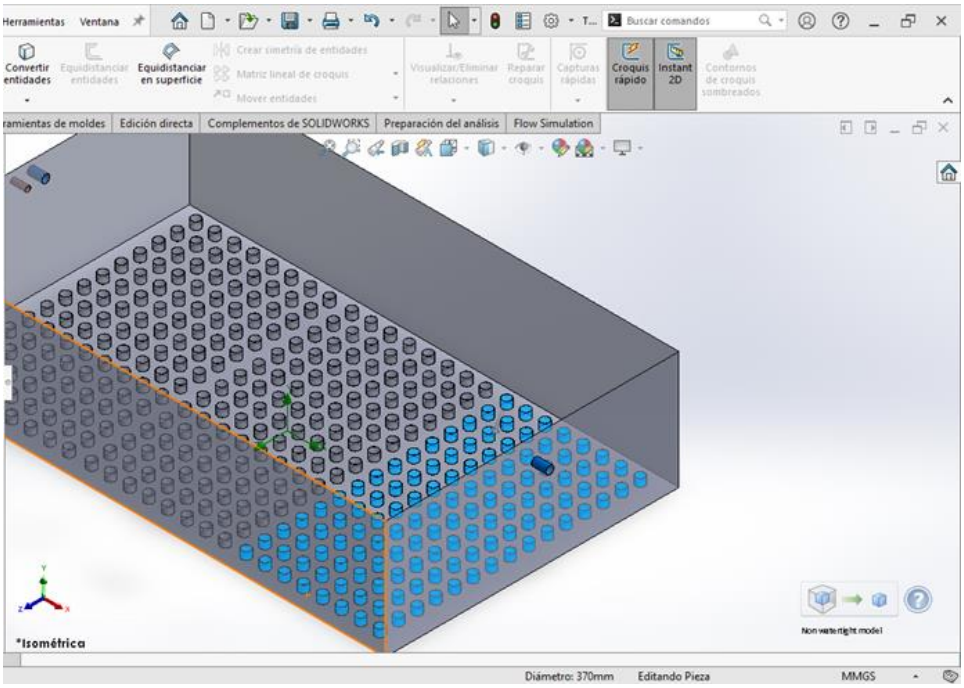
Fuente. SolidWorks

Figura 31Visualizacion parcial de un grupo de difusores



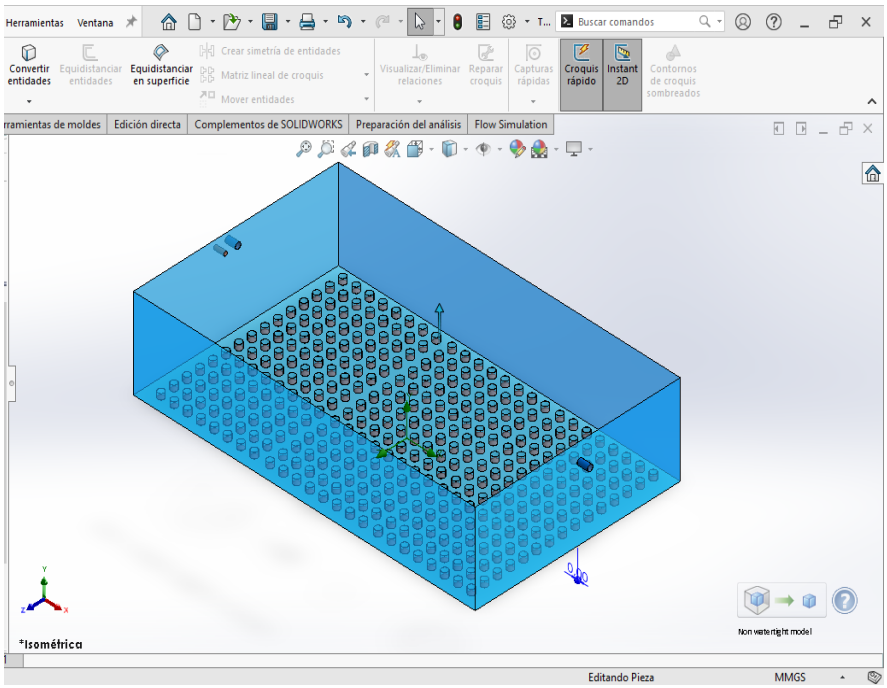
Fuente. SolidWorks

Figura 32. Modelado geométrico de las parrillas de difusores



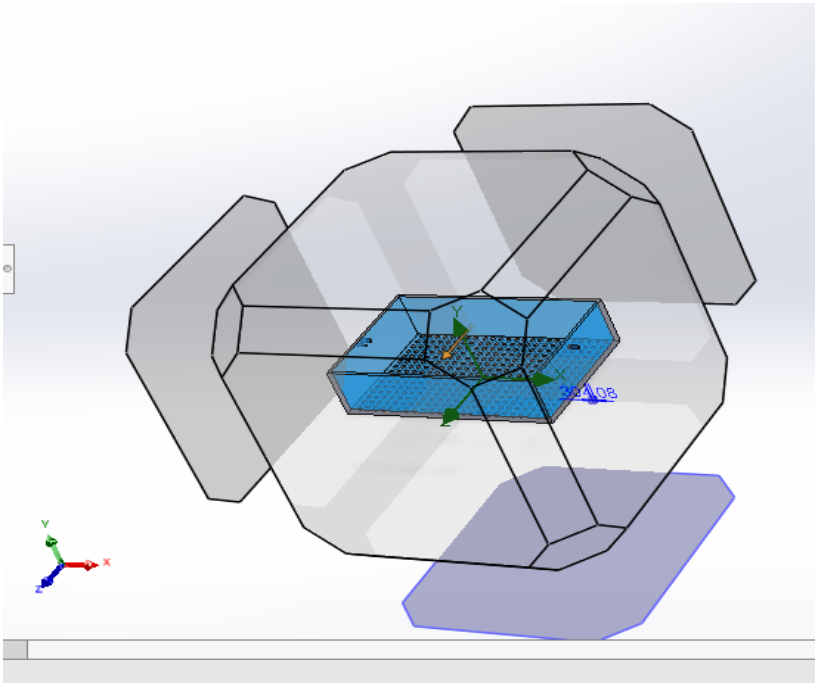
Fuente. SolidWorks

Figura 33. Vista 3D del reactor con los 360 difusores



Fuente. SolidWorks

Figura 34. Modelación geométrica del reactor Biológico

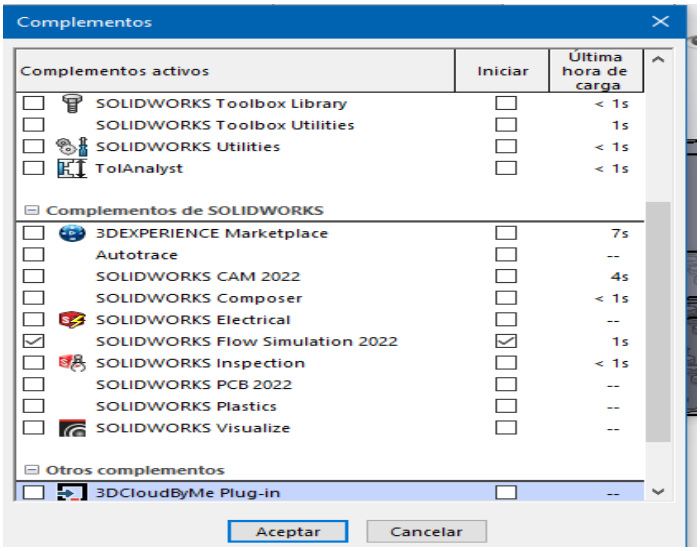


Fuente. SolidWorks

4.2 SolidWorks (Flow Simulation)

Este complemento permite realizar estudios de dinámica de fluidos computacional (CFD), proporcionando información detallada sobre el comportamiento del flujo. Para acceder a la ventana de simulación, primero se debe activar el complemento, tal como se muestra en la Figura 35. Para ello, es necesario abrir el programa y dirigirse a la cinta de herramientas, donde aparecerá una pestaña llamada “Flow Simulation”

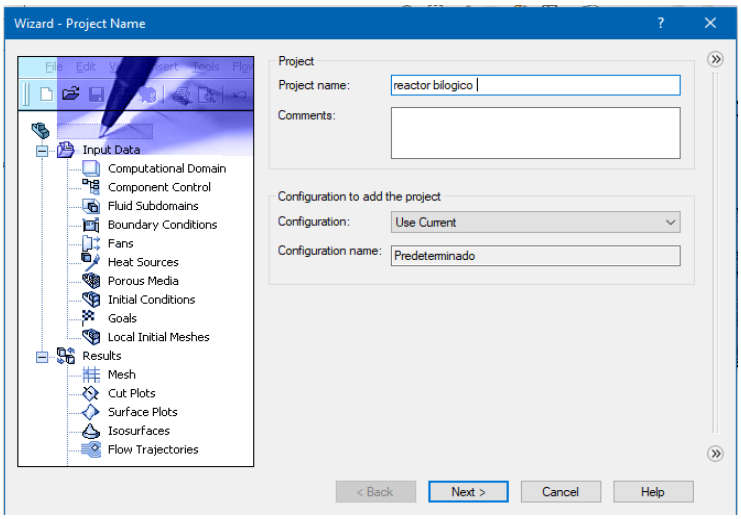
Figura 35. Habilitación del complemento



Fuente. SolidWorks

Para comenzar, es importante tener en cuenta que la herramienta está en inglés. El primer paso es iniciar un nuevo proyecto. Para ello, se debe hacer clic en la opción "Wizard", disponible en la pestaña “Flow Simulation”. En la Figura 36 se puede observar la primera ventana, donde se puede ingresar el nombre del proyecto, así como configurar el modelo que se utilizará.

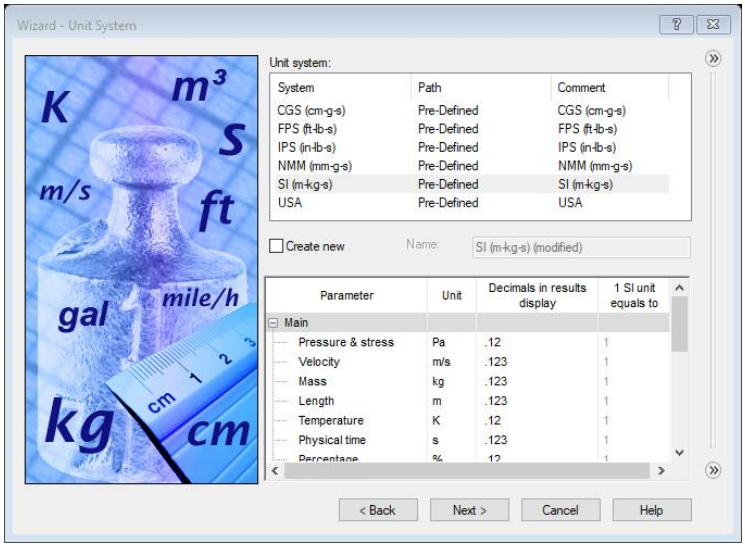
Figura 36. Wizard-Projet Name



Fuente. SolidWorks

En la ventana mostrada en la Figura 37, se puede seleccionar el sistema de unidades. Por defecto, se deja el sistema de unidades establecido. Sin embargo, es posible modificar cualquiera de las opciones disponibles para hacer la introducción de datos más sencilla según las preferencias del usuario.

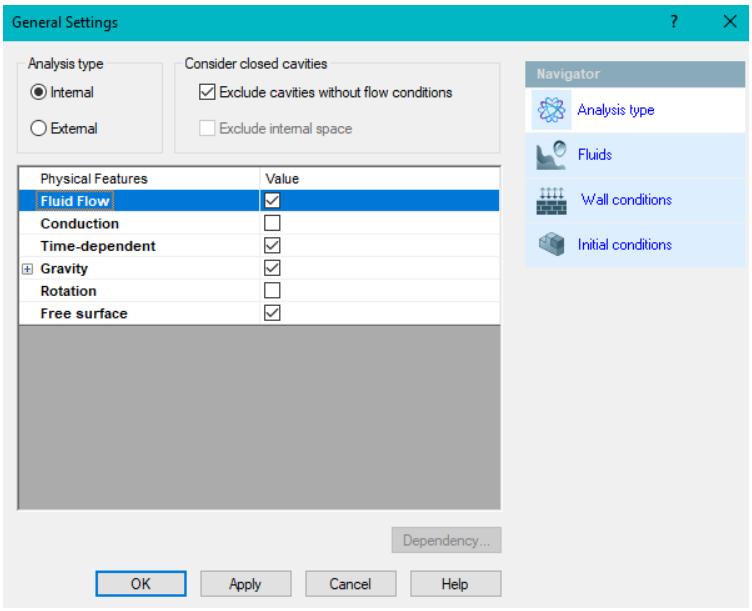
Figura 37. Wizard - Unit System



Fuente. SolidWorks

En la Figura 38, se debe hacer clic en el cuadro de “Fluid Flow”. Al seleccionar esta opción, se activa el estudio de dirección de flujo, para observar dentro del reactor la dirección de flujo.

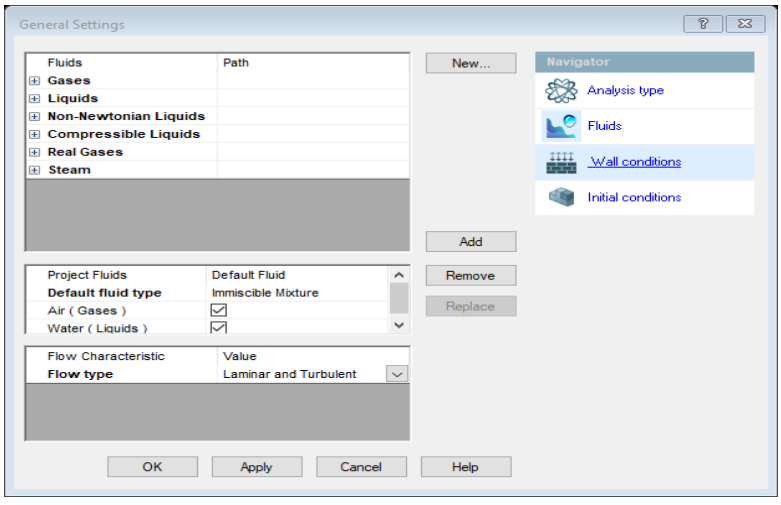
Figura 38. Wizard - Analysis Type



Fuente. SolidWorks

En la Figura 39, se deben seleccionar el fluido y el material que SolidWorks tomará como predeterminados para el análisis. Si se utiliza un solo material, esto simplificará tanto la introducción de datos como la resolución de los cálculos, facilitando el proceso de simulación.

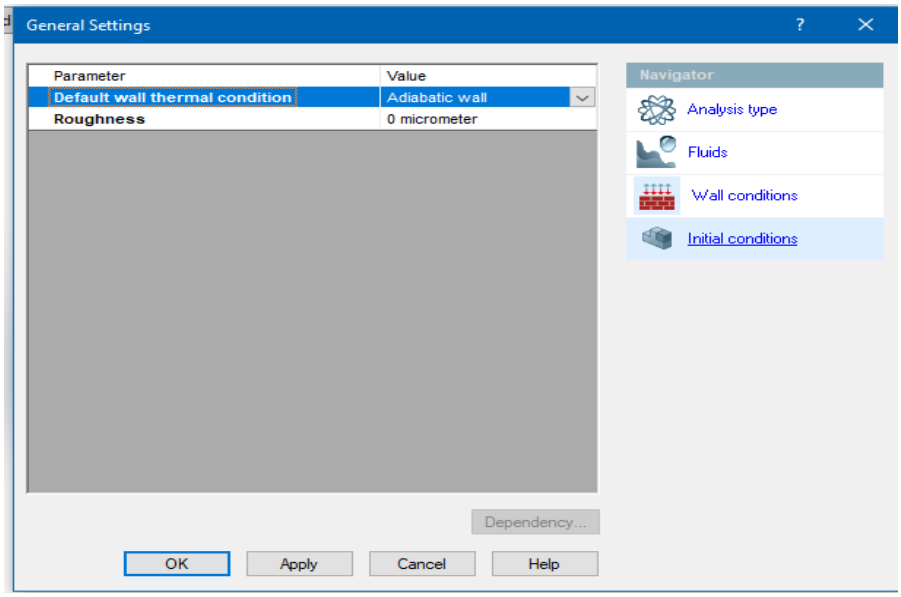
Figura 39. Wizard - Default Fluid



Fuente. SolidWorks

En la siguiente figura 40, se considera que la rugosidad es nula. Aunque esto es una aproximación, tomando en cuenta que la rugosidad del muro es liso, para facilitar el cálculo del ordenador.

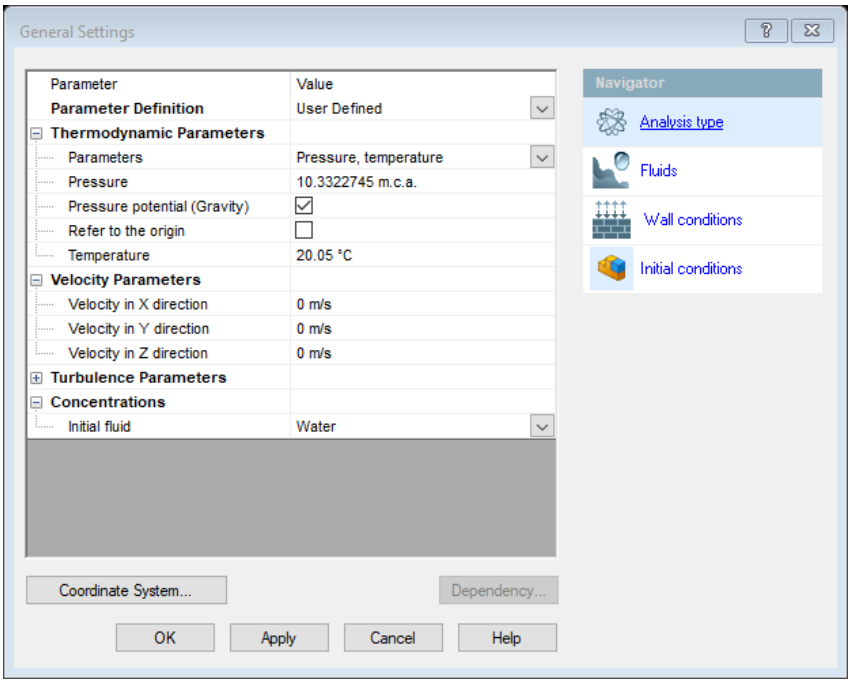
Figura 40. Wizard - Wall Conditions



Fuente. SolidWorks

En cuanto a lo que se refiere la Figura 41 se pueden definir las condiciones iniciales del flujo principal, se pueden también definir en el momento de configuración de la simulación.

Figura 41. Wizard - Initial Conditions



Fuente. SolidWorks

4.3 Especificaciones técnicas del ordenador

El equipo computacional, cuenta con las siguientes características:

Tabla 8 características del equipo computacional

CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO	
Procesador	Intel(R) Core (TM) i5-10400F CPU @ 2.90GHz 2.90 GHz
Memoria RAM	16 GB DDR4
Procesador gráfico	NVIDIA GeForce GT 710 de 2GB
Sistema operativo	Windows 10 Pro
Disco duro	hikvision SSD 240 GB

Fuente. Elaboración propia

4.4 Configuración de la malla

Antes de la construcción del mallado se realizó un seccionamiento geométrico en el paso anterior, este permite mallar de mejor manera y obtener una malla de excelente

calidad. Por tanto, la calidad de la malla es un elemento significativo en la convergencia, estabilidad y exactitud de los resultados en la simulación (Enríquez, 2018).

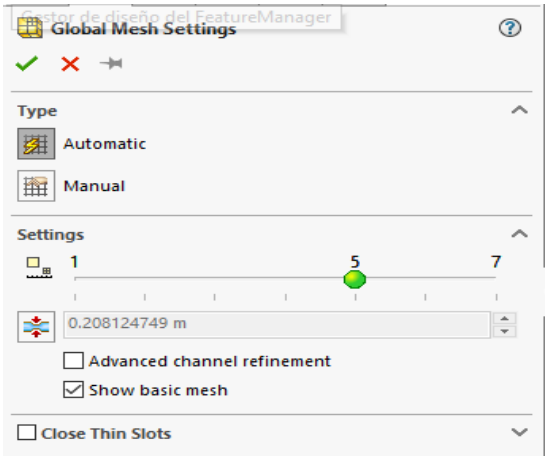
Malla global: Al principio, genero una malla general para todo el reactor, incluyendo el volumen de agua dentro del tanque y las tuberías. Esta malla es más gruesa al principio para que la simulación sea más rápida.

Malla refinada: En las zonas donde el flujo es más complejo, como cerca de las entradas del fluido o los difusores de aire, utilizo una malla más fina. Esto me ayuda a capturar detalles más precisos de cómo se mueve el fluido en estas áreas críticas.

Malla en las paredes: En las superficies internas del reactor, donde el fluido interactúa con el material del tanque (por ejemplo, las paredes lisas o rugosas), también coloco una malla más refinada. Esto es porque la interacción fluido-pared es importante para el comportamiento del flujo, como la fricción.

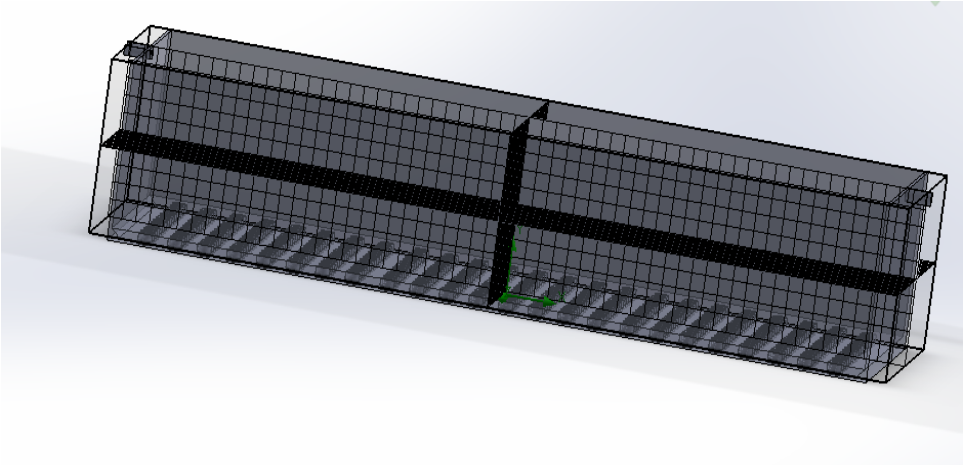
Con la configuración de malla, encontrándose en el nivel 5 se obtiene un valor de nodos y del tiempo

Figura 42. Nivel de mallado



Fuente. SolidWorks

Figura 43. Malla del reactor



Fuente. SolidWorks

4.4.1 Generación de mallado de los difusores de aire

El mallado es el proceso mediante el cual divido el modelo geométrico en pequeñas celdas. Este paso es crucial porque la simulación CFD resuelve las ecuaciones de fluido dentro de cada celda. Si la malla no está bien hecha, los resultados de la simulación no serán precisos.

4.4.2 Configuración de Condiciones de Contorno

Tabla 9. Condiciones de borde introducidos al sotware

CONDICIONES DE BORDE		
PARÁMETRO	**VALOR**	**UNIDAD**
velocidad afluente	0.992	m/s
velocidad de recirculación	0,382	m/s
velocidad difusores	0.0198	m/s
presión del efluente (ambiente)	10.332	m.c.a.

Fuente. Elaboración propia

Tabla 10. Condiciones iniciales introducidos al software

CONDICIONES INICIALES		
PARÁMETRO	**VALOR**	**UNIDAD**
temperatura	20,05	°C
Presión ambiental	10.332	m.c.a.
Intensidad de turbulencia	5	%
paredes del reactor (rugosidad)	0	-

Fuente. Elaboración propia

CAPÍTULO V

CAPITULO V RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se exponen los resultados de la modelación fluidodinámica realizada sobre el reactor biológico de lodos activados en la PTAR San Blas. Se describen y analizan los patrones de flujo, presiones, distribución de velocidades, perfil de velocidades y presiones, basándose en la simulación CFD.

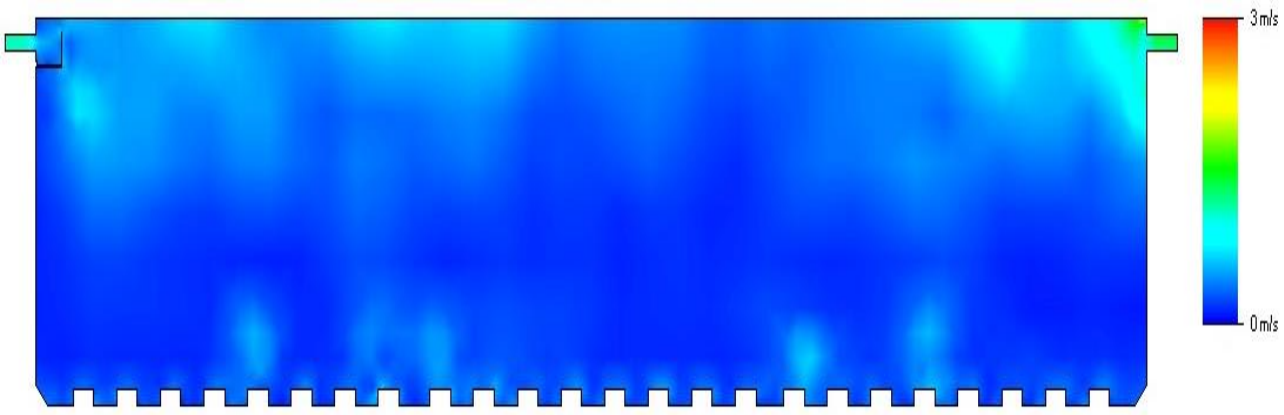
A continuación, se realiza el estudio cualitativo del campo de velocidad y presiones analizando los resultados obtenidos y un estudio cuantitativo de los perfiles de velocidad y presión.

5.1 Análisis del cualitativo

5.1.1 Resultados y análisis de la Simulación CFD (velocidad)

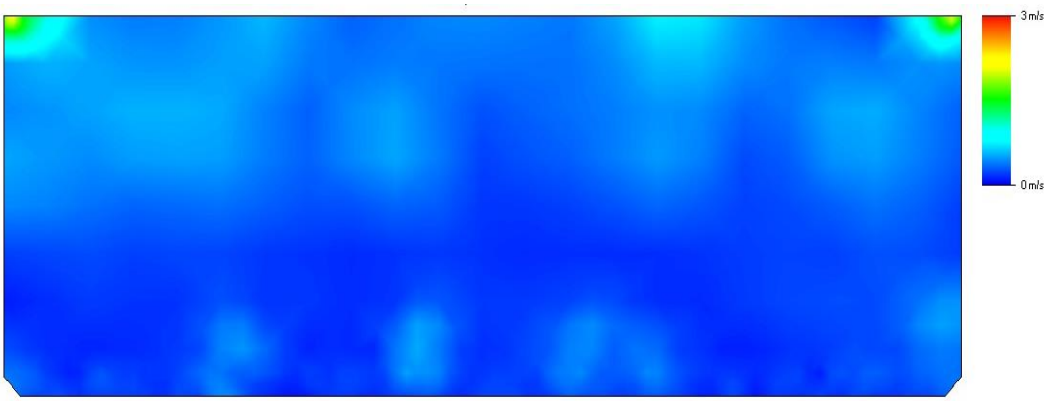
5.1.1.1 Sección del modelo 3D de la velocidad

Figura 44. Distribución de Velocidades (Cut Plot), vista longitudinal



Fuente. SolidWorks

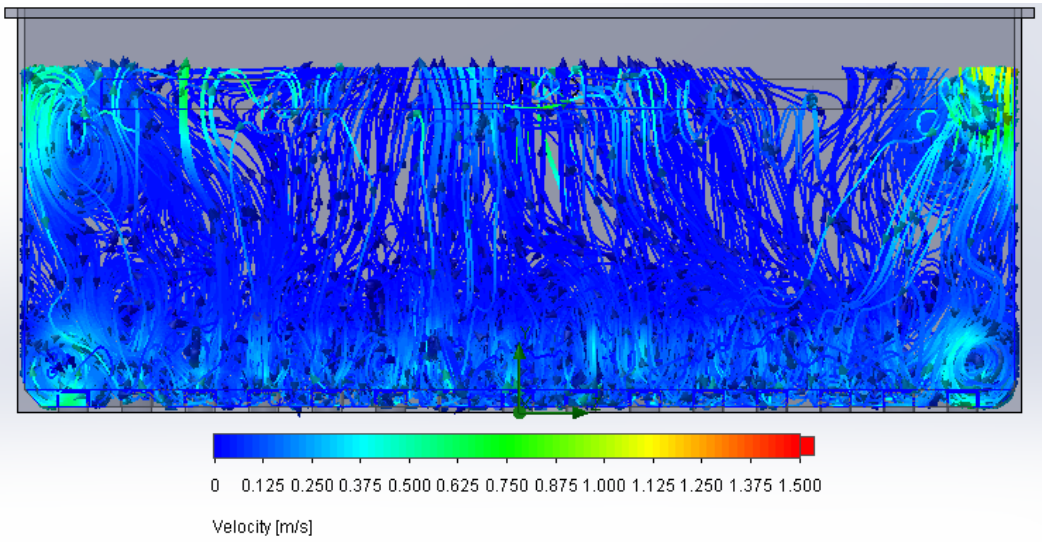
Figura 45. Distribución de velocidad (cut plot), vista transversal



Fuente. SolidWorks

5.1.1.2 Trayectorias del flujo de la velocidad

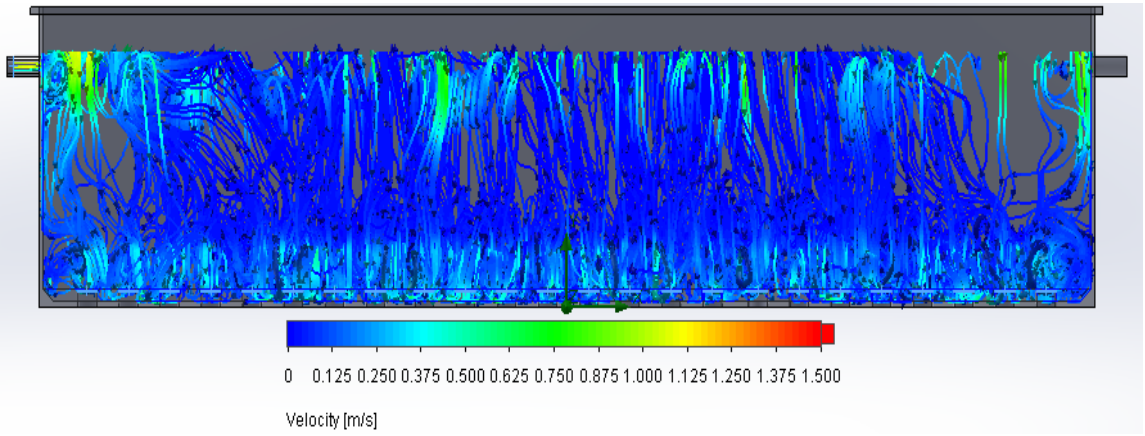
Figura 46. Distribución de velocidades, de acuerdo a la trayectoria, vista trasversal frontal



Fuente. SolidWorks, lado trasversal del reactor izquierdo

En la figura 46. Se evidencia la presencia de remolinos en cercanos a la pared, son indicadores de turbulencia, de la cual aportan con la homogenización dentro del reactor, además esto puede originarse en otros lugares y son temporales, debido a las variaciones de caudal de ingreso, presión y velocidad en el difusor esto puede llegar a cambiar en el transcurso de su operación.

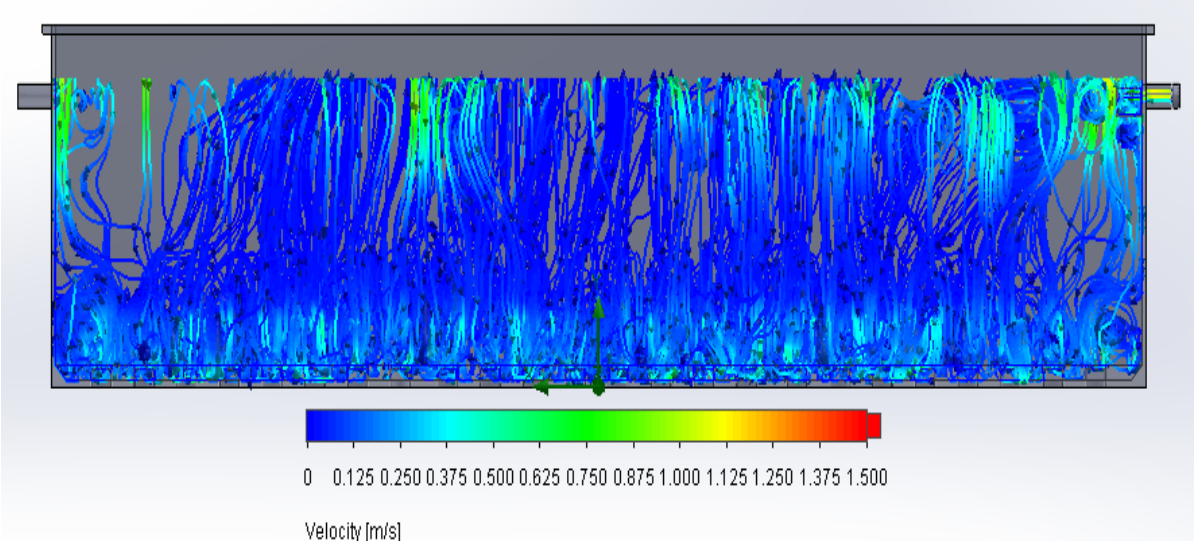
Figura 47. Distribución de velocidades, de acuerdo a la trayectoria vista longitudinal frontal



Fuente. SolidWorks

Lado izquierdo es el ingreso de caudal (afluente) y lado derecho es la salida el (efluente). De acuerdo a la figura 47. las burbujas de aire en su trayectoria cumplirán la función de suministrar oxígeno a los microorganismos y la de homogenizar.

Figura 48. Distribución de velocidades, de acuerdo a la trayectoria vista longitudinal posterior



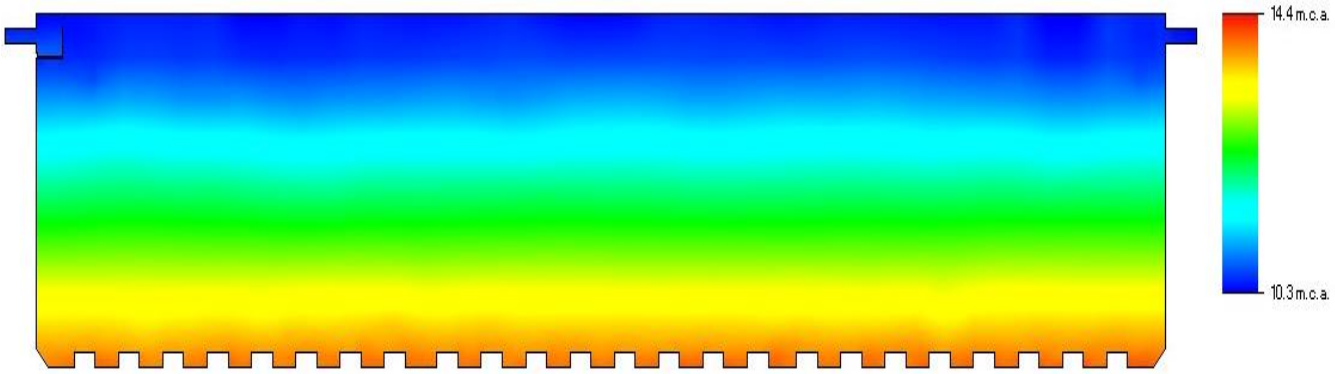
Fuente. SolidWorks

Lado izquierdo es la salida, (efluente) y lado derecho el ingreso de caudal (afluente), de acuerdo a la figura 48. Se visualiza velocidades mayores en las entradas y salidas del reactor, las velocidades se encuentran a detalle en el análisis cuantitativo.

5.1.2 Resultado y análisis de la simulación CFD (presión)

5.1.2.1 Sección del modelo 3D de la presión

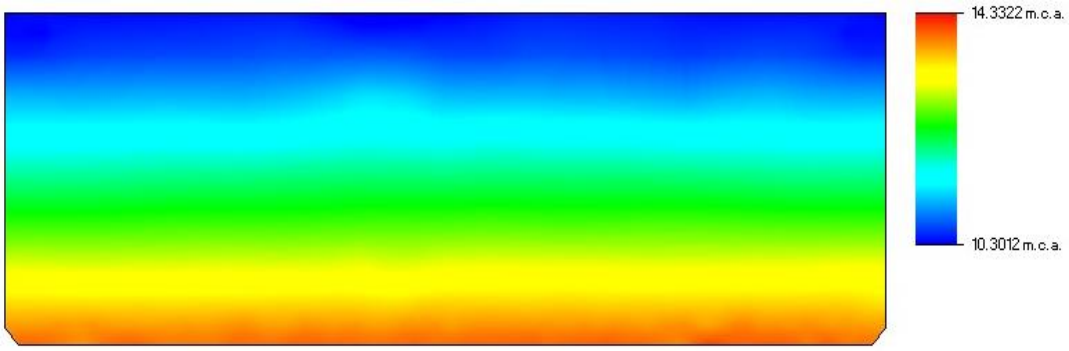
Figura 49. Distribución de presiones (cut plot) vista longitudinal



Fuente. SolidWorks

Como se aprecia en el gráfico, la variación de presión está determinada por la presión hidrostática y la presión dinámica. De acuerdo con el gráfico, a mayor profundidad, la presión es mayor debido al incremento de la columna de agua, lo cual es consistente con la teoría hidrostática. La unidad utilizada es metros columna de agua (m.c.a.), una medida común y familiar en nuestro entorno técnico.

Figura 50. Distribución de presiones (cut plot) vista transversal



Fuente. SolidWorks

El mapa de colores de la presión muestra un gradiente claro que va de los tonos azules (baja presión) a los tonos naranjas y rojos (alta presión).

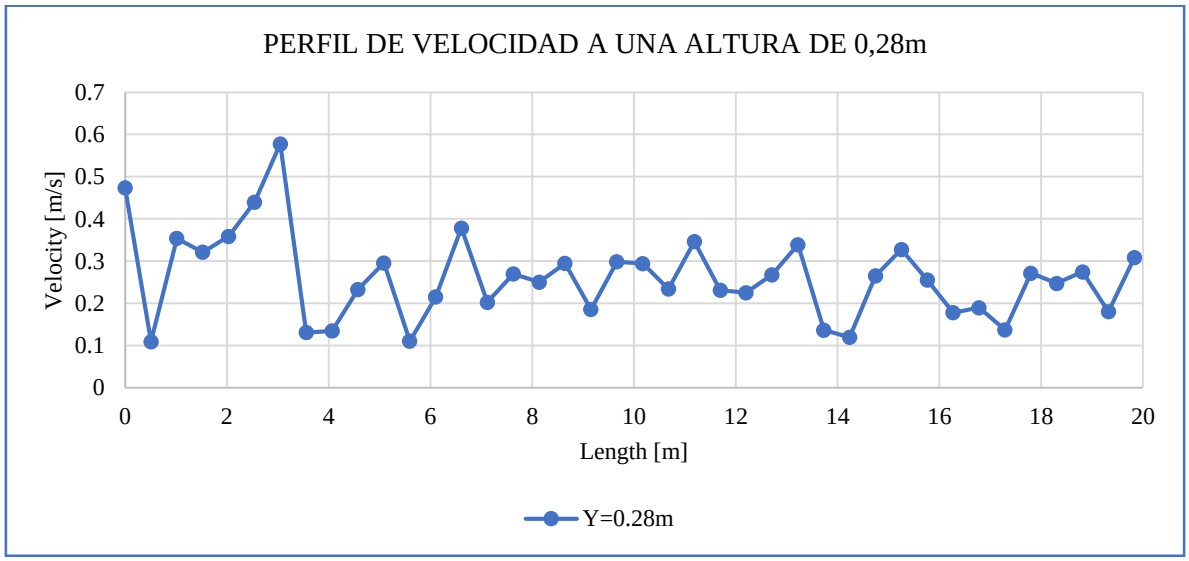
5.2 Análisis cuantitativo

5.2.1 Perfil de velocidad

En el siguiente perfil se observa la variación de velocidad de acuerdo a la longitud del reactor, en base a la geometría modelada, la longitud es de 20m y la altura total es de 4.8m la altura hidráulica es de 4m, los siguientes perfiles que se muestran a continuación se encuentran a diferentes niveles de altura.

En el eje (y) se encuentra la variable de velocidad y en el eje (x) se encuentra la longitud total del reactor biológico.

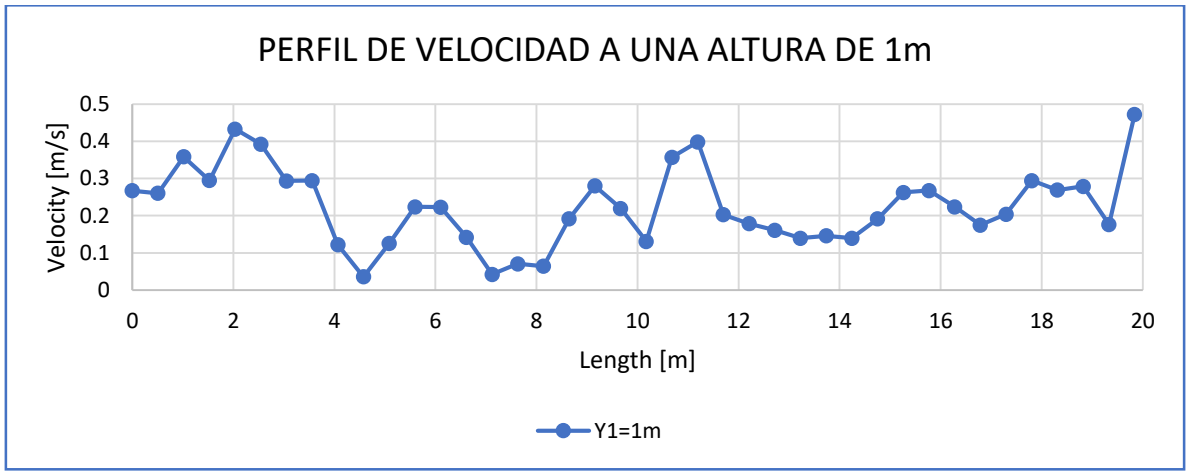
Figura 51. Perfil de velocidad a una altura de 0.28m



Fuente. SolidWorks

En el perfil de velocidad de la figura 51, con una altura de 0.28m. se presentan valores máximos de 0.57 m/s y valores mínimos de 0.12 m/s. de acuerdo a los valores presentes en el perfil y tomando en cuenta su ubicación, de la cual se encuentran cerca de los difusores

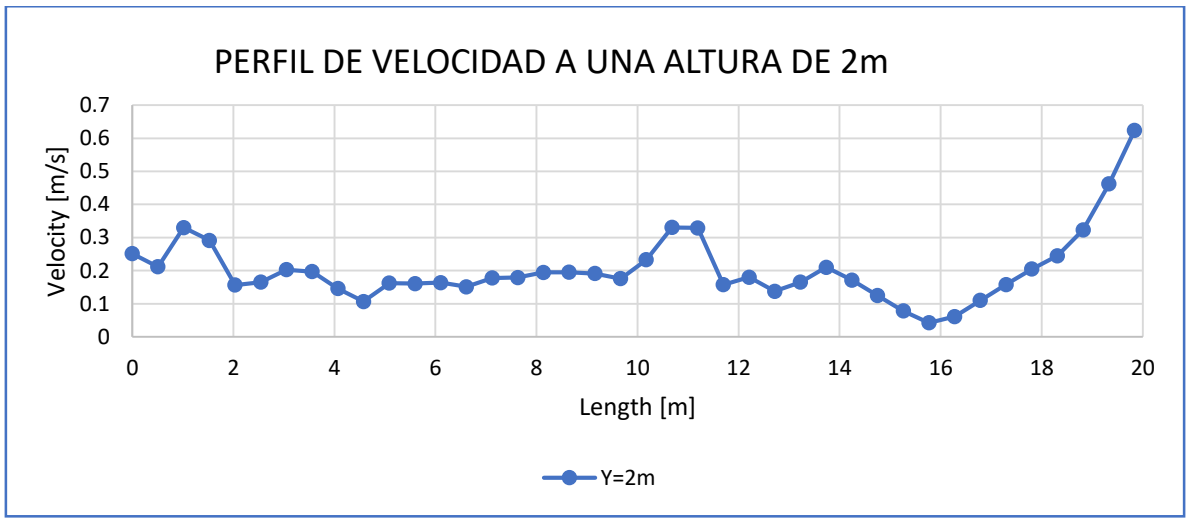
Figura 52. Perfil de velocidad a una altura de 1m



Fuente. SolidWorks

En el perfil de la figura 52 se tiene valor máximo 0.47m/s y como valor mínimo 0.036m/s, tomando en cuenta que se encuentra a una altura de 1m.

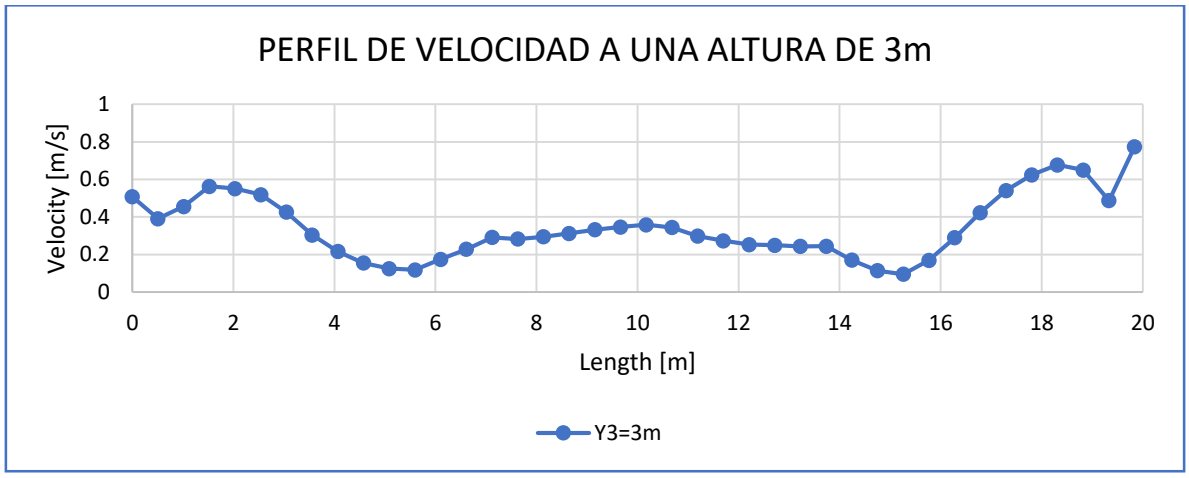
Figura 53. Perfil de velocidad a una altura de 2m



Fuente. SolidWorks

En el perfil de velocidad de la figura 53 se tiene un valor máximo de 0.62m/s y un valor mínimo de 0.045m/s, tomando en cuenta que se encuentra a una altura de 2m.

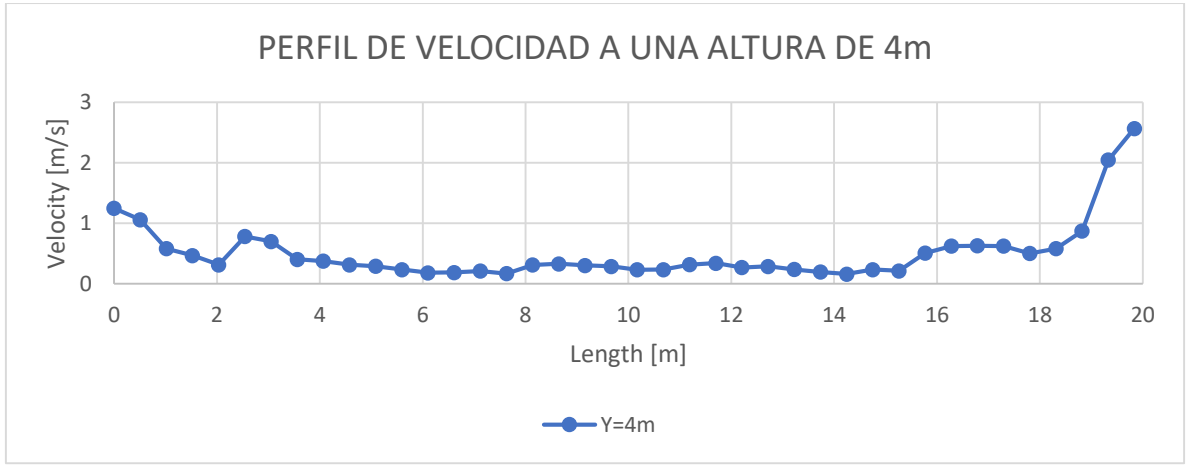
Figura 54. Perfil de velocidad a una altura de 3m.



Fuente. SolidWorks

En este perfil de velocidades de la figura 54 se encuentra a una altura de 3m, de la cual presenta el siguiente valor máximo de 0.77m/s y un valor mínimo de 0.095 m/s.

Figura 55. Perfil de velocidad a una altura de 4m



Fuente. SolidWorks

En este perfil de velocidades de la figura 55 se encuentra a una altura de 4m, de la cual presenta el siguiente valor máximo de 2.56m/s en los extremos, cercanos a la pared y un valor mínimo de 0.016 m/s.

De acuerdo a las características del fabricante de la tabla 11 el rango de operación para el funcionamiento adecuado se encuentra entre 2-8m3/h, para la simulación el caudal del difusor es de 2.67 m3/h. de la cual se encontraría más cerca al límite mínimo de 2m3/h.

Tabla 11.Parametro de funcionamiento del difusor

PARÁMETRO	CAUDAL MÁXIMO PERMITIDO	CAUDAL MÍNIMO PERMITIDO	CAUDAL SIMULADO
Rango de caudal para uso continuo	m3/h	m3/h	m3/h
	2,00	8,00	2,67

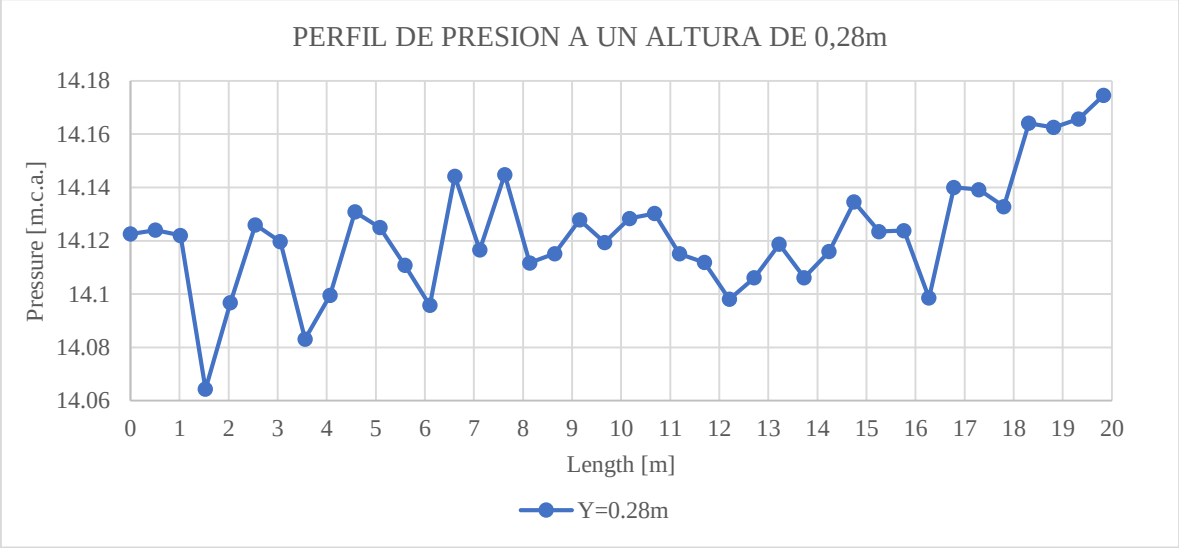
Fuente. Características del difusor RG300

5.2.2 Perfil de presión

En el siguiente perfil se observa la variación de presión de acuerdo a la longitud del reactor, en base a la geometría modelada, la longitud es de 20m y la altura total es de 4.8m. los siguientes perfiles que se muestran a continuación se encuentran a diferentes niveles.

En el eje (y) se encuentra la variable de presión total y en el eje (x) se encuentra la longitud total del reactor biológico.

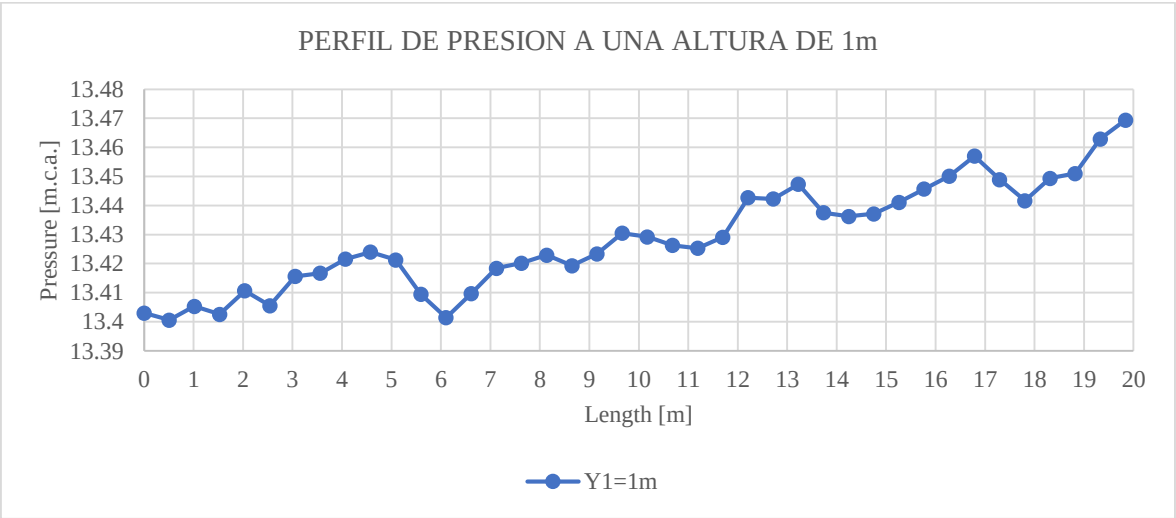
Figura 56.Perfil de presión a una altura de 0.28m



Fuente. SolidWorks

En perfil de presión de la figura 56, se observa valor máximo de 14.17m.c.a. y valor mínimo de 14.06m.c.a. tomando en cuenta que se encuentra a una altura desde el fondo del reactor de 0.28m.

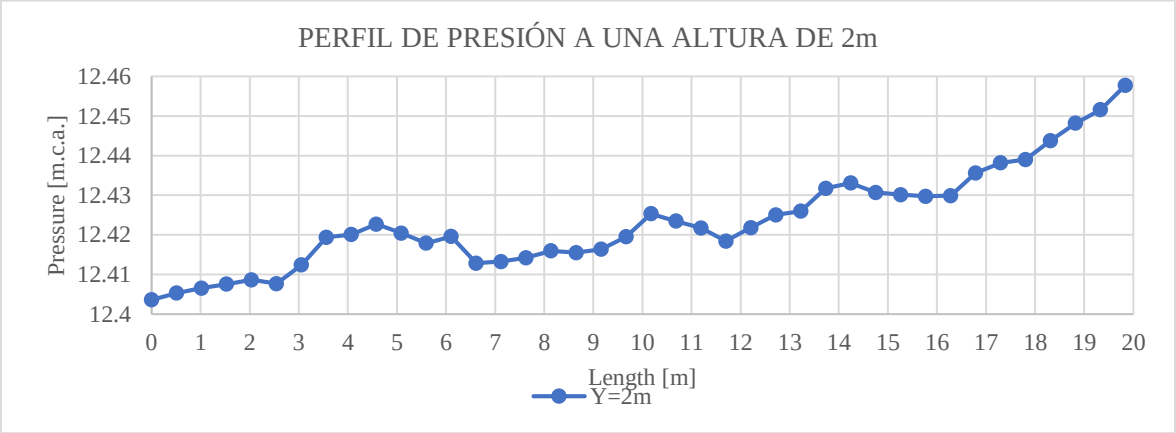
Figura 57. Perfil de presión a una altura de 1m



Fuente. SolidWorks

En perfil de presión de la figura 57, se observa valor máximo de 13.46m.c.a. y valor mínimo de 13.4 m.c.a. tomando en cuenta que se encuentra a una altura desde el fondo del reactor de 1m.

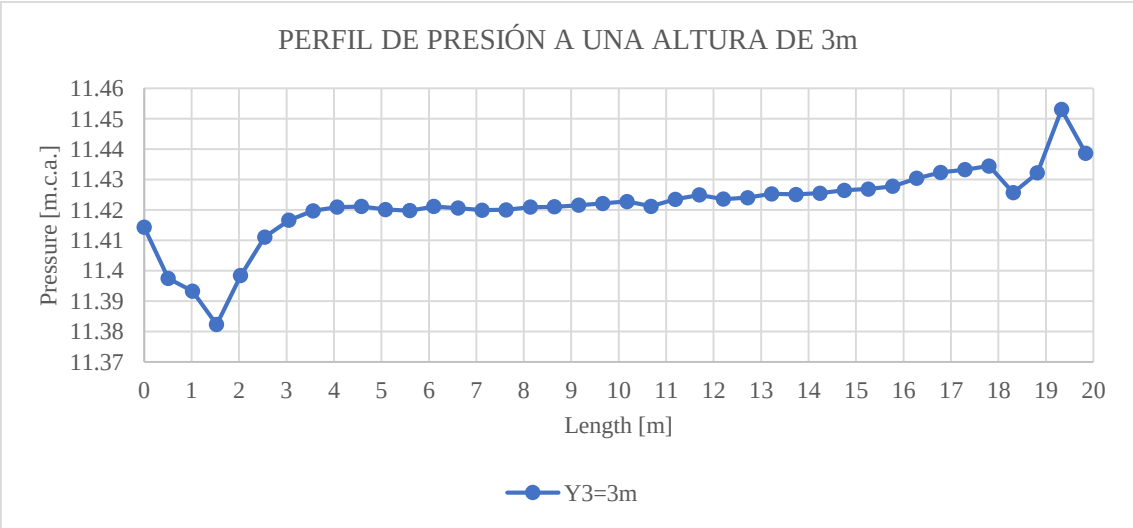
Figura 58. Perfil de presión a una altura de 2m



Fuente. SolidWorks

En perfil de presión de la figura 58, se observa valor máximo de 12.45m.c.a. y valor mínimo de 12.4 m.c.a. tomando en cuenta que se encuentra a una altura desde el fondo del reactor de 2m.

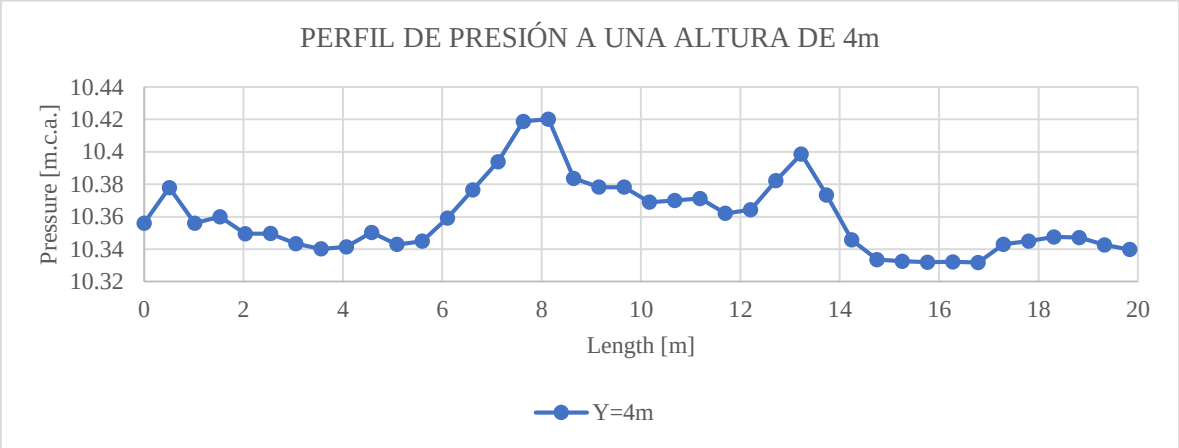
Figura 59. Perfil de presión a una altura de 3m



Fuente. SolidWorks

En perfil de presión de la figura 59, se observa valor máximo de 11.51m.c.a. y valor mínimo de 11.38m.c.a. tomando en cuenta que se encuentra a una altura desde el fondo del reactor de 3m.

Figura 60. Perfil de presión a una altura de 4m

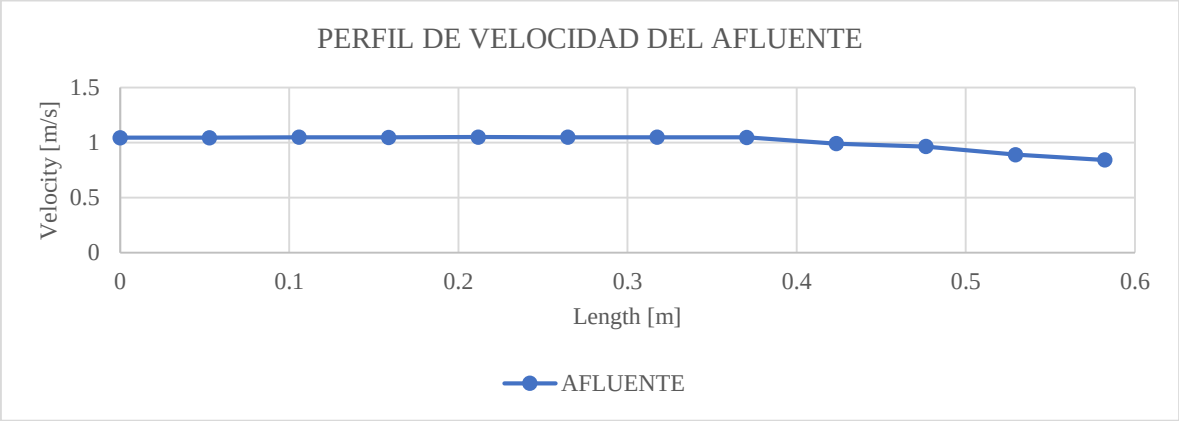


Fuente. SolidWorks

En perfil de presión de la figura 58, se observa valor máximo de 10.50m.c.a. y valor mínimo de 10.39m.c.a. tomando en cuenta que se encuentra a una altura desde el fondo del reactor de 4m.

5.2.3 Perfil de velocidad de la tubería de ingreso y de salida

Figura 61. Perfil de velocidad del afluente



Fuente. SolidWorks

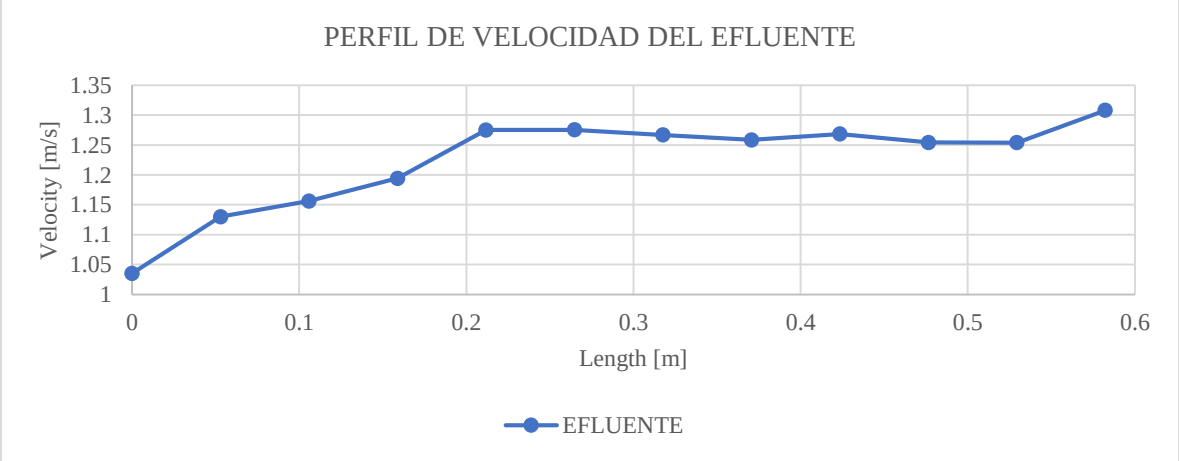
El valor promedio de la velocidad en la tubería es de 1.005671m/s, tomando en cuenta que el perfil se obtuvo a partir del eje central de la tubería. En un trayecto de longitud 0.58m. en base a lo mencionado y conociendo el diámetro nominal del tubo, se tiene un caudal de 78.334 L/s. El caudal obtenido en base al registro histórico es de 77 L/s.

Tabla 12 Comparación del caudal simulado con él caudal registrado.

CAUDAL SIMULADO	CAUDAL REGISTRADO	DIFERENCIA Δ
(L/s)	(L/s)	(L/s)
78,334755555	77	1,334755555

Fuente. Elaboración propia

Figura 62, Perfil de velocidad del efluente



Fuente. SolidWorks

El valor promedio de la velocidad en la tubería es de 1.223101m/s, tomando en cuenta que el perfil se obtuvo a partir del eje central de la tubería. En un trayecto de longitud 0.58m. en base a lo mencionado y conociendo el diámetro nominal del tubo, se tiene un caudal de 95.27L/s.

Tabla 13. Comparación de caudal simulado del afluente y el efluente

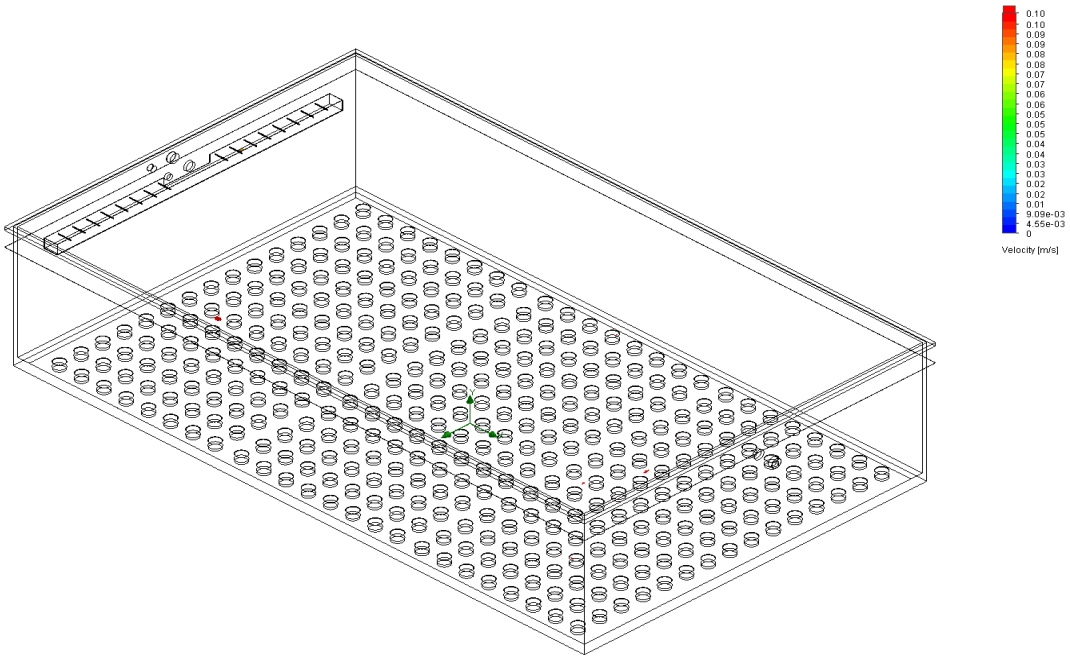
CAUDAL SIMULADO AFLUENTE	CAUDAL SIMULADO EFLUENTE	DIFERENCIA Δ
(L/s)	(L/s)	(L/s)
78,334755555	95,271075908	16,936320353

Fuente. Elaboración propia

5.2.4 Superficies tridimensionales

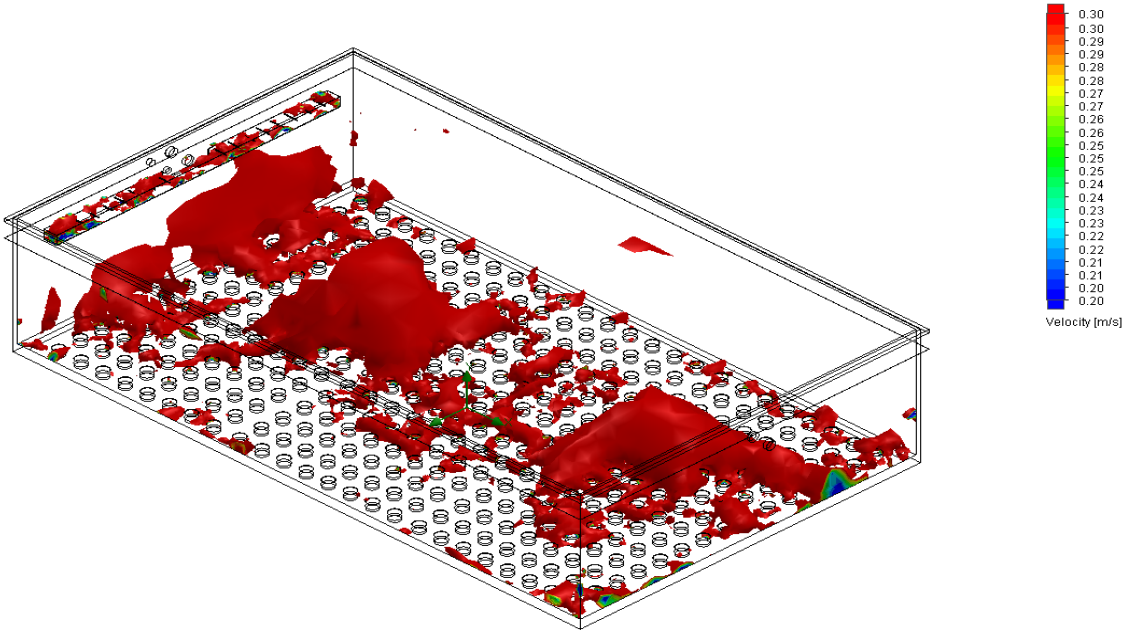
De acuerdo con los modelos isométricos presentados, se observa el espacio o volumen ocupado dentro del reactor biológico y la distribución de los intervalos de velocidad en su interior.

Figura 63. Modelo isométrico de velocidad 0-0.1m/s



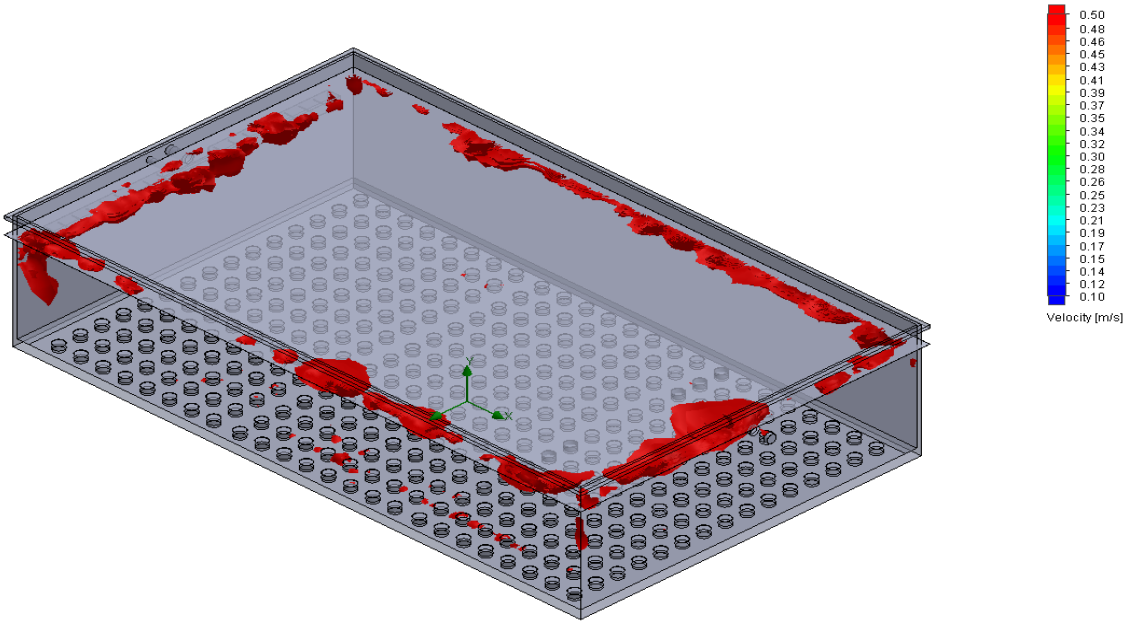
Fuente. SolidWorks

Figura 64. Modelo isométrico de velocidad 0.2-0.3m/s



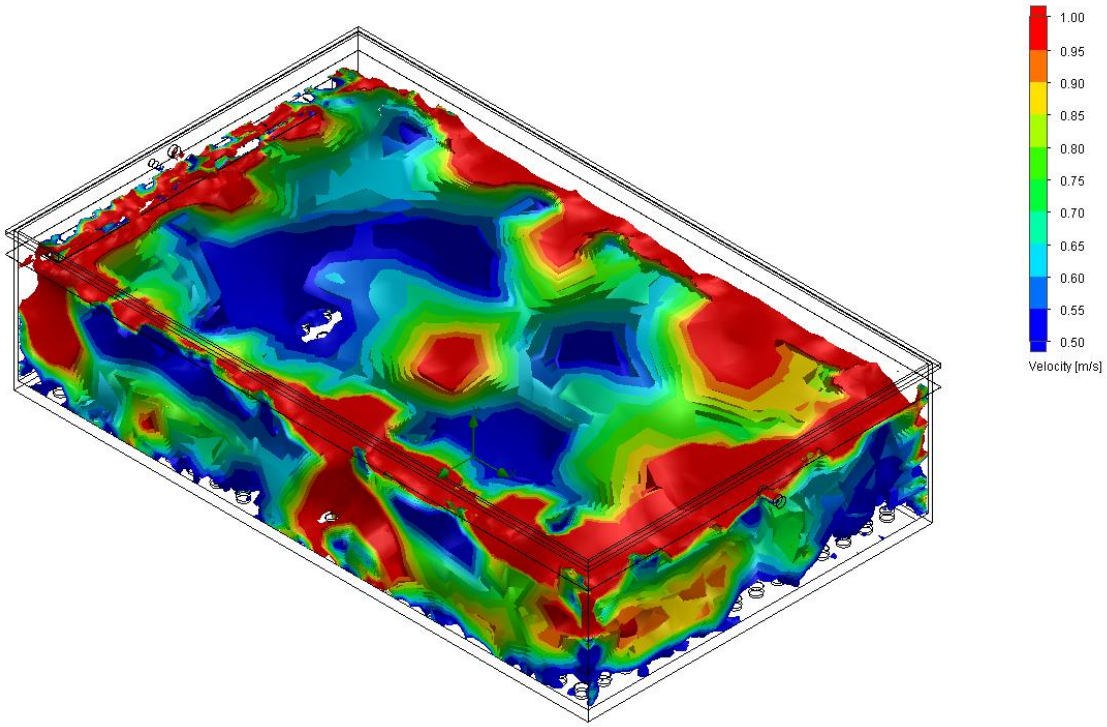
Fuente. SolidWorks

Figura 65. Modelo isométrico de velocidad 0.3-0.5m/s



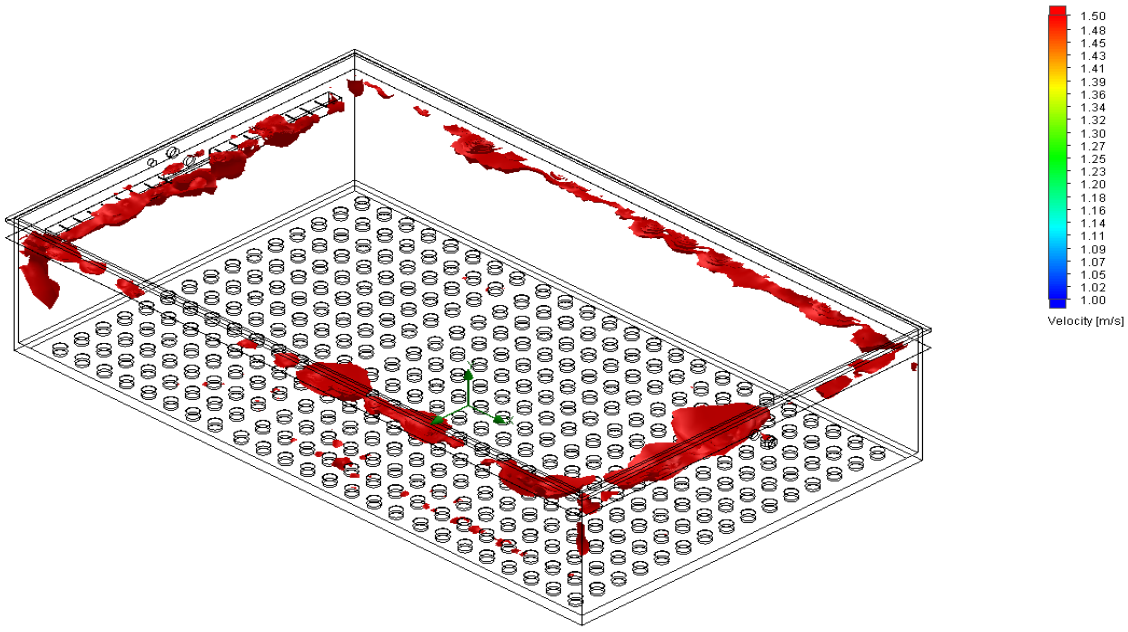
Fuente. SolidWorks

Figura 66. Modelo isométrico de velocidad 0.5-1m/s



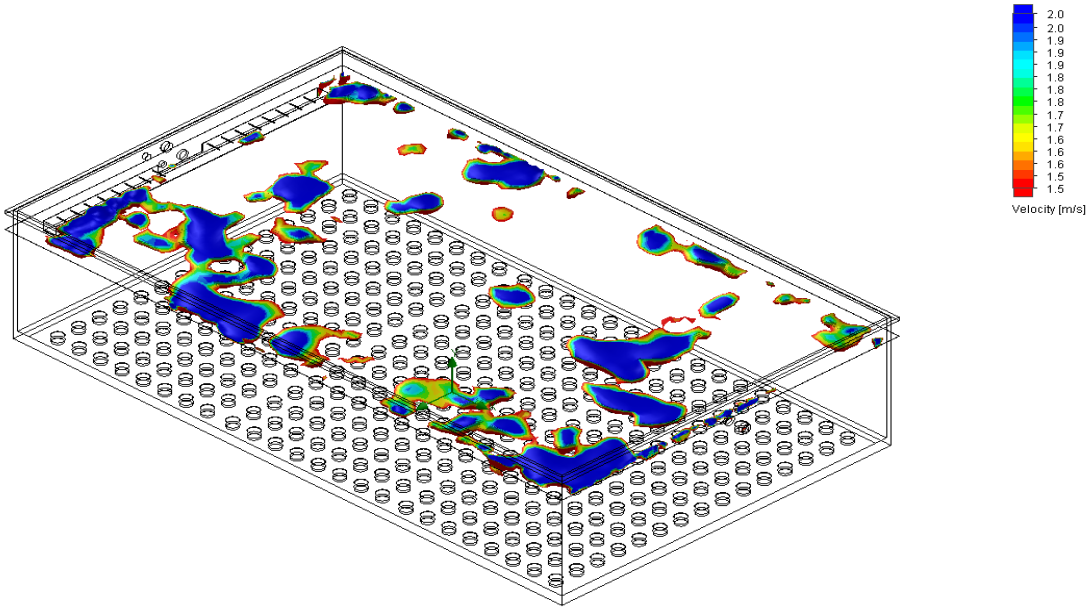
Fuente. SolidWorks

Figura 67. Modelo isométrico de velocidad 1-1.5m/s



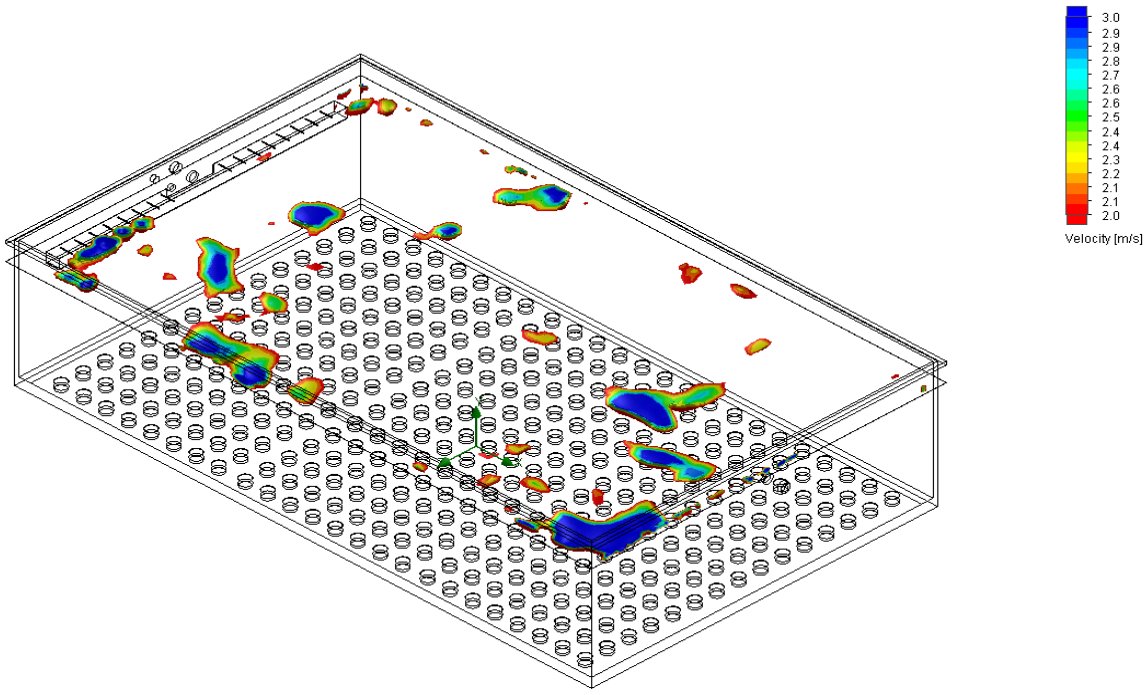
Fuente. SolidWorks

Figura 68. Modelo isométrico de velocidad 1.5-2m/s



Fuente. SolidWorks

Figura 69. Modelo isométrico de velocidad 2-3m/s



Fuente. SolidWorks

CAPÍTULO VI

CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

En base a todo el análisis realizado en el presente trabajo de investigación sobre la Modelación Fluidodinámica del Reactor Biológico de Lodos Activados de la Planta de San Blas, se destaca la utilidad de las herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Estas herramientas permiten analizar con precisión la influencia de la geometría del reactor, la ubicación estratégica de cada difusor y variables hidráulicas clave, como los caudales, las velocidades y las presiones. Esta capacidad de simulación facilita la toma de decisiones fundamentadas para optimizar tanto el diseño como la operación del reactor.

De acuerdo con los objetivos generales y específicos planteados, se logró cumplir cada uno de ellos, desde la construcción de un modelo geométrico que representa virtualmente el reactor, hasta el análisis de los fenómenos fluidodinámicos presentes en su interior. Asimismo, se obtuvo información valiosa sobre la distribución de velocidades y presiones, lo que permitió identificar y evaluar áreas problemáticas, como zonas muertas y cortocircuitos, que pueden afectar la operación eficiente del reactor.

Los 360 difusores instalados en el reactor permiten una aireación eficiente, pero el análisis mostró que la distribución del flujo de aire podría mejorarse para evitar áreas con oxigenación insuficiente. Las condiciones de aireación están altamente influenciadas por la profundidad de instalación de los difusores y el caudal de aire suministrado.

A partir de la representación gráfica de los valores mostrados en el modelo isométrico de la figura 66, se observa que el espacio de mayor cobertura dentro del reactor corresponde al intervalo de velocidad de 0.5 – 1 m/s.

Finalmente, de acuerdo con la tabla 14, se concluye que el reactor biológico se encuentra dentro del rango de velocidad típica, siendo este un indicador de condiciones normales de operación.

Tabla 14. Rangos típicos de velocidad de salida del aire en difusores de burbuja fina

FUENTE	RANGO DE VELOCIDAD TÍPICO	OBSERVACIÓN
Metcalf y Eddy (2014)	0.5 a 2.5 m/s	Ideal para sistemas que buscan una mayor transferencia de oxígeno y eficiencia.
EPA Manual (2010)	1.0 a 3.0 m/s	Velocidades superiores pueden generar turbulencias excesivas.

Fuente. elaboración propia

En el modelo isométrico de la figura 63, se observa que los valores correspondientes al intervalo de 0 – 0.1 m/s ocupan un espacio muy reducido dentro del reactor, lo que podría considerarse como zonas muertas. De acuerdo con el criterio presentado en la tabla 15, un incremento en la velocidad del aire podría modificar este escenario, mejorando la distribución del flujo y reduciendo dichas áreas.

Tabla 15. Consideraciones sobre zonas muertas

RANGO DE VELOCIDAD (m/s)	AUTORES/REFERENCIAS	CRITERIO
0 - 0,01	Metcalf y Eddy (2014)	Velocidad extremadamente baja. Indica áreas con poca o ninguna renovación del flujo.
0,01 - 0,1	Tchobanoglous y otros (2003); Cussler (2009)	Velocidad baja con flujo ordenado, predominan fuerzas viscosas.

Fuente. elaboración propia

6.2 Recomendaciones

Se deben tomar en cuenta las características geométricas y de funcionamiento de cada componente del reactor para la construcción del modelo 3D, siendo este la representación real en el espacio digital, para el análisis de diversos escenarios fluidodinámicos.

El dominio computacional debe regirse o centrarse en el volumen de trabajo, con el fin de ahorrar tiempo de procesamiento computacional. Para este estudio, una de las simulaciones le tomó aproximadamente 5 horas, sin considerar los procesos individuales del programa, que tomaron entre 30 minutos y 50 minutos de procesamiento.

En cuanto a las recomendaciones para el refinamiento de la malla, se debe tomar en cuenta el área de interés para lograr un mayor refinamiento. La convergencia dependerá de la cantidad de iteraciones, el mallado y el criterio para la introducción de datos; esto también debe desarrollarse de acuerdo con las características del equipo. Para esta investigación, se dispuso de un equipo computacional de escritorio, cuyas características técnicas se encuentran en el Capítulo IV, tabla 8.

Es fundamental contar con una base sólida para la comprensión de los principios físicos que rigen los fenómenos fluidodinámicos dentro del reactor. Para ello, es esencial al momento de analizar, configurar y utilizar eficientemente los paquetes computacionales de CFD, con el fin de parametrizar correctamente las condiciones de frontera. Además, facilita un análisis crítico de los resultados, lo que contribuye a optimizar el diseño y el proceso de información, y va más allá de la simple aplicación directa de las herramientas del software.