

UCUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

Estudio de las condiciones de flujo en un floculador hidráulico horizontal
de tabiques mediante modelo numérico

Trabajo de titulación
previo a la obtención del
Título de Ingeniero Civil.

Autores:

Joseline Fernanda Mejía Orellana

CI: 0106081029

Correo electrónico: joselinemejia2009@hotmail.com

Alan Mateo Torres Juela

CI: 0106875180

Correo electrónico: alanmtj@hotmail.com

Director:

Ing. Esteban Alonso Pacheco Tobar

CI: 0103665634

Codirector:

Ing. Diego Benjamín Idrovo Murillo

CI: 0101500387

Cuenca-Ecuador

09-Mayo-2022

RESUMEN

Para el desarrollo del trabajo de titulación, se planteó realizar un análisis comparativo entre los resultados obtenidos por métodos de diseño convencional y diseño asistido por modelación numérica de un floculador hidráulico de tabiques de flujo horizontal. Se ha propuesto realizar un caso de estudio seleccionado, un análisis exploratorio inicial para aplicar, evaluar criterios y generar información mediante la aplicación de metodologías convencionales. Así mismo, de manera complementaria para el caso de estudio definido, se planteó implementar un modelo numérico que permita contrastar y validar resultados. Para el estudio, se planeó tres conjuntos de actividades alineadas con los objetivos específicos y alcance, el primero es el análisis de un diseño convencional para un floculador de tabiques de flujo horizontal, el segundo es la implementación de un modelo numérico para el estudio de un floculador de tabiques de flujo horizontal; y el último es el estudio comparativo de los métodos de diseño convencional y la modelación numérica.

En el trabajo de titulación se tomó como caso de estudio el floculador hidráulico de tabiques de flujo horizontal ubicado en la Planta de Agua de la Central Termoeléctrica El Descanso, propiedad de la Empresa Electro Generadora del Austro ELECAUSTRO S.A. El diseño convencional fue realizado utilizando la teoría relacionada con la mecánica de fluidos de los diferentes autores que la han estudiado, para la modelación numérica se utilizó el programa de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) los cuales resuelven las ecuaciones de gobierno de flujo de Navier-Stokes de forma iterativa, se utilizó como herramienta computacional para realizar el pre-procesamiento Salome-MECA, para el procesamiento el software OpenFOAM y para el post-procesamiento Paraview.

El estudio comparativo demostró que las herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional permiten examinar de forma detallada el comportamiento del flujo de agua lo cual para el diseño convencional se tiene mayor incertidumbre.

Palabras claves: Floculador hidráulico. Diseño convencional. Hidráulica. Modelación numérica. CFD.

ABSTRACT

For the development of the titling work, it was proposed to carry out a comparative analysis between the results obtained by conventional design methods and design assisted by numerical modeling of a hydraulic flocculator of horizontal flow partitions. It has been proposed to carry out a selected case study, an initial exploratory analysis to apply, evaluate criteria and generate information through the application of conventional methodologies. Likewise, in a complementary way to the defined case study, it was proposed to implement a numerical model that allows contrasting and validating results. Three sets of activities aligned with the specific objectives and scope were planned for the study. The first is the analysis of a conventional design for a horizontal flow wall flocculator, the second is the implementation of a numerical model to study a horizontal flow septum flocculator, and the last one is the comparative study of conventional design methods and numerical modeling.

In the titling work, the hydraulic flocculator of horizontal flow partitions located in the Water Plant of the El Descanso Thermoelectric Power Plant, owned by the Empresa Electro Generadora del Austro ELECAUSTRO S.A., was taken as a case study. The conventional design was carried out using the theory related to fluid mechanics from the different authors who have studied it; for the numerical modeling, the Computational Fluid Dynamics (CFD) program was used, which solves the Navier-Stokes flow government equations iteratively. Salome-Meca was used as a computational tool to perform pre-processing, OpenFOAM software for processing, and Paraview for post-processing.

The comparative study showed that Computational Fluid Dynamics tools allow a detailed examination of water flow behavior, which for conventional design has more significant uncertainty.

Keywords: Hydraulic flocculator. Conventional design. Hydraulics. Numerical modeling. CFD.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen	1
Abstract	2
Índice de contenido.....	3
Índice de tablas	5
Índice de figuras	7
Agradecimientos.....	13
Dedicatoria	14
1. Introducción	15
2. Antecedentes	16
3. Objetivos	17
3.1 Objetivo General.....	17
3.2 Objetivos Específicos	17
4. Estado del Arte.....	17
4.1 Generalidades del Floculador.....	17
4.1.1 Floculación (Mezcla lenta).....	17
4.1.2 Tipos de Floculadores	17
4.1.3 Factores que influyen en la floculación.....	19
4.2 Generalidades Modelación numérica	21
4.2.1 Método de Volúmenes Finitos (MVF)	21
4.2.2 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).....	22
4.2.2.1 Estructura de CFD.....	24
4.2.3 Software SALOME.....	25
4.2.4 Software OpenFOAM.....	25
5. Materiales y Métodos	26
5.1 Caso de estudio: “planta de tratamiento el Descanso”	26
5.1.1. Descripción del floculador en la planta de tratamiento “El descanso”	26
5.2 Diseño convencional.....	27
5.2.1 Ecuaciones de gobierno para los cálculos y criterios para el diseño convencional..	31
5.3 Configuración del modelo numérico	33
5.3.1 Geometría del modelo numérico.....	33
5.3.1.1 Descripción.....	33
5.3.1.2 Modelo hidráulico.....	33
5.3.1.3 Elaboración de la geometría.....	34
5.3.2 Elaboración del mallado del dominio de estudio.	34
5.3.2.1 Características de la malla	35

5.3.3	Configuración del modelo numérico OpenFOAM.....	35
5.3.3.1	Tiempo de simulación.....	36
6.	Resultados y discusión	37
6.1	Caso de estudio convencional	37
6.2	Simulación numérica	39
6.1.	Estudio comparativo	52
7.	Conclusiones y Recomendaciones.....	55
7.1.	Conclusiones	55
7.2.	Recomendaciones	57
8.	Bibliografía	58
Anexos.....		60
Apéndice A.....		60
	Simulación software OpenFOAM.....	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de floculadores según el tipo de energía y sentido de flujo	18
Tabla 2: Datos iniciales para el diseño convencional y modelación numérica obtenidos del caso de estudio “Determinación de la dosis óptima del coagulante sulfato de aluminio aplicado en la planta de tratamiento de agua de la central termoeléctrica El Descanso” (Izquierdo Flores, 2015).	27
Tabla 3: Coeficiente de Manning y hazen williams según el tipo de material de la estructura hidráulica.	28
Tabla 4: Tiempos de retención de las tres cámaras del floculador y tiempo total obtenidos en laboratorio.	28
Tabla 5: Dimensiones primera cámara cuyo esquema se encuentra en la figura 5.	29
Tabla 6: Dimensiones segunda cámara cuyo esquema se encuentra en la figura 5.	29
Tabla 7: Dimensiones tercera cámara cuyo esquema se encuentra en la figura 5.	30
Tabla 8: Determinación pérdida de carga en las cámaras cuyo esquema de obtención de pérdida se encuentra en la figura 6.	30
Tabla 9: Velocidades calculadas mediante el método convencional para las tres cámaras de estudio.	37
Tabla 10: Resultados de áreas y radios hidráulicos para el diseño convencional para las	38
Tabla 11: Longitudes de recorrido calculadas para el floculador de estudio.	38
Tabla 12: Pérdidas calculadas para el floculador en estudio.	38
Tabla 13: Gradientes de velocidad calculadas mediante la formulación establecida.	39
Tabla 14: Los resultados presentes corresponden a las velocidades en los cambios de dirección del corte A-A de la figura 16 obtenidas en la simulación de la primera cámara.	44
Tabla 15: Datos de la primera cámara necesarios para el cálculo de los demás parámetros del floculador para después ser comparados con los datos del diseño convencional.	45
Tabla 16: Los resultados presentes corresponden a el área y radio hidráulico de la sección del flujo proyectado para la primera cámara según la velocidad calculada en los cambios de dirección.	45
Tabla 17: Los resultados presentes corresponden al tiempo de retención proyectado para la primera cámara según la velocidad calculada en los cambios de dirección.	46
Tabla 18: Los resultados presentes corresponden a las pérdidas de fricción, perdidas por conversión y cambio de dirección y por último la pérdida total siendo la suma de las dos anteriores, proyectados para la primera cámara según la velocidad calculada en los cambios de dirección.	46
Tabla 19: Los resultados presentes corresponden al gradiente de velocidad obtenidos a partir de los 6 puntos de la simulación y mediante la formulación pertinente.	46
Tabla 20: Los resultados presentes corresponden a las velocidades en el centro del floculador del corte B-B de la figura 17 obtenidas en la simulación de la primera cámara.	49
Tabla 21: Los resultados presentes corresponden a el área y radio hidráulico de la sección del flujo proyectado para la primera cámara según la velocidad calculada en el centro del floculador.	50
Tabla 22: Los resultados presentes corresponden al tiempo de retención proyectado para la primera cámara según la velocidad calculada en el centro del floculador.	50
Tabla 23: Los resultado presentes corresponden a las pérdidas de fricción, perdidas por conversión y cambio de dirección y por último la pérdida total siendo la suma de las dos	

anteriores, proyectados para la primera cámara según la velocidad calculada en el centro del floculador.	51
Tabla 24: Los resultados presentes corresponden al gradiente de velocidad obtenidos a partir de los 6 puntos de la simulación y mediante la formulación pertinente.	51
Tabla 25: Comparación de resultados de la velocidad obtenidos en el diseño convencional y en la simulación numérica.	53
Tabla 26: Comparación de resultados del gradiente de velocidad obtenidos en el diseño convencional y en la simulación numérica.	53
Tabla 27: Comparación de resultados del radio hidráulico obtenidos en el diseño convencional y en la simulación numérica.	53
Tabla 28: Comparación de resultados de las pérdidas totales obtenidos en el diseño convencional y en la simulación numérica.	54
Tabla 29: Comparación de resultados del área de la sección del flujo obtenidos en el diseño convencional y en la simulación numérica.	54
Tabla 30: Comparación de resultados del tiempo de retención obtenidos en el diseño convencional y en la simulación numérica.	54
Tabla 31: Variables que se usaron en el software OpenFOAM del archivo g.	64
Tabla 32: Variables que se usaron en el software OpenFOAM del archivo transportProperties.	65
Tabla 33: Variables que se usaron en el software OpenFOAM del archivo turbulentProperties.	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema básico de un floculador hidráulico horizontal de dos cámaras.	19
Figura 2: Efecto de la variación del gradiente de velocidad versus el tiempo de retención con diferentes valores de la turbiedad residual del fluido.	20
Figura 3: Estructura CFD necesarios para llegar a la solución de la modelación numérica.	24
Figura 4: Floculador hidráulico horizontal con tabiques.....	27
Figura 5: Esquema en planta del floculador hidráulico en estudio compuesto por tres cámaras siendo la entrada de agua en la cámara número 1 y la salida por la cámara 3.....	29
Figura 6: Esquema determinación de pérdida de carga usando cuerda cuya perdida es la diferencia entre h_2 y h_1	30
Figura 7: Modelo Físico de la primera cámara del floculador hidráulico horizontal ubicado en la central Termoeléctrica "El Descanso".	33
Figura 8: Geometría del dominio de estudio 3D de la primera cámara, realizada en AutoCAD.	34
Figura 9: Mallado tetraédrico obtenido en el software computacional Salome-Meca de la primera cámara.....	35
Figura 10: Esquema de geometría de la malla exportado desde AutoCAD a el programa Salome-Meca.	39
Figura 11: Variación de la velocidad con la profundidad en la sección de un canal	40
Figura 12: Variación de la velocidad con respecto a la profundidad en un corte transversal 1-2 de la primera cámara del floculador	41
Figura 13: Representación de la variación de la velocidad con respecto a la profundidad en un corte transversal 1-2 de la primera cámara del floculador.	41
Figura 14: Corte longitudinal a la salida del floculador de la primera cámara para verificar la convergencia del modelo numérico mediante la estabilidad de la velocidad.	42
Figura 15: Representación de la velocidad del corte a-a' de la figura 14.....	42
Figura 16: Corte longitudinal A-A de la primera cámara en los cambios de dirección del fluido para verificar la velocidad.	43
Figura 17: Representación de la velocidad en los cambios de dirección del corte a-a, de la figura 13.	43
Figura 18: representación de los puntos mostrados en la tabla 14 de las velocidades en los cambios de dirección.	44
Figura 19: Representación de los puntos mostrados en la tabla 19 de los gradientes en los cambios de dirección.....	47
Figura 20: Corte longitudinal b-b de la primera cámara en el centro del floculador para verificar la velocidad.	48
Figura 21: Representación de la velocidad en el centro del floculador del corte B-B, de la figura 17.	48
Figura 22: representación de los puntos mostrados en la tabla 14 de las velocidades en los cambios de dirección.	49
Figura 23: Representación de los puntos mostrados en la tabla 24 de los gradientes en el centro de la primera cámara del floculador.	52
Figura 24: Variables que se usaron en el software OpenFOAM del archivo alpha.water.orig.	60
Figura 25: Variables que se usaron en el software OpenFOAM del archivo U (velocidad).	61
Figura 26: Variables que se usaron en el software OpenFOAM del archivo p_rgh.	62
Figura 27: Variables que se usaron en el software OpenFOAM del archivo nut.....	63

Figura 28: Variables que se usaron en el software OpenFOAM del archivo k.	63
Figura 29: Variables que se usaron en el software OpenFOAM del archivo omega.	64
Figura 30: Variables que se usaron en el software OpenFOAM del archivo controlDict.	66
Figura 31: Variables que se usaron en el software OpenFOAM del archivo setFieldsDict.	66

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Joseline Fernanda Mejía Orellana en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Estudio de las condiciones de flujo en un floculador hidráulico horizontal de tabiques mediante modelo numérico", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 09 de mayo de 2022



Joseline Fernanda Mejía Orellana

C.I: 0106081029

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Alan Mateo Torres Juela en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Estudio de las condiciones de flujo en un floculador hidráulico horizontal de tabiques mediante modelo numérico", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 09 de mayo de 2022



Alan Mateo Torres Juela

C.I: 0106875180

Cláusula de Propiedad Intelectual

Joseline Fernanda Mejía Orellana, autora del trabajo de titulación "Estudio de las condiciones de flujo en un floculador hidráulico horizontal de tabiques mediante modelo numérico", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 09 de mayo de 2022



Joseline Fernanda Mejía Orellana

C.I: 0106081029

Cláusula de Propiedad Intelectual

Alan Mateo Torres Juela, autor del trabajo de titulación "Estudio de las condiciones de flujo en un floculador hidráulico horizontal de tabiques mediante modelo numérico", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 09 de mayo de 2022



Alan Mateo Torres Juela

C.I: 0106875180

AGRADECIMIENTOS

A nuestro director, Ing. Esteban Pacheco Tobar, por ser nuestra guía durante este proceso, por el tiempo dedicado y los conocimientos brindados que nos servirán en nuestra vida profesional.

A nuestro director, Ing. Diego Idrovo, que con su experiencia nos guió para desarrollar de la mejor manera este trabajo de titulación y por compartir con nosotros conocimientos fundamentales los cuales serán aplicados en nuestras vidas como profesionales.

A nuestra profesora, Ing. Verónica Carillo, que gracias a sus conocimientos nos guió en los momentos de incertidumbre al momento de desarrollar el trabajo de titulación y supo resolver nuestros problemas.

A nuestra profesora, Dra. Guillermina Pauta, que gracias a su experiencia y conocimientos nos guió en este proceso y dentro de la carrera.

A nuestros docentes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca, por su enseñanza, paciencia y dedicación.

A nuestros compañeros, por formar parte de nuestro proceso de formación como profesionales.

A nuestras familias, por ser nuestro soporte durante los años de formación, por su paciencia, motivación y apoyo incondicional quienes nos ayudaron a cumplir nuestros objetivos.

A Dios, por habernos dado la fortaleza para seguir adelante en aquellos momentos de debilidad.

DEDICATORIA

A mis padres, Mónica y Fernando, por guiarme, apoyarme, motivarme y ser mi soporte todos los días quienes a base de su sacrificio, ejemplo y valores me han permitido alcanzar todas mis metas y nunca dejarme rendir alentándome a siempre seguir adelante con nuevos objetivos.

A mis hermanos, Mathias y Belén, por su compañía y mi principal motivación, por su cariño y alegría necesarios para levantarme todos los días.

A mi abuela, Rosa, por ser la persona que ha estado para mí desde que nací, por sus enseñanzas y anécdotas que me han permitido crecer como persona, por inculcarme valores que me han permitido formarme como profesional y por velar hasta el día de hoy por mi bienestar.

A toda mi familia, abuelos, tíos y primos, por su apoyo y motivación que en su momento fueron importantes para yo seguir adelante y alcanzar esta meta como profesional.

Joseline Fernanda Mejía

A mis padres, Marco y Doris, por su apoyo incondicional, por guiarme con valores que me permitieron desarrollarme como persona de bien y por ser un soporte durante este proceso.

A mis abuelos Marco, Laura y Delia por ser mi motivación para alcanzar mis metas.

A mi hermana Laura, por ser mi más grande inspiración día a día.

Alan Mateo Torres

1. INTRODUCCIÓN

Las plantas de tratamiento de agua potable son desarrolladas y estudiadas en el campo de la ingeniería civil; son estructuras indispensables para alcanzar los requisitos de calidad establecidos por la normativa de referencia; el tratamiento puede requerir operaciones y procesos físico-químicos y biológicos para el transporte y manejo del fluido, siendo necesario construir dentro de la planta de tratamiento diferentes estructuras para su aplicación.

El floculador es una estructura hidráulica importante, cuya función es dar energía suficiente al fluido para promover que las partículas coloidales desestabilizadas en la etapa anterior que es la coagulación, colisionen entre sí y formen aglomeraciones o flocs de mayor peso y tamaño que puedan sedimentar con mayor eficiencia, para después ser eliminados por decantación y filtración.

Por lo tanto, el floculador como toda estructura hidráulica debe ser analizado y manejado de forma técnica y considerando parámetros importantes como: velocidades mínimas y máximas, tiempos de retención, gradientes de velocidad máximos y mínimos, longitudes de recorrido, forma de agitación, pérdidas de carga, número de tabiques y número de cámaras.

Estos parámetros pueden ser obtenidos mediante pruebas realizadas en un laboratorio y mediante ecuaciones del gobierno del flujo del fluido; sin embargo, los resultados alcanzados mediante estas ecuaciones solo dan una idea global del floculador, y no admite un análisis mayor de la estructura; por lo que se ha implementado en los últimos tiempos la simulación numérica de relativa simplicidad, ya que permite el análisis de diferentes escenarios para las condiciones de una experimentación física. Estas simulaciones numéricas utilizan programas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) los cuales resuelven ecuaciones de gobierno de flujo de Navier-Stokes de forma iterativa.

Se consideró importante para este trabajo de titulación un estudio comparativo entre la metodología de diseño convencional utilizando las ecuaciones de gobierno de flujo y el diseño por modelación numérica de un floculador hidráulico horizontal con tabiques existente en la planta de tratamiento de agua de la “Central Termoeléctrica El Descanso”; para el diseño por modelación numérica se usó como herramienta computacional de análisis el software OpenFoam, para el pre-procesamiento fue necesario las herramientas AutoCAD y Salome-Meca y para el post-procesamiento Paraview.

El trabajo de titulación se dividió en tres etapas importantes; en la primera se hizo el análisis del diseño convencional del floculador, tomando como estudio de caso un floculador horizontal de tabiques para el cual se realizó el diseño, la verificación técnica y la identificación de los parámetros físico-químicos relevantes. El diseño y verificación contempló la revisión de criterios relacionados con: rangos de velocidad, carga hidráulica para el sistema, espaciamiento y longitud de tabiques, gradiente de velocidad del sistema, así como, condiciones de entrada y salida.

La segunda parte contempló la implementación del modelo numérico, su definición y construcción, dado que muchas veces los diseños convencionales y sus resultados se encuentran limitados en cuanto al análisis de procesos que por su complejidad no pueden ser caracterizados, o cuando el comportamiento real se encuentra sujeto a incertidumbres por aplicación de expresiones simplificadas o condiciones de frontera no establecidas; entonces es conveniente y necesario considerar el apoyo de herramientas computacionales que mediante modelos numéricos permitan, según su tipo y grado de complejidad, realizar simulaciones (representación de procesos y fenómenos complejos) bajo condicionantes que no pueden ser planteadas en un diseño convencional. Con la ayuda del programa OpenFoam se procedió a la construcción del modelo

numérico con bases a la configuración, limitantes y fronteras que fueron establecidos en el diseño convencional. Para la construcción se procedió de acuerdo a los requerimientos del modelo seleccionado y otra información relacionada con la configuración de archivos de datos para un análisis CFD que, incluyen información temporal y espacial, así como, controles para lectura, reportes, descripción de la configuración de esquemas numéricos para precisión y estabilidad de la simulación.

Por último, se realizó un estudio comparativo de los métodos de diseño convencional y la modelación numérica; para esto se identificaron las variables y parámetros críticos; se analizaron sus resultados y su incidencia en el proceso de floculación. Las variables y parámetros que principalmente fueron considerados, son los relacionados con:

- Dimensiones y configuración
- Velocidad de flujo
- Gradientes de velocidad del sistema
- Longitudes de recorrido
- Pérdidas de carga
- Condiciones de flujo a la entrada y salida

2. ANTECEDENTES

Un floculador es una estructura hidráulica que forma parte importante de las plantas de tratamiento de agua de tipo convencional y tiene como objetivo lograr la aglutinación de partículas y la formación de flóculos mediante agitación controlada cumpliendo criterios técnicos y de normativa vinculada. Los procesos de aglutinación y formación de flóculos están sujetos a una serie de variables y factores físico-químicos como: las formas y energía vinculadas a la agitación del sistema, energía del flujo, tiempos de retención, tipo y concentración de sustancias para la formación de flóculos, entre otros. La teoría convencional establece varias soluciones y criterios técnicos para diseñar unidades de floculación. Entre las soluciones comúnmente empleadas se encuentran los floculadores de tabiques de flujo horizontal, cuyo diseño considera principalmente la energía de agitación que se deriva del flujo mismo y de la carga de velocidad.

Aunque los aspectos de diseño, tanto hidráulicos como aquellos relacionados con el proceso de formación de flóculos se encuentran establecidos en la literatura técnica, debido a las especificidades a las que está sujeto todo proyecto, es común que se presenten incertidumbres en cuanto a la aplicabilidad de criterios y expresiones o respecto al comportamiento real que tendrá el flujo; existe aún la necesidad de contrastar las metodologías convencionales de diseño y los criterios basados en la experiencia, con el resultado que se puede obtener mediante el empleo de nuevas herramientas que permitan analizar los procesos de flujo característicos del sistema. Es así que, la aplicación de modelos numéricos como herramienta de soporte para el diseño de obras de floculación, es posible evaluar y hacer análisis comparativos de aspectos hidráulicos y parámetros particulares que inciden en el proceso de formación y mantenimiento de flóculos como: gradiente de velocidad, velocidad media de flujo, velocidad y gradientes en zonas críticas como cambios de dirección, longitud de los tabiques y espaciamiento entre placas, tiempos de retención, y aspectos relacionados con el diseño de la entrada y salida de la unidad de floculación.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio comparativo entre la metodología de diseño convencional y el diseño asistido por modelación numérica para un floculador de tabiques de flujo horizontal.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar un diseño convencional de un floculador horizontal de tabiques como caso de estudio.
- Implementar un modelo numérico para el caso de estudio seleccionado.
- Realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos por métodos de diseño convencionales y el diseño asistido por modelación numérica.

4. ESTADO DEL ARTE

4.1 GENERALIDADES DEL FLOCULADOR

4.1.1 FLOCULACIÓN (MEZCLA LENTA)

La floculación tiene como finalidad lograr la aglomeración de las partículas producto de la coagulación a través de la agitación moderada del agua, formando partículas de mayor tamaño y peso específico llamado flóculo; por lo tanto, el objetivo del floculador es proporcionar a la masa de agua coagulada una agitación lenta promoviendo el crecimiento de los flóculos y su conservación; la energía que produce la agitación del agua puede ser de origen hidráulico o mecánico. Es importante entonces la combinación de fases porque esto permitirá la mejor formación del floculo de modo que la mezcla rápida en la coagulación dispersará de manera uniforme e instantánea los productos químicos y la mezcla lenta en la floculación permitirá el desarrollo del flóculo (Vergaray & Méndez, 1994).

La floculación puede ser pericinética que es la promovida dentro del líquido por el movimiento que tienen las partículas menores a una micra, debido a la agitación, gravedad y al peso de las partículas, las que se aglomeran al caer y es cuando el contacto entre las partículas es producido por el movimiento Browniano, depende de la constante de Boltzman y sucede en un tiempo muy corto luego de la desestabilización de la partícula actuando durante los primeros 10 segundos; y la ortocinética, que es la inducida por la energía comunicada al líquido por fuerzas externas (paletas giratorias) y es cuando los contactos son producidos por el movimiento del fluido.

4.1.2 TIPOS DE FLOCULADORES

Dependiendo del tipo de energía que se use para agitar la masa de agua las cámaras de mezcla lenta pueden ser mecánicas o hidráulicas. Los de tipo mecánico se realizan a través de rotores de paletas y los hidráulicos como resultado del movimiento de agua por la fuerza de la gravedad.

Tipo de energía	Sentido del flujo	Descripción
Floculador hidráulico	Flujo horizontal	De tabiques alternos de ida y regreso
	Flujo vertical	De tabiques arriba y abajo
		De flujo dirigido "Tipo Alabama"
		De entrada lateral al tanque "Tipo Cox"
Floculador mecánico	Reciprocantes	Con rejas o cintas oscilantes
	Rotatorios	De paletas de eje horizontal o vertical.
		De turbinas horizontales o verticales.
	Flujo horizontal	De turbina pelton.

TABLA 1: CLASIFICACIÓN DE FLOCULADORES SEGÚN EL TIPO DE ENERGÍA Y SENTIDO DE FLUJO.

Fuente: (Arboleda, 2000)

Los floculadores hidráulicos consisten en tanques provistos de unidades o cámaras predominando el flujo de pistón; en estas unidades se colocan pantallas en los cuales el agua circula, diferenciándose así los de flujo horizontal y vertical, proyectándose un mínimo de dos unidades. Se puede utilizar pantallas o tabiques removibles de concreto prefabricadas, fibra de vidrio, madera, plástico, asbesto-cemento, etc.

Los de flujo horizontal se dividen por tabiques de tal forma que el agua haga un recorrido de ida y vuelta alrededor de los extremos libres de los tabiques. Este tipo de flujo es recomendable para caudales menores a 50 L/s y donde se tiene un espacio pequeño (Pacheco & Carrillo, Coagulación-Floculación: Consideraciones técnicas para diseño hidráulico, 2021). Para los de flujo vertical el agua fluye hacia arriba y hacia abajo por encima y por debajo de los tabiques, al ser estos más profundos se usa para plantas más grandes (Romero Rojas, 1999), porque reducen el espacio requerido.

Los floculadores mecánicos son aquellos que requieren de una fuente de energía externa que propicie el movimiento de un agitador en un tanque o en una serie de tanques, en los cuales el agua permanece por un tiempo de retención determinado.

Como desventaja de los floculadores hidráulicos horizontales frente a los mecánicos es la mayor pérdida de carga y la poca flexibilidad de control en el grado de mezcla, y como ventaja que no cuenta con un equipo mecánico requiriendo mantenimientos mínimos (Romero Rojas, 1999).

En la figura 1 se muestra un esquema de un floculador hidráulico horizontal con tabiques, el cual consta de dos cámaras cuyas dimensiones de ancho se especifican con B, la longitud con L, ancho entre tabiques con b y como recomendación dado que los gradientes en cambios de dirección suelen ser valores grandes se tiene que el ancho efectivo en el giro sea 1,5 veces el ancho entre tabiques.

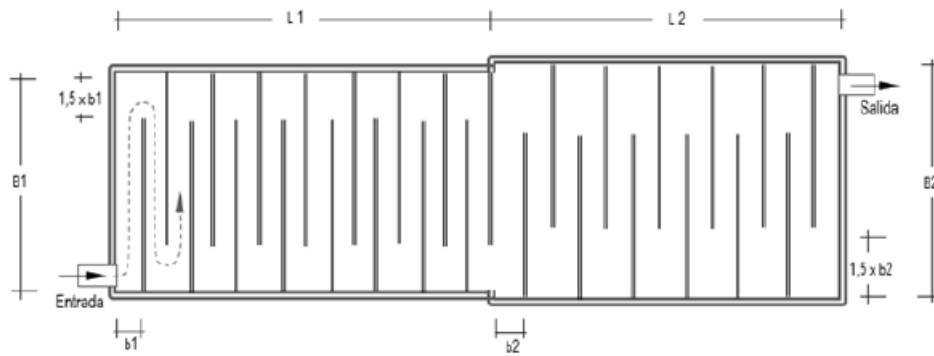


FIGURA 1: ESQUEMA BÁSICO DE UN FLOCULADOR HIDRÁULICO HORIZONTAL DE DOS CÁMARAS.

Fuente: (Pacheco & Carrillo, Diseño de Pequeñas Plantas de Agua Potable: Diseño hidráulico de obras principales, 2021).

4.1.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FLOCULACIÓN

La floculación es influenciada por fuerzas físicas y químicas tales como carga eléctrica de las partículas, la capacidad de intercambio iónico, el tamaño y la concentración de flóculos en la solución, el pH, la temperatura del agua y la concentración de electrolitos; y entre los más importantes están la forma de producir la agitación, gradiente de velocidad y el tiempo de retención.

I. Forma de producir la agitación

La agitación es tan importante en la coagulación como en la floculación; una agitación bien o mal controlada en el proceso de coagulación tiene efectos en una buena o mala floculación, por lo que una adecuada agitación es necesario tanto en el momento de la dosificación del coagulante como en el proceso de formación y densidad del flóculo. En la floculación se necesita una agitación o mezcla controlada para maximizar el número de colisiones entre las partículas suspendidas y los flóculos, sin romperlos o disolverlos mediante una mezcla rápida. (Núñez, 2014)

II. Gradiente de velocidad

El gradiente de velocidad es importante en cuanto a la aglomeración de las partículas, cuanto mayor es el gradiente de velocidad, mayor es la probabilidad de colisión de las partículas y su aglomeración. Mientras tanto, a medida que los flóculos aumentan de tamaño, crecen también las fuerzas de cizallamiento hidrodinámico, inducidas por el gradiente de velocidad. Los flóculos crecerán hasta un tamaño máximo, por encima del cual las fuerzas de cizallamiento alcanzan una intensidad que los rompe en partículas menores.

TeKippe y Ham (TeKippe & Ham, 1971), realizaron un estudio teórico-práctico para determinar la influencia de la variación del gradiente de velocidad en los diversos compartimentos de un floculador. Los datos de estos ensayos se muestran en la siguiente figura y permiten concluir que es necesario graduar el gradiente de velocidad en forma decreciente, evitando tramos intermedios con altos gradientes, que es el caso más desfavorable.

Gradientes de velocidad versus tiempo de retención	Turbiedad residual (tf)	Gradientes de velocidad versus tiempo de retención	Turbiedad residual (tf)
	0,40		1,35
	0,45		1,40
	0,65		1,65
	0,85		2,70
	1,20		0,37
	0,90		0,15
	0,90		
	0,90		

FIGURA 2: EFECTO DE LA VARIACIÓN DEL GRADIENTE DE VELOCIDAD VERSUS EL TIEMPO DE RETENCIÓN CON DIFERENTES VALORES DE LA TURBIEDAD RESIDUAL DEL FLUIDO.

Fuente: (TeKippe & Ham, 1971).

III. Tiempo de retención

El tiempo de retención es importante ya que es proporcional a la velocidad de aglomeración de las partículas. Este tiempo, el gradiente de velocidad y la dosis del coagulante son determinados mediante ensayos de pruebas de jarras en laboratorio; bajo ciertas condiciones existe un rango óptimo de tiempo de floculación entre 20 y 40 minutos. Este tiempo es muy importante ya que la permanencia del agua en el floculador durante un tiempo inferior o superior al óptimo produce resultados inferiores. (Arboleda, 2000)

Los valores del gradiente de velocidad y tiempo de retención según los estudios realizados por Villegas y Letterman (Villegas & Letterman, 1976), son los que en forma conjunta van a producir la mayor eficiencia. A través de investigaciones efectuadas, se ha determinado que el rango

óptimo de gradientes de velocidad para floculación varía entre 75 y 20 s^{-1} y el de tiempos de retención entre 10 y 30 min, dependiendo de la calidad del agua (Camp, 1955).

4.2 GENERALIDADES MODELACIÓN NUMÉRICA

Cuando se observa alrededor se puede contemplar una multitud de fenómenos asociados a los fluidos en diversos sistemas físicos. A partir de la curiosidad y necesidad de comprender el comportamiento de los fluidos y otros fenómenos asociados a éste, los científicos plantearon formulaciones para su estudio utilizando las matemáticas. En la práctica, un gran número de problemas que involucran flujo de fluidos, transferencia de calor y de masa se reducen a la solución de modelos matemáticos basados en sistemas de ecuaciones diferenciales parciales (Xamán & Gijón-Rivera, 2015). Estas ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan los procesos físicos son generalmente de naturaleza compleja y su solución solo es posible para casos simples. Si se aplicara un método convencional teórico normalmente permitirá obtener resultados de aplicación más general y lo que se estaría estudiando no sería el sistema físico real sino un modelo matemático de él, que puede o no representar apropiadamente al sistema, este modelo puede tener problemas matemáticos cuya solución es difícil y en ocasiones imposible.

Los métodos numéricos tienen más de cuatro décadas de incidir en disciplinas de la ingeniería como en mecánica de fluidos, transferencia de calor y termodinámica que fueron las que tomaron un mayor auge en el campo científico. En la mecánica de fluidos se dispone de un conjunto de leyes de conservación que describen el comportamiento general de los fluidos, sin embargo, solo se puede resolver problemas idealizados debido a que en la mayoría de los casos las ecuaciones no tienen una solución analítica y la incapacidad para resolver analíticamente las ecuaciones que determinan el comportamiento de un fluido ha conducido a otra forma de solución. Esta solución es el estudio de fluidos mediante la modelación numérica, siendo esta la solución muy eficiente, menos costosa en comparación a la solución experimental y permitiendo resolver problemas complejos en un periodo de tiempo corto.

La modelación numérica entonces da como resultado una serie de valores aproximados para la solución deseada; se encuentran los métodos más ampliamente usados como el Método de Diferencias Finitas (MDF), de Volumen Finito (MVF) y de Elemento Finito (MEF) para resolver las ecuaciones de conservación de masa, momentum, energía y especies químicas (transporte de masa) (Xamán & Gijón-Rivera, 2015). Entre las ventajas que se puede encontrar de la modelación numérica es que puede resolver geometría y procesos físicos complicados además de que trabaja con fenómenos no-lineales y tiene una rápida evolución temporal del fenómeno, y como desventaja es que generalmente hay errores de truncamiento, se requiere necesariamente información de condiciones de frontera y que el costo computacional puede llegar a ser alto.

4.2.1 MÉTODO DE VOLÚMENES FINITOS (MVF)

El método de volúmenes finitos es más utilizado en el campo de la ingeniería debido a su adecuación para describir las ecuaciones bajo un principio de conservación. El MVF fue desarrollado originalmente como una forma especial de la formulación en diferencias finitas, este método usa la forma integral de las ecuaciones de conservación, siendo la más simple de entender y programar ya que todos los términos que necesitan ser aproximados tienen significado físico;

sin embargo, el MVF tiene como dificultad la utilización de esquemas de alto orden en 3D, pues la aproximación con el MVF requiere dos niveles que es la interpolación e integración.

Una de las principales razones por el cual los ingenieros y científicos eligen el MVF es que hay una conservación integral de masa, momentum energía y que estas pueden ser satisfechas por un grupo cualquiera de volúmenes de control (VC), es decir las ecuaciones discretizadas bajo la formulación de volúmenes finitos expresan el principio de conservación de las diferentes cantidades físicas en un volumen de control, la formulación en volúmenes finitos permitirá tener resultados más exactos conforme los volúmenes de control se aproximen al infinito.

El dominio de estudio es subdividido en un número finito de volúmenes de control (VC) contiguos y las ecuaciones de conservación son aplicadas para cada VC. En el centroide de cada VC recae un nodo computacional en el cual se calcula el valor de las variables. Para poder expresar los valores de las variables en las superficiales de los VC en términos de los calores nodales (centroides) se utiliza en el software algún tipo de interpolación. Las integrales de superficie se aproximan usando alguna fórmula de cuadratura disponible. Como resultado se obtiene una ecuación algebraica para cada VC, en la cual parecen valores de los nodos vecinos (Xamán & Gijón-Rivera, 2015).

El MVF puede ser utilizado en cualquier tipo de malla de la estructura que se esté realizando y por lo tanto se puede aplicar a geometrías complejas, esta malla define únicamente las fronteras de los volúmenes de control. El método es conservativo por construcción donde las propiedades relevantes cumplen con conservación para cada volumen, por lo tanto, las integrales de superficie son las mismas para las interfaces (fronteras) de los VC contiguos.

Los MVF representa la parte principal de la mayoría de softwares para la modelación de la dinámica de fluido, entre ellos se encuentra FLOW3D, FLUENT, OpenFOAM. El algoritmo numérico usando MVF según el libro de J. Xamán (Xamán & Gijón-Rivera, 2015) contempla las siguientes etapas:

- Integración de las ecuaciones gobernantes de flujo de fluidos sobre todos los VC del dominio de solución.
- Discretización al sustituir una variedad de aproximaciones finitas para los términos en las ecuaciones integradas, las cuales representan procesos, esto convierte las ecuaciones integrales en un sistema de ecuaciones algebraicas.
- Solución de las ecuaciones algebraicas por un método iterativo.

4.2.2 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

A partir de la década de 1970 con la aparición de las computadoras modernas, Brian Spalding líder de grupo en el Imperial College, tomo el revelo del conocimiento de las técnicas numéricas dando paso a la formulación del algoritmo SIMPLE para el acople de las ecuaciones de flujo de fluido, este algoritmo sirvió después como base para diferentes métodos. En 1980, Suhas Patankar publica el libro *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, siendo el primer libro que trata en profundidad las metodologías CFD y sirviendo como inspiración para la creación de infinidad de códigos numéricos, por lo tanto Spalding y Patankar sentaron las bases para la aplicación del método de volúmenes finitos en CFD (Xamán & Gijón-Rivera, 2015).

Actualmente los CFD ya no sirve solo como herramienta de estudio e investigaciones si no que se emplea en numerosas industrias, y que gracias a los enormes avances tecnológicos con las capacidades de las computadoras y el desarrollo de los métodos numéricos los CFD se están

convirtiéndose en una herramienta práctica y eficiente para el análisis de situaciones en las que están involucrados fluidos sirviendo para el análisis y diseño. Los CFD son usados en un amplio sector industrial como la aeronáutica, naval, nuclear, etc.

En la comunidad científica llama a los CFD al uso de las computadoras como herramientas para resolver numéricamente las ecuaciones de movimientos de los fluidos con el fin de poder aplicarlas a problemas reales y de utilidad práctica reemplazando los sistemas de ecuaciones diferenciales parciales en un sistema de ecuaciones algebraicas que pueden ser resueltas usando computadoras. El objetivo final de los CFD es la creación de un software que proporcione el cálculo detallado del movimiento de fluidos por medio del empleo de un ordenador capaz de ejecutar una gran cantidad de cálculos por unidad de tiempo, para la resolución de las ecuaciones matemáticas que expresan las leyes por las que se rigen los fluidos (Fernández, 2012).

Se puede establecer que CFD principalmente integra tres disciplinas que son: mecánica de fluidos, matemáticas y ciencias computacionales. La mecánica de fluidos representa el estudio de fluidos en reposo y movimiento; el movimiento de fluidos o dinámica de fluidos se describen mediante ecuaciones matemáticas como ecuaciones diferenciales, las cuales gobiernan el proceso de interés y son las llamadas ecuaciones gobernantes. Estas ecuaciones gobernantes son resueltas mediante la programación convirtiéndolas en programas de cómputo o paquetes de software (Xamán & Gijón-Rivera, 2015).

Entre las ventajas que tienen los CFD es que se pueden evidenciar muchos fenómenos que no se pueden apreciar mediante algún otro método; se puede predecir las propiedades del fluido con gran detalle en el dominio estudiado siempre y cuando se cuente con un modelo matemático adecuado, y se puede diseñar para tener soluciones rápidas evitando costosos experimentos. Como desventajas, muchas veces se requiere usuarios con amplia experiencia, se consume recursos de hardware y software que requieren inversiones iniciales significativas; dependiendo de la complejidad del fenómeno se puede llegar a tener un alto consumo de recursos computacionales. Sin embargo, hay que tener en cuenta que para que se pueda usar CFD de la mejor manera se requiere experiencia y conocimiento de la física de flujos de fluidos y fundamentos en algoritmos numéricos (Versteeg & Malalasekera, 2008).

Hace ya casi dos siglos desde que las ecuaciones de gobierno de la Mecánica de Fluidos quedaron definitivamente formuladas por Claude Navier (1785-1836) y George Stokes (1819-1903) cuando introdujeron los términos de transporte viscoso a las ecuaciones de Euler, dando lugar a las famosas ecuaciones de Navier-Stokes (Fernández, 2012). Los CFD están basados en la solución numérica de estas ecuaciones, estas son un conjunto de ecuaciones con derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido en una, dos o tres dimensiones.

$$\rho \left(\frac{\delta v_x}{\delta t} + v_x \frac{\delta v_x}{\delta x} + v_y \frac{\delta v_x}{\delta y} + v_z \frac{\delta v_x}{\delta z} \right) = \mu \left[\frac{\delta^2 v_x}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 v_x}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 v_x}{\delta z^2} \right] - \frac{\delta P}{\delta x} + \rho g_x$$

$$\rho \left(\frac{\delta v_y}{\delta t} + v_x \frac{\delta v_y}{\delta x} + v_y \frac{\delta v_y}{\delta y} + v_z \frac{\delta v_y}{\delta z} \right) = \mu \left[\frac{\delta^2 v_y}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 v_y}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 v_y}{\delta z^2} \right] - \frac{\delta P}{\delta y} + \rho g_y$$

$$\rho \left(\frac{\delta v_z}{\delta t} + v_x \frac{\delta v_z}{\delta x} + v_y \frac{\delta v_z}{\delta y} + v_z \frac{\delta v_z}{\delta z} \right) = \mu \left[\frac{\delta^2 v_z}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 v_z}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 v_z}{\delta z^2} \right] - \frac{\delta P}{\delta z} + \rho g_z$$

Fuente: (Vázquez, 2004)

4.2.2.1 ESTRUCTURA DE CFD

La estructura de CFD consta de tres partes para poder llegar a una solución; en la figura 3 se muestra la estructura que se lleva en toda Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), empezando por un pre-proceso que son datos de entrada, seguido por el procesamiento que es la parte del software para culminar con el post-proceso donde se obtiene los resultados para ser analizados:

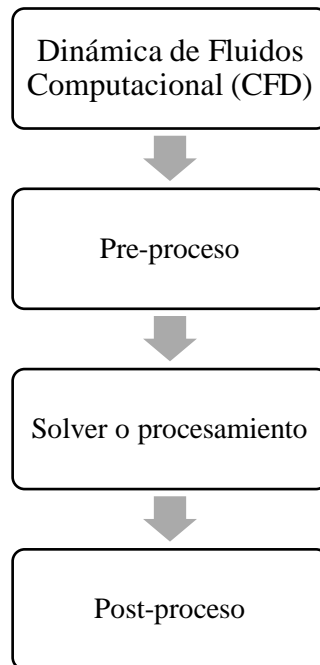


FIGURA 3: ESTRUCTURA CFD NECESARIOS PARA LLEGAR A LA SOLUCIÓN DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA.

Fuente: Elaboración propia.

El pre-proceso es la etapa donde se coloca los datos de entrada y consiste en:

1. Definir la geometría
2. Generar una malla numérica adecuada
3. Especificar los fenómenos físicos que se pretenden modelar
4. Especificar las propiedades físicas del medio
5. Establecer las condiciones iniciales y de frontera

La generación de la malla es muy importante porque condicionará definitivamente la calidad de los resultados, cuanto más fina sea la malla más próxima a la solución será la simulación, sin embargo, mallas extraordinariamente finas penalizan el tiempo de cálculo haciéndolo excesivamente grande (Fernández, 2012). Un mallado eficiente siempre ha de ser más fino en aquellas zonas donde se prevé un mayor gradiente en las variables de flujo.

El solver o procesamiento es la etapa donde se constituye la parte central del software, en la cual se resuelve el modelo matemático mediante una computadora siendo necesario que intervengan conceptos como el análisis numérico, fundamentos de matemáticas discretas y desarrollos de algoritmos. En esta etapa el usuario manda la instrucción al software de ejecutar y espera los resultados, el tiempo de obtención de resultados dependerá del modelo que se esté resolviendo el cual puede tomar horas, días o semanas. Dentro del software se lleva a cabo dos pasos que es el proceso de discretización y la solución de sistemas de ecuaciones algebraicas.

El post-proceso es la etapa de visualización que permite aglomerar los datos de resultados gráficos, esta etapa es muy importante para el análisis de resultados y dependiendo de la capacidad de resolución del visualizador el usuario podrá tener un mejor entendimiento del fenómeno ayudándole a conseguir los resultados y conclusiones deseadas.

4.2.3 SOFTWARE SALOME

El SALOME-MECA es un software de código abierto que proporciona una plataforma genérica de procesamiento previo y posterior para la simulación numérica. Se basa en una arquitectura abierta y flexible hecha de componentes reutilizables. Se distribuye bajo los términos de la licencia GNU LGPL. Este software se puede utilizar como una plataforma para la integración de los códigos numéricos externos de terceros para producir una nueva aplicación para la gestión del ciclo de vida completo de los modelos CAD (SALOME-Platform, 2005).

Entre las funciones de este software admite la interoperabilidad entre el modelo CAD y el software de computación (enlace CAD-CAE); facilita la integración de nuevos componentes en sistemas heterogéneos para el cálculo numérico; establece prioridad para el acoplamiento multifísico entre software de computación, proporciona una interfaz de usuario genérica, eficiente y fácil de usar; reduce el tiempo de formación al tiempo específico de aprendizaje de la solución de software basada en esta plataforma.

4.2.4 SOFTWARE OPENFOAM

OpenFOAM es el software CFD de código abierto y gratuito desarrollado principalmente por OpenCFD Ltd desde el 2004. Tiene una gran base de usuarios en la mayoría de las áreas de ingeniería y ciencia, tanto de organizaciones comerciales como académicas. OpenFOAM tiene una amplia gama de características para resolver cualquier modelo, desde flujos de fluidos complejos que involucran reacciones químicas, turbulencia y transferencia de calor, hasta acústica, mecánica sólida y electromagnética (OpenCDF, 2021).

La guía del usuario de OpenFOAM describe aplicaciones como simular un flujo incompresible, turbulento y en estado estable y cómo ejecutarlas, ya sea en un solo procesador o en paralelo en varios procesadores. Luego, la guía del usuario de OpenFOAM examina la configuración de los archivos de datos de entrada para un análisis CFD. Los datos de entrada incluyen información de tiempo (hora de inicio, hora de finalización, paso de tiempo, etc.) y controles para leer y escribir datos (hora, formato, compresión, etc.). Además, describe la configuración de esquemas numéricos que afectan la precisión y estabilidad de una simulación. También se explican los controles del solucionador de matrices y los controles de algoritmo que afectan el tiempo de cálculo y la estabilidad.

OpenFOAM incluye aplicaciones que convierten mallas de formatos bien conocidos al formato OpenFOAM y la guía del usuario detallada cubre las principales aplicaciones de conversión.

OpenFOAM se complementa con una versión de ParaView que incluye un módulo lector para leer datos en formato OpenFOAM. Esto permite la visualización de soluciones de OpenFOAM, con elementos que se utilizan comúnmente en CFD, como superficies geométricas, planos de

corte, gráficos vectoriales y líneas de flujo. Con estos elementos, los usuarios pueden generar animaciones cómodamente con ParaView.

En el paquete computacional de OpenFOAM se encuentra varios casos base de diferentes modelos que sirven de ayuda al usuario para familiarizarse con el programa.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 CASO DE ESTUDIO: “PLANTA DE TRATAMIENTO EL DESCANSO”

La Central de Generación Térmica El Descanso está localizada aproximadamente en el km 15 de la vía Panamericana Norte al nororiente de la ciudad de Cuenca, sector El Descanso perteneciente a la parroquia Javier Loyola, cantón Azogues, provincia del Cañar, cercana a la confluencia de los ríos Cuenca y Burgay que dan origen al río Paute (ELECAUSTRO, 2019).

El agua para la planta de tratamiento es captada del río Cuenca ubicada aproximadamente a un kilómetro aguas arriba de la planta, con un caudal promedio de 13 l/s siendo esta utilizada para diferentes fines como son sistemas de refrigeración, sistemas contra incendios y limpieza en áreas administrativas.

Esta planta de tratamiento es de tipo convencional y está diseñada para operar un caudal promedio de 15 l/s; en la planta se ejecutan las siguientes operaciones: captación, conducción de agua cruda, recepción, coagulación, floculación, sedimentación, filtración, desinfección, almacenamiento de agua tratada y distribución de la misma.

5.1.1. DESCRIPCIÓN DEL FLOCULADOR EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO “EL DESCANSO”

El floculador es de tipo hidráulico de flujo horizontal con tabiques prefabricados de asbesto-cemento, conformado por 3 unidades como se muestra en la figura 4, en donde se observan las 3 cámaras vacías.



FIGURA 4: FLOCULADOR HIDRÁULICO HORIZONTAL CON TABIQUES CENTRAL TERMOELÉCTRICA “EL DESCANSO”.

Fuente: Elaboración propia.

5.2 DISEÑO CONVENCIONAL

Para realizar el diseño convencional se usó como base la información establecida en el estudio: “Determinación de la dosis óptima del coagulante sulfato de aluminio aplicado en la planta de tratamiento de agua de la central termoeléctrica El Descanso” (Izquierdo Flores, 2015). De este estudio se obtuvo datos importantes como el caudal, número de cámaras, dimensiones del floculador, temperatura del agua, pérdidas de carga y tiempos de retención. Información requerida tanto para el diseño convencional como para el modelo numérico.

Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Caudal	Q	15	l/s
Temperatura	T	15	°
Viscosidad	ν	1,14E-06	m^2/s
Número de cámaras	N	3	
Coefficiente de Manning	n	0,012	

TABLA 2: DATOS INICIALES PARA EL DISEÑO CONVENCIONAL Y MODELACIÓN NUMÉRICA OBTENIDOS DEL CASO DE ESTUDIO “DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DEL COAGULANTE SULFATO DE ALUMINIO APLICADO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA EL DESCANSO” (IZQUIERDO FLORES, 2015).

Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de Manning se tomó de 0,012 por el tipo de material del floculador y de los tabiques que son de asbesto-cemento liso tal como se muestra en la tabla 3, el coeficiente que corresponde es el seleccionado.

MATERIAL	HAZEN-WILLIAMS (C)	MANNING (n)
Acero galvanizado(nuevo y usado).	125	0.014
Acero soldado(nuevo).	120	0.012
Acero soldado(usado).	90	0.014
Fierro fundido limpio(nuevo).	130	0.013
Plástico (PVC).	150	0.009
Asbesto-cemento(nuevo).	135	0.010
Cobre y latón.	130	0.010
Conductos cemento pulido int.	100	0.010
Concreto, acabado liso.	130	0.012
Concreto, acabado común	120	0.013
Polietileno alta densidad(PE)	150	0.009
Hierro dúctil.	135	0.011

TABLA 3: COEFICIENTE DE MANNING Y HAZEN WILLIAMS SEGÚN EL TIPO DE MATERIAL DE LA ESTRUCTURA HIDRÁULICA.

Fuente: Elaboración propia.

La temperatura del agua se obtuvo como dato del estudio indicándose que se midió mediante un termómetro de laboratorio en cada una de las cámaras (Izquierdo Flores, 2015). Se tomó entonces una temperatura de 15°C dando una viscosidad de 1,14E-06m²/s.

En cuanto al tiempo de retención según lo que se indica en el estudio, fue determinado mediante la técnica de trazadores y se utilizó como equipo el conductímetro marca YSI 30 modelo 30/10 FT que mide la conductividad en microsiemens/cm ($\mu S/cm$), la sustancia trazadora usada es el Cloruro de Sodio (NaCl) y se realizaron dos pruebas para que los resultados del tiempo tengan repetitividad y sean confiables.

Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Tiempo cámara 1	T_r1	3	min
Tiempo cámara 2	T_r2	11	min
Tiempo cámara 3	T_r3	9	min
Tiempo total de retención	T_r	23	min

TABLA 4: TIEMPOS DE RETENCIÓN DE LAS TRES CÁMARAS DEL FLOCULADOR Y TIEMPO TOTAL OBTENIDOS EN LABORATORIO.

Fuente: Elaboración propia.

Las dimensiones de largo, ancho y profundidad de las diferentes cámaras, así como el número de tabiques fueron obtenidas del estudio, sin embargo, estas dimensiones se corroboraron ya que se midió en el sitio, estas dimensiones se muestran en la tabla 5, 6 y 7. Las dimensiones de los tabiques son estándar de 1cm de espesor, 18cm de altura y 244cm de largo. Estas dimensiones y número de tabiques de cada cámara se muestran a continuación:

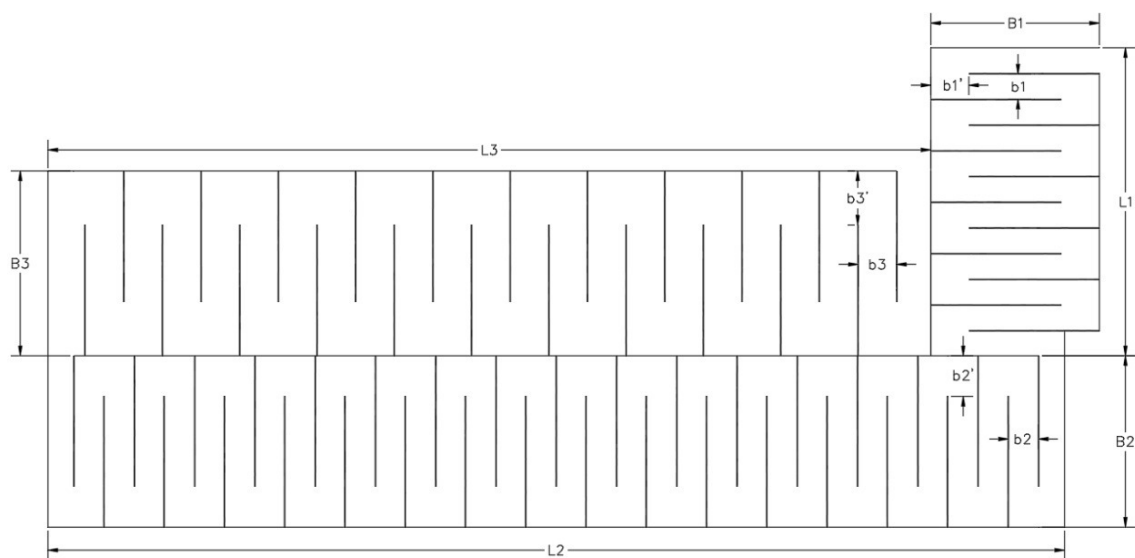


FIGURA 5: ESQUEMA EN PLANTA DEL FLOCULADOR HIDRÁULICO EN ESTUDIO COMPUESTO POR TRES CÁMARA SIENDO LA ENTRADA DE AGUA EN LA CÁMARA NÚMERO 1 Y LA SALIDA POR LA CÁMARA 3.

Fuente: Elaboración propia.

Cámara 1			
Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Ancho del floculador	B1	3,15	m
Longitud del floculador	L1	5,75	m
Ancho entre tabiques	b1	0,45	m
Ancho cambio de dirección	b1'	0,65	m
Número de tabiques	n1	11	

TABLA 5: DIMENSIONES PRIMERA CÁMARA CUYO ESQUEMA SE ENCUENTRA EN LA FIGURA 5.

Fuente: Elaboración propia.

Cámara 2			
Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Ancho del floculador	B2	3,2	m
Longitud del floculador	L2	19,00	m
Ancho entre tabiques	b2	0,55	m
Ancho cambio de dirección	b2'	0,685	m
Número de tabiques	n2	33	

TABLA 6: DIMENSIONES SEGUNDA CÁMARA CUYO ESQUEMA SE ENCUENTRA EN LA FIGURA 5.

Fuente: Elaboración propia.

Cámara 3			
Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Ancho del floculador	B3	3,45	m
Longitud del floculador	L3	16,50	m
Ancho entre tabiques	b3	0,7075	m
Ancho cambio de dirección	b3'	1,05	m
Número de tabiques	n3	22	

TABLA 7: DIMENSIONES TERCERA CÁMARA CUYO ESQUEMA SE ENCUENTRA EN LA FIGURA 5.

Fuente: Elaboración propia.

Las pérdidas de carga de las tres cámaras fueron obtenidas del estudio en el cual se indica que se determinó nivelando la superficie del agua en cada una de las cámaras de floculador, usando una cuerda tipo piola, clavos de acero, flexómetro y un nivel. La representación de cómo se trazó la cuerda de extremo a extremo para las diferentes cámaras se muestra en la figura 6.

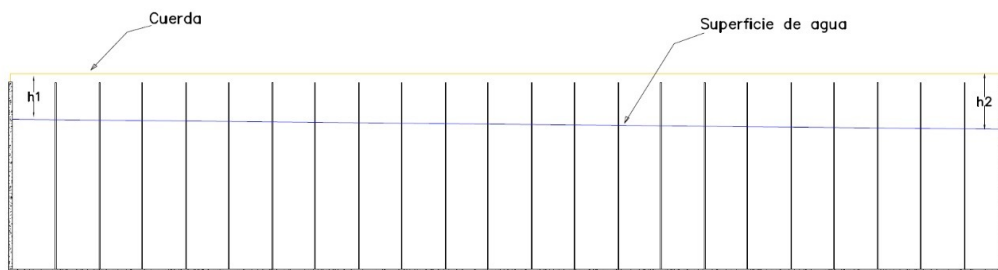


FIGURA 6: ESQUEMA DETERMINACIÓN DE PÉRDIDA DE CARGA USANDO CUERDA CUYA PERDIDA ES LA DIFERENCIA ENTRE h_2 Y h_1 .

Fuente: Elaboración propia.

Pérdida de carga			
Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Pérdida cámara 1	$\Delta_h 1$	0,095	m
Pérdida cámara 2	$\Delta_h 2$	0,168	m
Pérdida cámara 3	$\Delta_h 3$	0,112	m

TABLA 8: DETERMINACIÓN PÉRDIDA DE CARGA EN LAS CÁMARA CUYO ESQUEMA DE OBTENCIÓN DE PERDIDA SE ENCUENTRA EN LA FIGURA 6.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.1 ECUACIONES DE GOBIERNO PARA LOS CÁLCULOS Y CRITERIOS PARA EL DISEÑO CONVENCIONAL

El proceso para obtener velocidades, gradientes, pendientes, longitud de recorrido de las diferentes cámaras del floculador, fue determinar las pérdidas de carga total de cada cámara mediante las diferentes fórmulas de la hidráulica que se describen a continuación; una vez obtenidas estas pérdidas totales se comparó con los resultados de las pérdidas de carga que se muestran en la tabla 8, por lo que fue necesario iterar el calado de cada cámara hasta que estas pérdidas sean iguales y con eso verificar los gradientes. Por lo tanto, se partió con los datos que se obtuvo del estudio y se impuso un calado para cada cámara.

Ecuaciones de gobierno

1. Área (A): Una de las recomendaciones que se tiene al respecto de la geometría del floculador es que el ancho efectivo en el giro sea 1,5 veces el ancho entre tabiques dado que los gradientes suelen ser valores grandes en los cambios de direcciones.

$$A = \text{Ancho entre tabiques} \times \text{calado}$$
$$A = b \times y$$

2. Velocidad (V): La velocidad promedio en una unidad se establece entre 0,1 y 0,6 m/s (Pacheco, 2021). Se recomienda disponer de dos a tres sectores de floculación, donde las mayores velocidades (0,3-0,6 m/s) se tengan en los sectores iniciales y velocidades de (0,1 a 0,2 m/s) para los tramos de salida. Es importante validar las velocidades en diferentes puntos del floculador en caso de que se presenten variaciones de caudal en la planta (Arboleda, 2000).

$$V = \text{Caudal} / \text{Área}$$
$$V = Q / A$$

3. Longitud de recorrido (L_r): La longitud de recorrido está directamente relacionada con la velocidad y tiempo de retención por lo que es importante que el tiempo de retención este definido dentro de los rangos establecidos; el tiempo de retención puede variar de 10 a 30 minutos dependiendo del tipo de cámara y de la temperatura del agua, mismo que es establecido en un laboratorio.

$$L_r = \text{velocidad} \times \text{tiempo de retención}$$
$$L_r = V \times T_r$$

4. Radio hidráulico (R_h):

$$R_h = \text{Área} / \text{Perímetro mojado}$$
$$R_h = A / P$$

5. Pendiente (S_o):

$$S_o = \left(\frac{Q \times n}{A \times R_h^{2/3}} \right)^2$$

6. Pérdida por fricción (h_f), se da por causa del contacto del agua con las paredes de las cámaras de floculación:

$$h_f = S_o \times L_r$$

7. Pérdida por cambio de dirección y cambio de velocidad total ($h_c \text{ total} + h_t \text{ total}$), estas pérdidas se pueden expresar en función de la velocidad media de la unidad considerando un coeficiente (k) que varía entre 2 y 4 tomando como un valor común de 3 según la rugosidad de los tabiques y otros factores como cambio de dirección, esta fórmula está propuesta por Arboleda (Arboleda, 2000):

$$(h_c + h_t)total = \left(\frac{k \times V^2}{2 \times g} \right) \times \text{Número de tabiques}$$

8. Pérdida total (H), es la suma de todas las pérdidas:

$$H = h_f + (h_c + h_t)total$$

9. Gradiente de velocidad (G), esta fórmula es planteada por Snel y Arboleda (Snel & Arboleda Valencia, 1982): Cuando se tiene floculadores horizontales los rangos recomendados para los gradientes de velocidad se encuentran entre 20-60 s^{-1} (TeKippe & Ham, 1971). Este rango es recomendado ya que garantiza que no se rompa el floc. Se debe evitar valores menores a 10 s^{-1} y superiores a 100 s^{-1} ya que generaría problemas en el floculador. Gradientes bajos no son recomendados porque genera sedimentación y acumulación de lodos en el sistema, gradientes mayores a 100 s^{-1} pueden llegar a romper el floc.

$$G = \left(\frac{gH}{vT_r} \right)^{0.5}$$

Donde:

G : Gradiente [s^{-1}].

g : Gravedad [m/s^2].

H : Pérdida total [m].

v : Viscosidad [m^2/s].

T_r : Tiempo de retención [s].

5.3 CONFIGURACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

5.3.1 GEOMETRÍA DEL MODELO NUMÉRICO

5.3.1.1 DESCRIPCIÓN

La simulación numérica de una estructura hidráulica mediante el software computacional OpenFOAM corresponde al floculador horizontal utilizado para el trabajo de titulación “*Determinación de la dosis óptima del coagulante sulfato de aluminio aplicado en la planta de tratamiento de agua de la central termoeléctrica El Descanso*” (Izquierdo Flores, 2015); los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Sanitaria de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca; se plasmó una réplica del modelo que se encuentra en la mencionada central termoeléctrica.

Con el fin de poder comparar los resultados con los obtenidos en el diseño convencional y cumplir con los objetivos del presente trabajo de titulación, el análisis del modelo numérico se realizó tomando en cuenta únicamente la primera cámara del floculador, debido a requerimientos de tiempo, capacidad computacional e información disponible,

5.3.1.2 MODELO HIDRÁULICO

El modelo hidráulico correspondiente a la primera cámara del floculador horizontal el cual se simuló está conformado por:

- Entrada del agua.
- Once tabiques.
- Salida del agua.

La entrada de agua tiene un calado de 0,146 m y la salida cuenta con un calado de 0,155 m. Adicionalmente en la tabla 5 se puede observar las dimensiones de la primera cámara.



FIGURA 7: MODELO FÍSICO DE LA PRIMERA CÁMARA DEL FLOCULADOR HIDRÁULICO HORIZONTAL UBICADO EN LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA "EL DESCANSO".

Fuente: Elaboración propia.

5.3.1.3 ELABORACIÓN DE LA GEOMETRÍA

En las modelaciones de CFD es importante fijar las condiciones iniciales y de frontera o contorno para definir y acotar el dominio de estudio del modelo numérico; estas condiciones iniciales son el punto de partida de las ecuaciones de flujo. Las medidas fueron obtenidas en campo y el calado medido mediante cuerdas, conseguidas del trabajo de titulación mencionado. La construcción de la geometría en 3D fue desarrollada en el software AutoCAD.

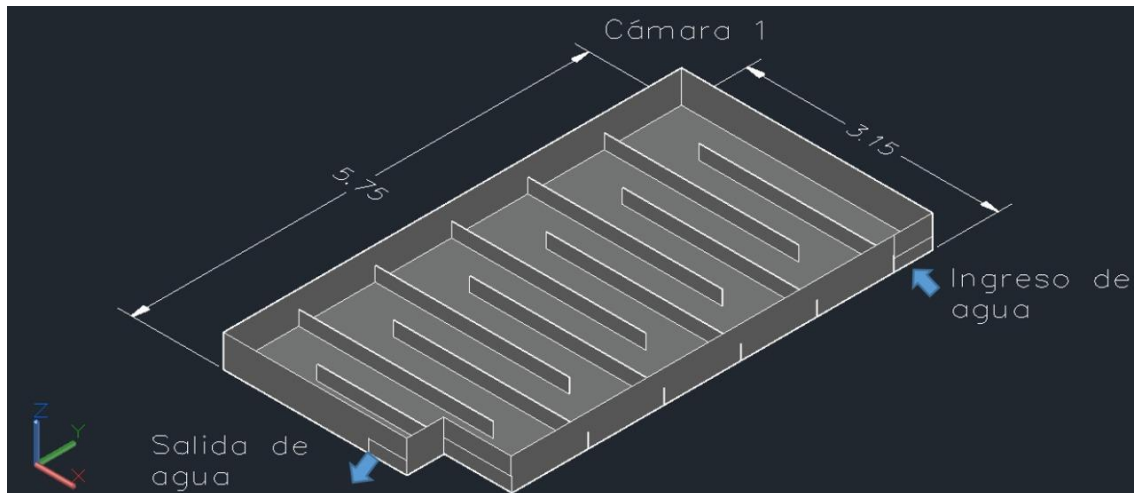


FIGURA 8: GEOMETRÍA DEL DOMINIO DE ESTUDIO 3D DE LA PRIMERA CÁMARA, REALIZADA EN AUTOCAD.

Fuente: Elaboración propia.

Notas:

1. El Ancho de la estructura se representa en el eje X, la longitud se representa en el eje Y, la altura en el eje Z.
2. Se muestra las dimensiones tanto el ancho como el largo de la primera cámara.
3. Se puede observar que hay un total de 11 tabiques.

Una vez creada la geometría en AutoCAD se realizó la exportación con el formato (.iges) al software computacional Salome-Meca para poder realizar el pre-proceso de creación de la malla.

5.3.2 ELABORACIÓN DEL MALLADO DEL DOMINIO DE ESTUDIO.

Cuando se usa los CFD es importante tener en cuenta una geometría bien definida que cuente con una malla de buena calidad, siendo este último importante ya que los resultados de la simulación dependerán de la calidad de la malla que se tenga. Para este estudio se utilizó el tipo de malla no estructurada o tetraédrica en el software computacional Salome-Meca por su facilidad y tiempo corto, se configuró el modelo con sus respectivas condiciones iniciales para la simulación numérica.

Dentro de este programa se define los límites de dominio o frontera que están conformados por una serie de caras o superficies que componen la malla, la definición correcta y coherente de las

condiciones de frontera es importante para obtener resultados válidos. A continuación, se describe los límites de dominio usados en la simulación:

- Inlet 1: Representa la entrada de agua con un calado de 0.146m.
- Inlet 2: Representa la entrada de aire siendo la parte superior de la entrada de flujo.
- Outlet: Representa la salida de agua y aire, para la condición de salida el balance de masa global dentro del dominio debe cumplirse, por esto es que se establece el gradiente de presión con valor de cero.
- Atmosphere: Representa la parte superior del canal.
- Concretewall: Representa muros laterales, base de canal y tabiques; para establecer la condición de pared sólida se considera que es impermeable y antideslizante.

Esta forma permite asignar las condiciones de borde o frontera en el programa OpenFOAM.

Después de crear la malla se exporta como un archivo con extensión (.unv) y con ayuda del comando *ideasUnvToFoam* dentro del software OpenFOAM se puede cargar la malla.

5.3.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LA MALLA

El programa Salome-Meca permite definir el rango de tamaño de la malla mediante un proceso iterativo en el cual se corre diferentes modelos con varios tamaños de malla, pudiéndose verificar si la malla es correcta mediante el parámetro Orthogonal Quality que sirve para verificar que el mallado tenga la calidad mínima requerida para ser implementada sin problemas de convergencia, también revisa la calidad del elemento más desfavorable en la malla, teniendo en cuenta que un único elemento lleva a divergencia del solver.

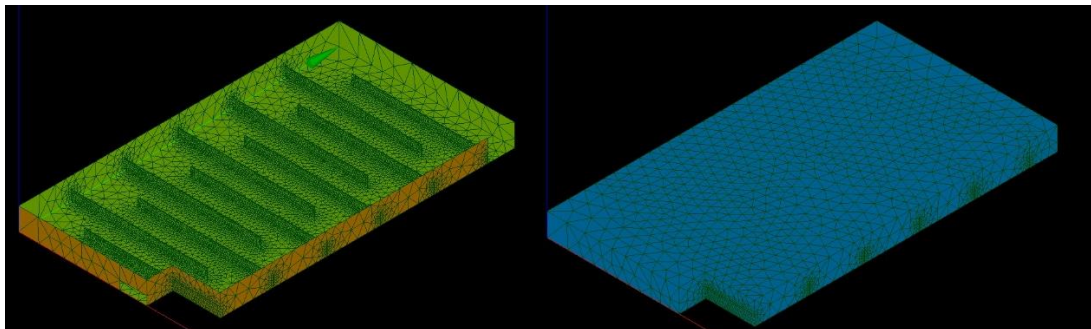


FIGURA 9: MALLADO TETRAÉDRICO OBTENIDO EN EL SOFTWARE COMPUTACIONAL SALOME-MECA DE LA PRIMERA CÁMARA.

Fuente: Elaboración propia.

Para que la malla sea de buena calidad debe cumplir con algunos criterios como: la no-ortogonalidad, la simetría, relación de aspecto. Estos criterios se pueden verificar mediante el comando *checkMesh* en OpenFOAM después de ya haber cargado la malla dentro del programa.

5.3.3 CONFIGURACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO OPENFOAM

Para realizar la configuración de modelo numérico se usó el software OpenFOAM, este software tiene varios solucionadores, y para este caso de estudio se tomó en cuenta el interFoam ya que permite solucionar fluidos incompresibles, isotérmicos e inmiscibles; el algoritmo del que se basa es el Método Fracción de Volumen (VOF). Entre los modelos de turbulencia para fluidos incompresibles se usó el modelo de transporte de esfuerzo cortante (kOmegaSST) que es tipo RAS (Reynold-Averaged Simulation).

Siguiendo con el proceso dentro del software OpenFOAM se tomó de guía el manual de usuario de OpenFOAM para flujos bajo el modelo de turbulencia k-omega. Para realizar la simulación fue necesario crear tres directorios: “0”, “System”, “Constant”, dentro de cada uno de los directorios se almacena la información importante para el correcto funcionamiento de la simulación de la malla, estas carpetas tienen scripts en lenguaje C++. Los parámetros y descripción de estos directorios se encuentran en el Apéndice A del caso de estudio.

En el directorio “0” dentro del archivo “nut” se colocó las consideraciones de resistencia al flujo que el software usa para la simulación numérica la cual es la rugosidad absoluta. En el diseño convencional se utilizó el coeficiente de rugosidad de Manning para la resolución de las ecuaciones de flujo, en este caso para la simulación numérica se hizo una relación entre la rugosidad absoluta y el coeficiente de rugosidad de Manning conocido para obtener los mismos parámetros de resistencia al flujo. Para encontrar esta relación se partió de la ecuación de resistencia al flujo propuesta por Manning para canales abiertos, esta ecuación está en función del coeficiente de resistencia al flujo la cual a su vez tiene como variable la rugosidad absoluta. Lo descrito se muestra a continuación:

$$n_M = \sqrt{\frac{C_R}{2g}} \times R_h^{\frac{1}{6}}$$

$$C_R = \frac{0,0625}{\left[\log\left(\frac{K_s}{14,8 \times R_h} + \frac{5,74}{Re^{0,9}}\right) \right]^2}$$

Donde:

n_M : Coeficiente de rugosidad de Manning.

C_R : Coeficiente de rugosidad.

K_s : Rugosidad absoluta.

g : Gravedad [m/s^2].

R_h : Radio hidráulico [m].

Re : Número de Reynolds.

5.3.3.1 TIEMPO DE SIMULACIÓN

El tiempo de simulación es un parámetro fundamental dentro del modelo numérico, para este caso se realizó un total de 280,6 segundos para la primera cámara, logrando en este tiempo que la velocidad se mantenga constante y alcance la convergencia el modelo de simulación.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 CASO DE ESTUDIO CONVENCIONAL

Según estudios realizados por diferentes autores a continuación se presentan criterios que permitirán analizar si los resultados obtenidos se encuentran dentro de los rangos establecidos previamente, tomando en cuenta los criterios para diseño mencionados en la sección 5.2.1.

El primer criterio a considerar fue disponer de dos a tres sectores de floculación, teniendo en el diseño tres cámaras, por lo que el criterio establecido si se cumplió.

Además, se consideró que la velocidad promedio para las cámaras se encuentre en el rango establecido (0,1 y 0,6 m/s), teniendo velocidades para las tres cámaras en un rango de 0,17-0,23 m/s. Se verificó también que se cumpla que las mayores velocidades (0,3-0,6 m/s) se tengan en los sectores iniciales y velocidades de (0,1 a 0,2m/s) para los tramos de salida, teniendo como velocidad inicial 0,23 m/s y como velocidad final 0,17 m/s.

Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Velocidad cámara 1	v_1	0,23	m/s
Velocidad cámara 2	v_2	0,18	m/s
Velocidad cámara 3	v_3	0,17	m/s

TABLA 9: VELOCIDADES CALCULADAS MEDIANTE EL MÉTODO CONVENCIONAL PARA LAS TRES CÁMARAS DE ESTUDIO.

Fuente: Elaboración propia.

Notas:

1. El rango de velocidades obtenidas se encuentran entre 0,17-0,23 m/s.
2. La mayor velocidad se encuentra en la primera cámara siendo de 0,23 m/s y la menor velocidad en la tercera cámara de 0,17m/s.
3. Las velocidades obtenidas se encuentran dentro de los criterios establecidos para el diseño.
4. El valor v_1 ha servido para la comparación con el modelo numérico.

Así mismo se explica a continuación otros parámetros del diseño convencional que se han logrado establecer mediante las ecuaciones de gobierno mencionadas en la sección 5.2.1, siendo importantes para el cálculo de velocidades y gradientes de velocidad. Además, se recalca que se ha respetado que el ancho efectivo en el tabique sea 1,5 veces el ancho entre tabiques.

Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Área cámara 1	A1	0,07	m^2
Área cámara 2	A2	0,09	m^2
Área cámara 3	A3	0,09	m^2
Radio hidráulico cámara 1	$R_h 1$	0,09	m
Radio hidráulico cámara 2	$R_h 2$	0,1	m

Radio hidráulico cámara 3	R_{h3}	0,09	m
---------------------------	----------	------	---

TABLA 10: RESULTADOS DE ÁREAS Y RADIOS HIDRÁULICOS PARA EL DISEÑO CONVENCIONAL PARA LAS TRES CÁMARAS DE ESTUDIO.

Fuente: Elaboración propia.

Notas:

1. La cámara con mayor área es la tercera y la de menor área la primera.
2. El área de las cámaras varían entre 0,07-0,09 m^2 .
3. Estas áreas y radios hidráulicos calculados fueron parámetros importantes para después obtener el gradiente de velocidad mediante el método convencional.

La longitud de recorrido está directamente relacionada con la velocidad y tiempo de retención, es por eso que se verificó que el tiempo de retención dado por el laboratorio que es de 23 minutos cumpla con los criterios mencionados en la sección 5.2.1, el cual menciona que el tiempo de retención puede variar de 10 a 30 minutos dependiendo del tipo de cámara y de la temperatura del agua, por lo tanto, se encuentra dentro del criterio.

Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Longitud cámara 1	L_{r1}	41,1	m
Longitud cámara 2	L_{r2}	116,1	m
Longitud cámara 3	L_{r3}	93,8	m

TABLA 11: LONGITUDES DE RECORRIDO CALCULADAS PARA EL FLOCULADOR DE ESTUDIO.

Fuente: Elaboración propia.

Nota:

1. Los resultados obtenidos de las longitudes de recorrido fueron necesarios para la obtención de las pérdidas por fricción, el mismo que sirve para después calcular el gradiente de velocidad.
2. El resultado L_{r1} sirvió como dato para obtener los demás parámetros en la modelación numérica.

Cámara	Pérdida por fricción	Pérdida por conversión y por cambio de dirección	Pérdida total
	h_f (m)	$(h_c + h_t)$ total (m)	H (m)
1	0,008	0,088	0,095
2	0,011	0,156	0,168
3	0,010	0,102	0,112

TABLA 12: PÉRDIDAS CALCULADAS PARA EL FLOCULADOR EN ESTUDIO.

Fuente: Elaboración propia.

Nota:

Estas pérdidas calculadas de acuerdo a la formulación establecida en la literatura sirvieron para calcular los gradientes de velocidad que se encuentran en la tabla 13.

Cuando se tiene floculadores horizontales los rangos recomendados para los gradientes de velocidad se encuentran entre $20-60s^{-1}$, evitándose valores menores a 10 y superiores a 100 ya que generaría problemas en el floculador. (TeKippe & Ham, 1971).

Los rangos obtenidos del gradiente de velocidad se encuentran dentro de los criterios que se mencionó en la sección 5.2.1 teniendo como referencia los criterios de tener un rango entre $20-60s^{-1}$ para garantizar que no se rompa el floc en la segunda y tercera cámara, y que en la primera cámara el gradiente no sobre pase el valor máximo de $100 s^{-1}$.

Cámara	G [s^{-1}]
1	67,57
2	46,73
3	42,17

TABLA 13: GRADIENTES DE VELOCIDAD CALCULADAS MEDIANTE LA FORMULACIÓN ESTABLECIDA.

Fuente: Elaboración propia.

Nota: El gradiente calculado en la primera cámara ha servido como dato de comparación para la modelación numérica.

6.2 SIMULACIÓN NUMÉRICA

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la simulación numérica para la primera cámara, planteando la geometría como se muestra en la figura 10.

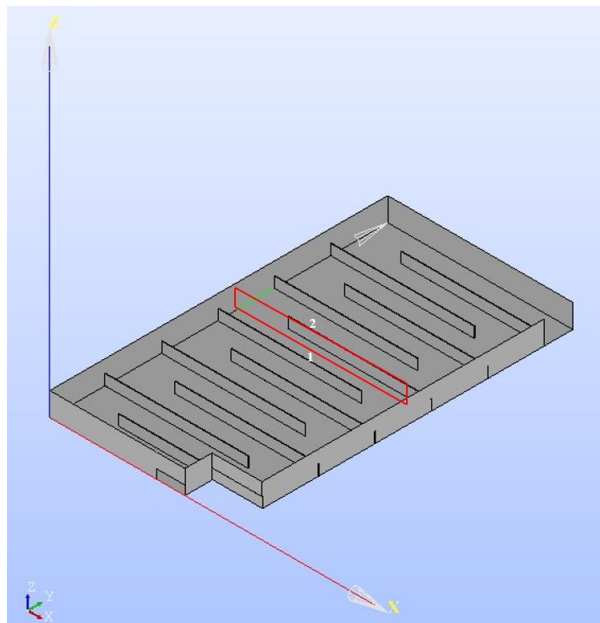


FIGURA 10: ESQUEMA DE GEOMETRÍA DE LA MALLA EXPORTADO DESDE AUTOCAD A EL PROGRAMA SALOME-MECA.

Fuente: Elaboración propia.

Nota: El Ancho de la estructura se representa en el eje X, la longitud se representa en el eje Y, la altura en el eje Z.

Después de que la simulación culminó se tuvieron las siguientes consideraciones:

1. Para llegar al tiempo de simulación donde la velocidad es estable y existe convergencia en el modelo, se tuvo que realizar varias corridas, empezando por una corrida de 10 s donde se observó que el agua solo recorría hasta el segundo tabique; luego con un tiempo de simulación de 150 s donde el agua ya recorrió toda la primera cámara pero no llegaba a estabilizarse, por último se verificó con 218 s donde ya se pudo ver a la velocidad estable desde el segundo 200, sin embargo, se simuló hasta el segundo 280,6 para asegurar la convergencia del modelo.
2. En el caso de la malla se iteró con diferentes tamaños de celdas máximas y mínimas hasta que la malla resultante cumpliera los requisitos mínimos para una buena simulación descritos en la sección 5.3.2.1. Finalmente se realizó la simulación numérica con un tamaño de celdas máximo de 1 m y un mínimo de 3 cm, esta malla cumplía los criterios de verificación para una correcta simulación en el programa OpenFOAM verificados con el comando checkMesh.
3. Para obtener las velocidades medias se realizó cortes longitudinales a través del floculador a una altura de agua de 0,0584 m tomando en cuenta el criterio de Chow (1994) el cual señala que las velocidades medias se determinan midiendo a 0,6 de la profundidad en la vertical debido a que estas no están distribuidas de manera uniforme en toda la sección del canal por la presencia de superficie libre y fricción en las paredes del canal, esto se indica en la figura 11.

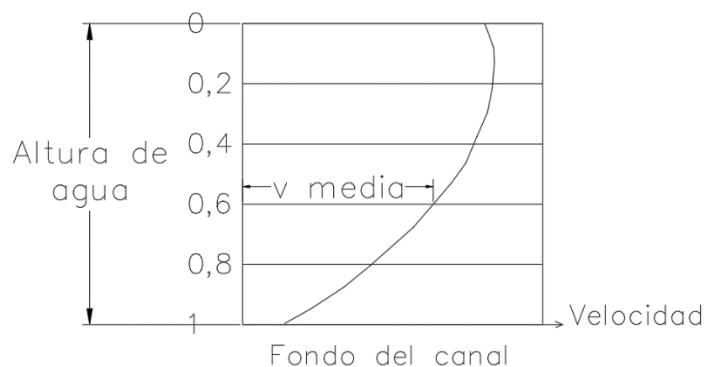


FIGURA 11: VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD CON LA PROFUNDIDAD EN LA SECCIÓN DE UN CANAL

Fuente: Elaboración propia.

Por esta razón se analizó las velocidades medias en cortes longitudinales del floculador a una altura de agua de 0,0584 metros ya que el calado de agua es igual a 0,146 metros.

En la figura 12 se analizó la variación de la velocidad con respecto a la profundidad en un corte transversal en el centro del floculador como se indica en la figura 10.

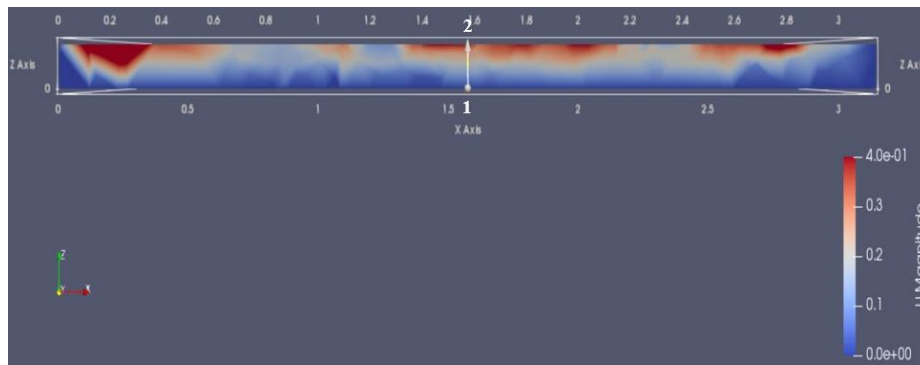


FIGURA 12: VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD CON RESPECTO A LA PROFUNDIDAD EN UN CORTE TRANSVERSAL 1-2 DE LA PRIMERA CÁMARA DEL FLOCULADOR

Fuente: Elaboración propia.

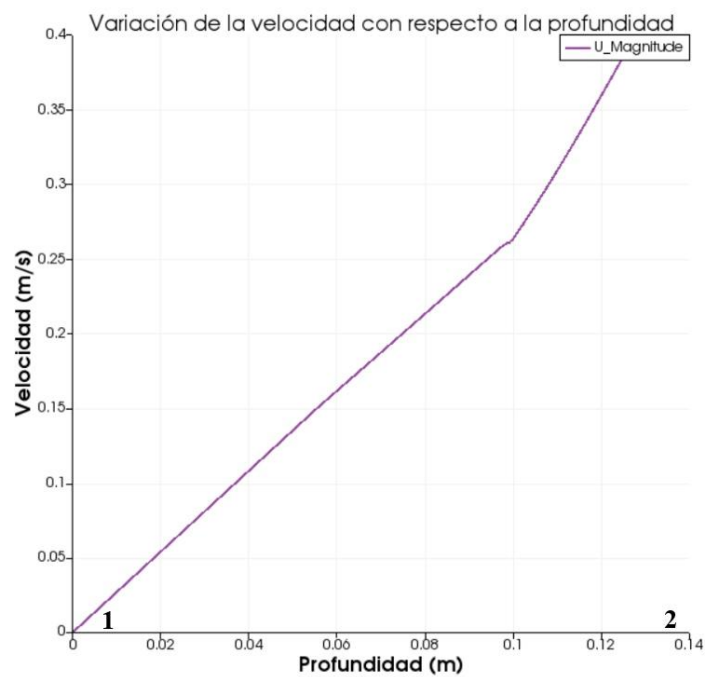


FIGURA 13: REPRESENTACIÓN DE LA VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD CON RESPECTO A LA PROFUNDIDAD EN UN CORTE TRANSVERSAL 1-2 DE LA PRIMERA CÁMARA DEL FLOCULADOR.

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se observa que las velocidades son mayores cerca de la superficie libre y van disminuyendo a medida que se acercan al fondo del floculador.

4. Para verificar que el tiempo de simulación sea el óptimo y no exista cambios en la velocidad alcanzando la convergencia en el modelo, se realizó un corte en la salida de la cámara teniendo como resultado:

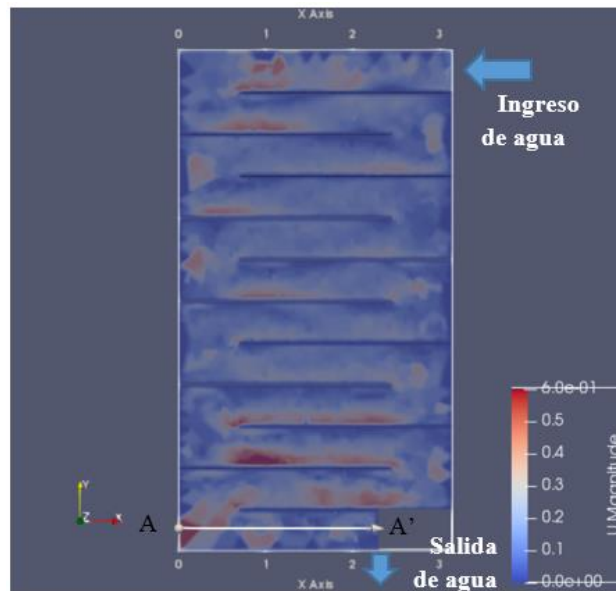


FIGURA 14: CORTE LONGITUDINAL A LA SALIDA DEL FLOCULADOR DE LA PRIMERA CÁMARA PARA VERIFICAR LA CONVERGENCIA DEL MODELO NUMÉRICO MEDIANTE LA ESTABILIDAD DE LA VELOCIDAD.

Fuente: Elaboración propia.

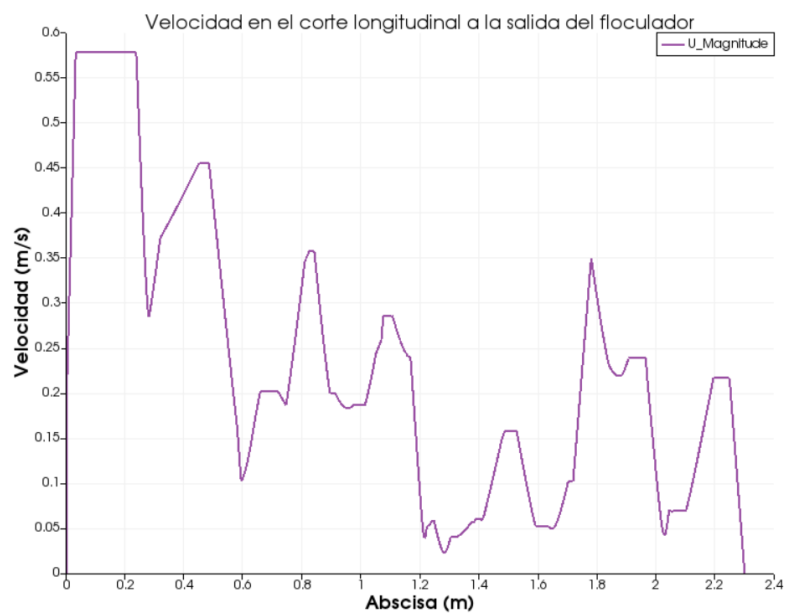


FIGURA 15: REPRESENTACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL CORTE A-A' DE LA FIGURA 14.

Fuente: Elaboración propia.

Notas: Las abscisas van desde 0 hasta 2,3 m que representa la longitud a la salida del floculador de la primera cámara. Las velocidades van en un rango de 0,025-0,57 m/s teniendo la velocidad máxima en la abscisa 0,22 m.

- Se pudo obtener como resultado dentro del software OpenFOAM mediante el comando paraFoam las velocidades, mismas que sirvieron para poder obtener los gradientes de velocidad.

- Una vez que se obtuvieron las velocidades se realizó un corte en el lado izquierdo del floculador con el fin de verificar las velocidades en los cambios de dirección por ser puntos donde la velocidad puede cambiar de manera drástica y donde el diseño requiere mayor atención.

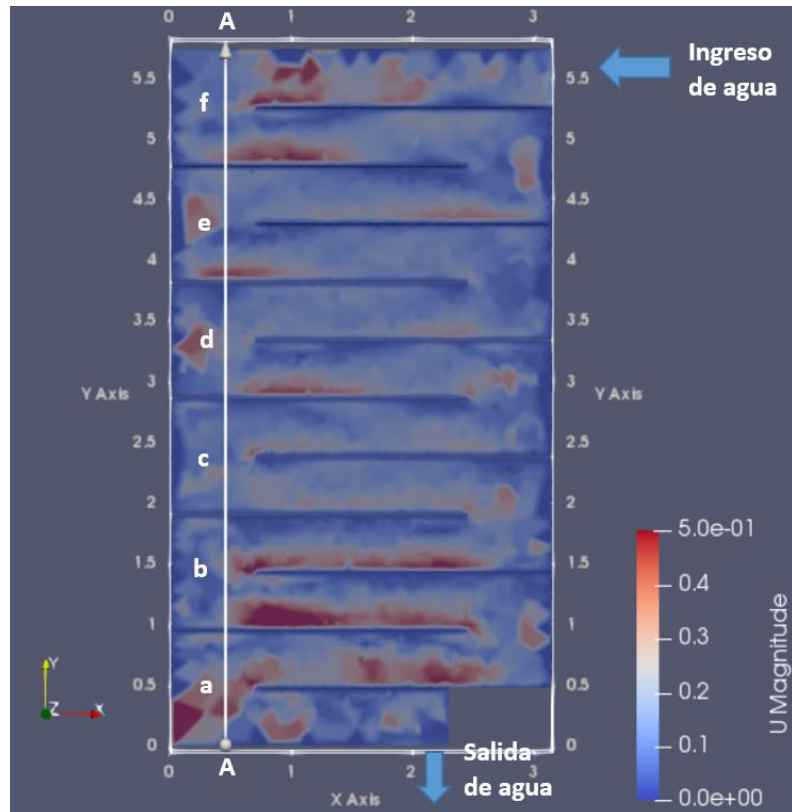


FIGURA 16: CORTE LONGITUDINAL A-A DE LA PRIMERA CÁMARA EN LOS CAMBIOS DE DIRECCIÓN DEL FLUIDO PARA VERIFICAR LA VELOCIDAD.

Fuente: Elaboración propia.

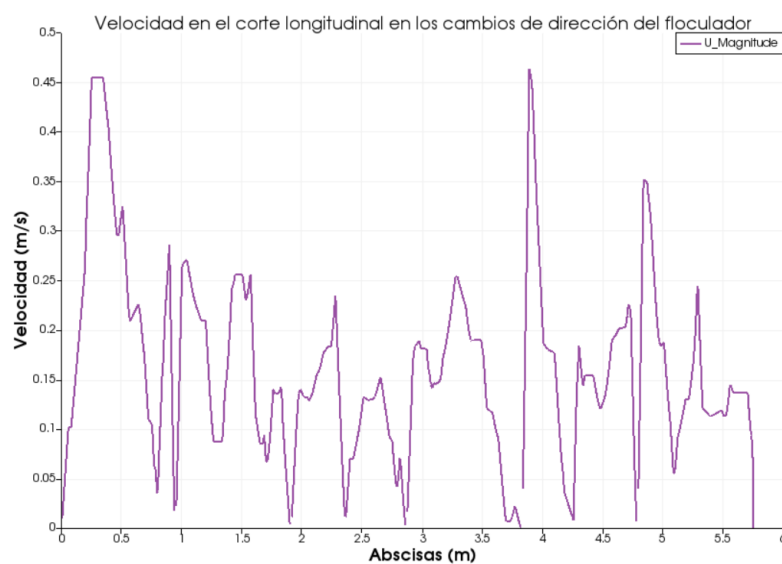


FIGURA 17: REPRESENTACIÓN DE LA VELOCIDAD EN LOS CAMBIOS DE DIRECCIÓN DEL CORTE A-A, DE LA FIGURA 13.

Fuente: Elaboración propia.

Notas:

1. Las abscisas van de 0-5,75 m que es la longitud de la primera cámara.
2. La velocidad máxima que se tiene es de 0,47 m/s en la abscisa 3,9 m ubicado cerca del cuarto tabique como se puede ver en la figura 16.
3. El corte longitudinal atraviesa los tabiques, por esta razón se observan movimientos bruscos en la gráfica debido a velocidades de cero.
4. Las velocidades varían a lo largo del corte longitudinal, no son constantes.

Se tomó como referencia en total seis puntos que se observan en la figura 16 representados como a, b, c, d, e y f con el objetivo de verificar las velocidades en los cambios de dirección ubicados a lo largo del corte A-A de la primera cámara del floculador en estudio.

Los resultados correspondientes se muestran a continuación:

Punto	Abscisas (m)*	Velocidad (m/s)
a	0,46	0,30
b	1,42	0,24
c	2,25	0,20
d	3,34	0,23
e	4,30	0,18
f	5,27	0,19
	Promedio	0,22

*La abscisa cero corresponde a la salida de la cámara

TABLA 14: LOS RESULTADOS PRESENTES CORRESPONDEN A LAS VELOCIDADES EN LOS CAMBIOS DE DIRECCIÓN DEL CORTE A-A DE LA FIGURA 16 OBTENIDAS EN LA SIMULACIÓN DE LA PRIMERA CÁMARA.

Fuente: Elaboración propia.

Puntos establecidos en los cambios de direcciones para la velocidad

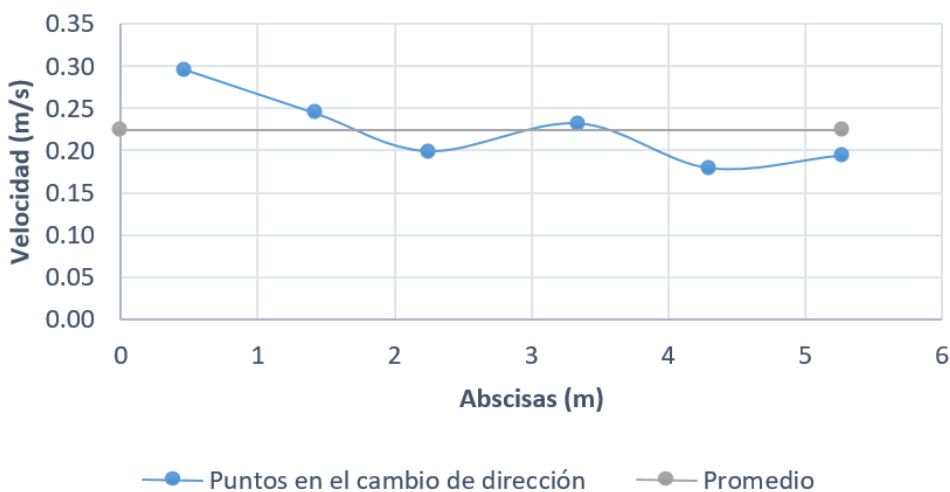


FIGURA 18: REPRESENTACIÓN DE LOS PUNTOS MOSTRADOS EN LA TABLA 14 DE LAS VELOCIDADES EN LOS CAMBIOS DE DIRECCIÓN.

Fuente: Elaboración propia.

Nota: La velocidad máxima (0,30 m/s) se da en la abscisa 0,46 m ubicada cerca a la salida de flujo de la primera cámara, la velocidad mínima (0,18 m/s) se da en la abscisa 4,30 m. El promedio de velocidad obtenido fue de 0,22 m/s en los 6 puntos.

Una vez obtenidas las velocidades en los 6 puntos en el cambio de dirección del flujo a lo largo del floculador y teniendo como datos:

Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Caudal	Q	15	l/s
Temperatura	T	15	°C
Viscosidad	ν	0,00000114	m ² /s
Número de Manning	n	0,012	
Gravedad	g	9,81	m/s ²
Ancho entre tabiques	b1	0,45	m
Longitud de recorrido	Lr1	41,10	m
Número de tabiques	n1	11	

TABLA 15: DATOS DE LA PRIMERA CÁMARA NECESARIOS PARA EL CÁLCULO DE LOS DEMÁS PARÁMETROS DEL FLOCULADOR PARA DESPUÉS SER COMPARADOS CON LOS DATOS DEL DISEÑO CONVENCIONAL.

Fuente: Elaboración propia.

Se procedió al cálculo de los otros parámetros del floculador que fueron obtenidos en el diseño convencional para después ser comparados. Entre los parámetros analizados se encuentran: área, radios hidráulicos, tiempo de retención, pérdidas de carga y los gradientes de velocidad.

Punto	Velocidad calculada (m/s)	Radio hidráulico (m)	Área (m ²)
a	0,30	0,08	0,05
b	0,24	0,09	0,06
c	0,20	0,10	0,08
d	0,23	0,09	0,06
e	0,18	0,10	0,08
f	0,19	0,10	0,08
Promedio	0,22	0,09	0,07

TABLA 16: LOS RESULTADOS PRESENTES CORRESPONDEN A EL ÁREA Y RADIO HIDRÁULICO DE LA SECCIÓN DEL FLUJO PROYECTADO PARA LA PRIMERA CÁMARA SEGÚN LA VELOCIDAD CALCULADA EN LOS CAMBIOS DE DIRECCIÓN.

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Estos resultados fueron obtenidos mediante la formulación establecida en el diseño convencional, siendo necesarios para el cálculo de pérdidas y gradiente de velocidad.

Punto	Velocidad calculada (m/s)	Tiempo de retención (min)
a	0,30	2
b	0,24	3
c	0,20	3
d	0,23	3
e	0,18	4
f	0,19	4
Promedio	0,22	3

TABLA 17: LOS RESULTADOS PRESENTES CORRESPONDEN AL TIEMPO DE RETENCIÓN PROYECTADO PARA LA PRIMERA CÁMARA SEGÚN LA VELOCIDAD CALCULADA EN LOS CAMBIOS DE DIRECCIÓN.

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Para obtener el tiempo de retención se tomó como datos la velocidad en los 6 puntos de la simulación en los cambios de dirección y la longitud de recorrido para la primera cámara dado en la tabla 11, dividiendo la longitud de recorrido para las velocidades.

Punto	Velocidad calculada (m/s)	Pérdida por fricción	Pérdida por conversión y por cambio de dirección	Pérdida total
		h_f (m)	$(h_c + h_t)$ total (m)	H (m)
a	0,30	0,016	0,147	0,164
b	0,24	0,009	0,100	0,110
c	0,20	0,005	0,067	0,072
d	0,23	0,008	0,091	0,099
e	0,18	0,004	0,054	0,058
f	0,19	0,005	0,063	0,068
Promedio	0,22	0,008	0,087	0,095

TABLA 18: LOS RESULTADOS PRESENTES CORRESPONDEN A LAS PÉRDIDAS DE FRICCIÓN, PÉRDIDAS POR CONVERSIÓN Y CAMBIO DE DIRECCIÓN Y POR ÚLTIMO LA PÉRDIDA TOTAL SIENDO LA SUMA DE LAS DOS ANTERIORES, PROYECTADOS PARA LA PRIMERA CÁMARA SEGÚN LA VELOCIDAD CALCULADA EN LOS CAMBIOS DE DIRECCIÓN.

Fuente: Elaboración propia.

Nota: El cálculo de la pérdida total fue necesario para obtener el gradiente de velocidad.

Punto	Abcisas (m)*	Gradiente (s^{-1})
a	0,46	100,74
b	1,42	74,82
c	2,25	54,75
d	3,34	69,25
e	4,3	46,58
f	5,27	52,66
	Promedio	66,47

*La abscisa cero corresponde a la salida de la cámara

TABLA 19: LOS RESULTADOS PRESENTES CORRESPONDEN AL GRADIENTE DE VELOCIDAD OBTENIDOS A PARTIR DE LOS 6 PUNTOS DE LA SIMULACIÓN Y MEDIANTE LA FORMULACIÓN PERTINENTE.

Fuente: Elaboración propia.

Nota: El rango de los gradientes va de $46,58-100,74 \text{ s}^{-1}$, teniendo el mayor gradiente en el punto a de la figura 16 cerca a la salida y el menor gradiente cerca de la entrada del flujo en el punto e. El gradiente de velocidad es un dato importante que debe ser tomado en cuenta en el diseño de un floculador ya que existen criterios de autores que establecen rangos para garantizar el correcto funcionamiento de un floculador.

Puntos establecidos en los cambios de direcciones para el gradiente

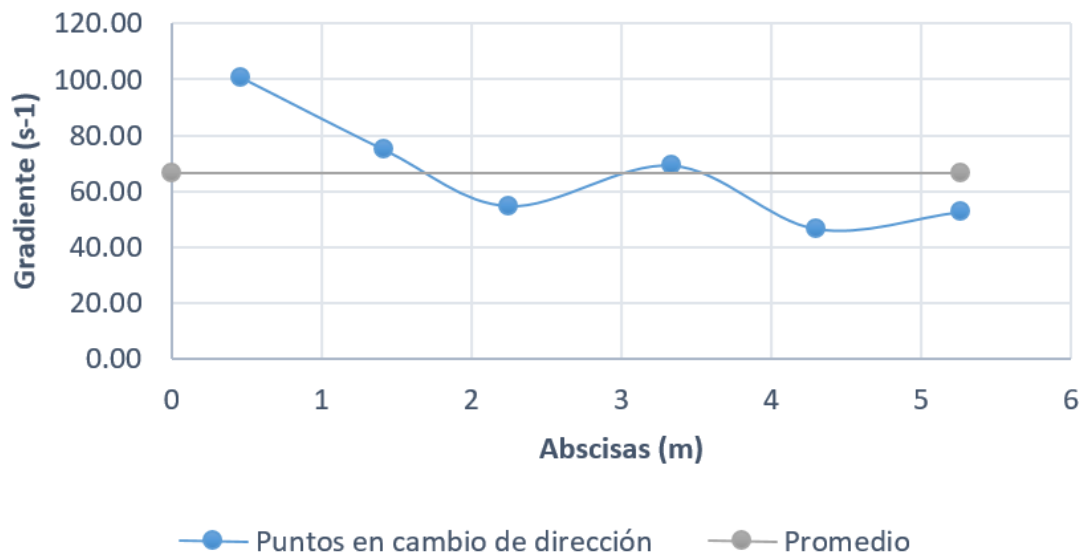


FIGURA 19: REPRESENTACIÓN DE LOS PUNTOS MOSTRADOS EN LA TABLA 19 DE LOS GRADIENTES EN LOS CAMBIOS DE DIRECCIÓN.

Fuente: Elaboración propia.

Nota: El gradiente máximo ($100,74 \text{ s}^{-1}$) se da en la abscisa $0,46 \text{ m}$ ubicada cerca a la salida de flujo de la primera cámara, el gradiente mínimo ($46,58 \text{ s}^{-1}$) se da en el punto e cerca a la entrada del flujo como se muestra en la figura 16. El promedio de gradientes obtenido fue de $66,47 \text{ s}^{-1}$ en los 6 puntos.

Con el fin de tener más puntos de comparación, se realizó un corte longitudinal en el centro del floculador logrando así obtener una idea más amplia de lo que sucede en toda la primera cámara.

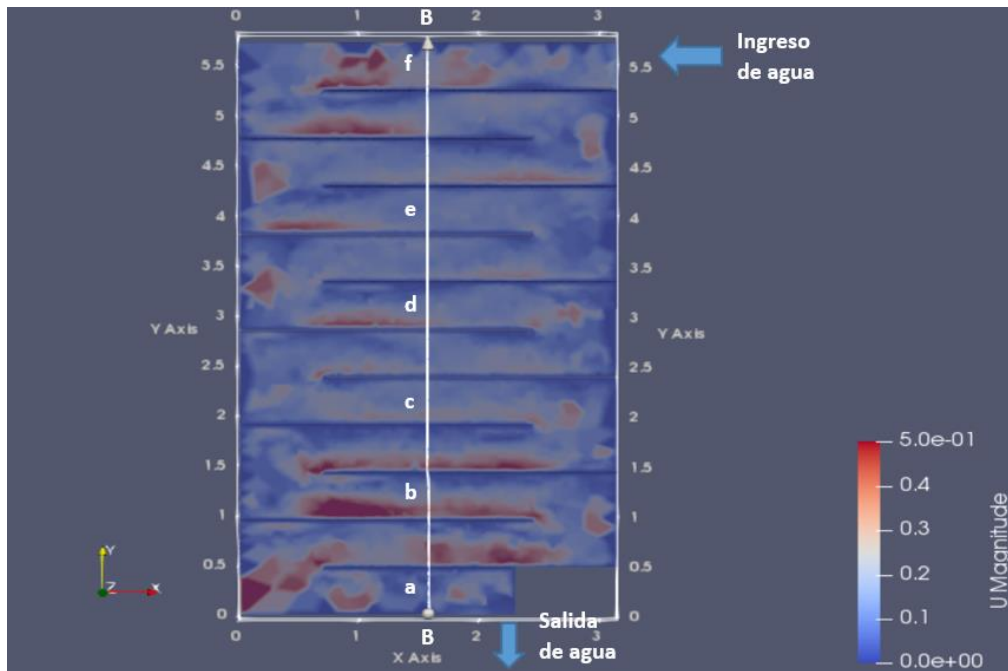


FIGURA 20: CORTE LONGITUDINAL B-B DE LA PRIMERA CÁMARA EN EL CENTRO DEL FLOCULADOR PARA VERIFICAR LA VELOCIDAD.

Fuente: Elaboración propia.

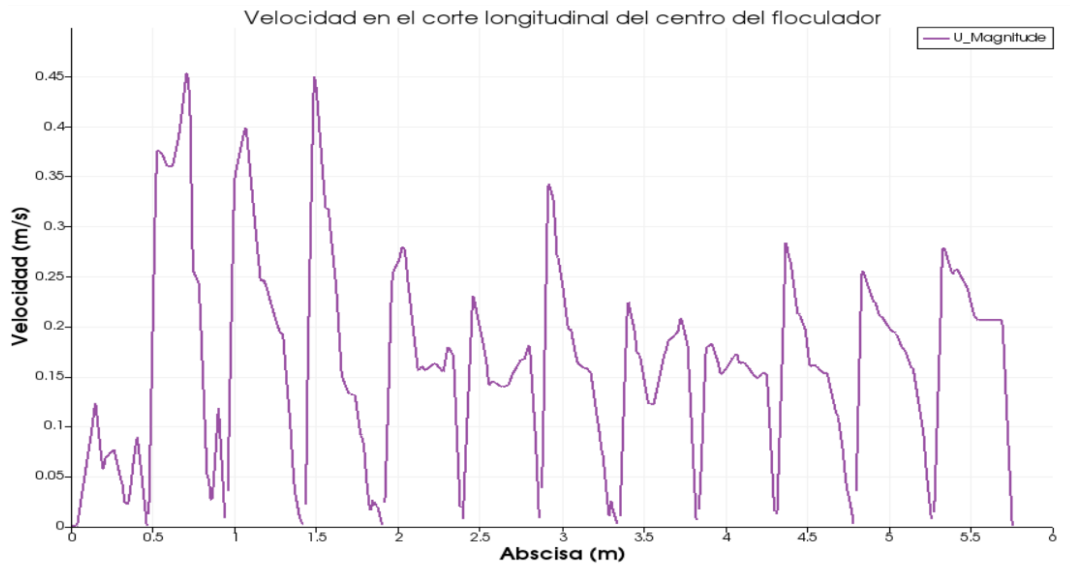


FIGURA 21: REPRESENTACIÓN DE LA VELOCIDAD EN EL CENTRO DEL FLOCULADOR DEL CORTE B-B, DE LA FIGURA 17.

Fuente: Elaboración propia.

Notas:

1. Las abscisas van de 0-5,75 m que es la longitud de la primera cámara.
2. La velocidad máxima que se tiene es de 0,45 m/s en la abscisa 0,7 m cerca a la salida del agua de la primera cámara como se puede ver en la figura 17.

3. El corte longitudinal atraviesa los tabiques, por esta razón se observan movimientos bruscos en la gráfica debido a velocidades de cero.
4. Las velocidades varían a lo largo del corte longitudinal, no son constantes.

Se tomó como referencia en total seis puntos que se representan en la figura 17 representados como a, b, c, d, e y f con el objetivo de verificar las velocidades en el centro del floculador ubicados a lo largo del corte B-B de la primera cámara del floculador en estudio.

Los resultados correspondientes se muestran a continuación:

Punto	Abcisas (m)*	Velocidad (m/s)
a	0,23	0,11
b	1,19	0,24
c	2,15	0,16
d	3,11	0,27
e	4,07	0,17
f	5,50	0,22
	Promedio	0,20

*La abscisa cero corresponde a la salida de la cámara

TABLA 20: LOS RESULTADOS PRESENTES CORRESPONDEN A LAS VELOCIDADES EN EL CENTRO DEL FLOCULADOR DEL CORTE B-B DE LA FIGURA 17 OBTENIDAS EN LA SIMULACIÓN DE LA PRIMERA CÁMARA.

Fuente: Elaboración propia.

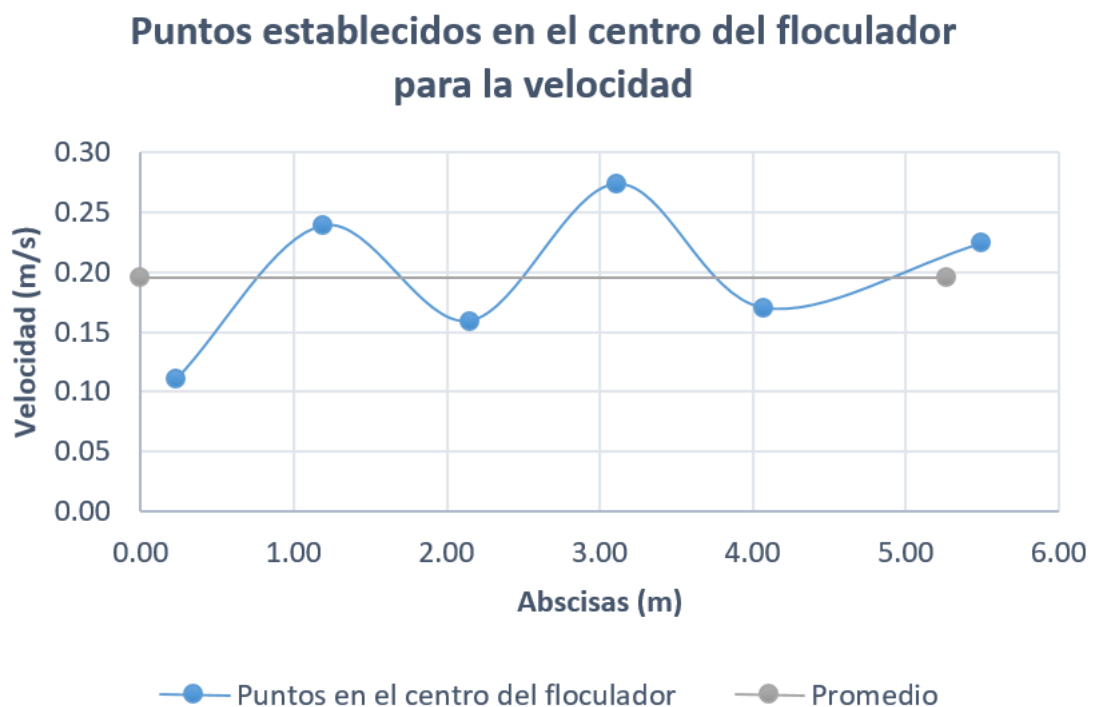


FIGURA 22: REPRESENTACIÓN DE LOS PUNTOS MOSTRADOS EN LA TABLA 14 DE LAS VELOCIDADES EN LOS CAMBIOS DE DIRECCIÓN.

Fuente: Elaboración propia.

Nota: La velocidad máxima (0,27 m/s) se da en la abscisa 3,11 ubicada cerca del centro del floculador de la primera cámara, la velocidad mínima (0,11 m/s) se da en el punto a la salida del flujo como se muestra en la figura 17. El promedio de velocidad obtenido fue de 0,20 m/s en los 6 puntos.

Una vez obtenidas las velocidades en los 6 puntos en el centro del floculador y teniendo como datos los mostrados en la tabla 15, se procedió al cálculo de los otros parámetros del floculador que fueron obtenidos en el diseño convencional para después ser comparados. Entre los parámetros analizados se encuentran: área, radios hidráulicos, tiempo de retención, pérdidas de carga y los gradientes de velocidad.

Punto	Velocidad calculada (m/s)	Radio hidráulico (m)	Área (m ²)
a	0,11	0,13	0,14
b	0,24	0,09	0,06
c	0,16	0,11	0,09
d	0,27	0,08	0,05
e	0,17	0,10	0,09
f	0,22	0,09	0,07
Promedio	0,20	0,10	0,08

TABLA 21: LOS RESULTADOS PRESENTES CORRESPONDEN A EL ÁREA Y RADIO HIDRÁULICO DE LA SECCIÓN DEL FLUJO PROYECTADO PARA LA PRIMERA CÁMARA SEGÚN LA VELOCIDAD CALCULADA EN EL CENTRO DEL FLOCULADOR.

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Estos resultados fueron obtenidos mediante la formulación establecida en el diseño convencional, siendo necesarios para el cálculo de pérdidas y gradiente de velocidad.

Punto	Velocidad calculada (m/s)	Tiempo de retención (min)
a	0,11	6
b	0,24	3
c	0,16	4
d	0,27	2
e	0,17	4
f	0,22	3
Promedio	0,20	4

TABLA 22: LOS RESULTADOS PRESENTES CORRESPONDEN AL TIEMPO DE RETENCIÓN PROYECTADO PARA LA PRIMERA CÁMARA SEGÚN LA VELOCIDAD CALCULADA EN EL CENTRO DEL FLOCULADOR.

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Para obtener el tiempo de retención se tomó como datos la velocidad en los 6 puntos de la simulación en el centro del floculador y la longitud de recorrido para la primera cámara dado en la tabla 11, dividiendo la longitud de recorrido para las velocidades.

Punto	Velocidad calculada (m/s)	Pérdida por fricción	Pérdida por conversión y por cambio de dirección	Pérdida total
		h_f (m)	$(h_c + h_t)$ total (m)	H (m)
a	0,11	0,001	0,020	0,021
b	0,24	0,009	0,096	0,105
c	0,16	0,003	0,043	0,045
d	0,27	0,013	0,126	0,139
e	0,17	0,003	0,049	0,052
f	0,22	0,007	0,084	0,092
Promedio	0,20	0,006	0,070	0,076

TABLA 23: LOS RESULTADO PRESENTES CORRESPONDEN A LAS PÉRDIDAS DE FRICCIÓN, PERDIDAS POR CONVERSIÓN Y CAMBIO DE DIRECCIÓN Y POR ÚLTIMO LA PÉRDIDA TOTAL SIENDO LA SUMA DE LAS DOS ANTERIORES, PROYECTADOS PARA LA PRIMERA CÁMARA SEGÚN LA VELOCIDAD CALCULADA EN EL CENTRO DEL FLOCULADOR.

Fuente: Elaboración propia.

Nota: El cálculo de la pérdida total fue necesario para obtener el gradiente de velocidad.

Punto	Abscisas (m)*	Gradiente (s^{-1})
a	0,23	22,23
b	1,19	72,48
c	2,15	38,88
d	3,11	89,43
e	4,07	43,05
f	5,50	65,62
	Promedio	55,28

*La abscisa cero corresponde a la salida de la cámara

TABLA 24: LOS RESULTADOS PRESENTES CORRESPONDEN AL GRADIENTE DE VELOCIDAD OBTENIDOS A PARTIR DE LOS 6 PUNTOS DE LA SIMULACIÓN Y MEDIANTE LA FORMULACIÓN PERTINENTE.

Fuente: Elaboración propia.

Nota: El rango de los gradientes va de $22,23-89,43 s^{-1}$, teniendo el mayor gradiente en el punto d de la figura 20 y el menor gradiente a la salida del flujo en el punto a. El gradiente de velocidad es un dato importante que debe ser tomado en cuenta en el diseño de un floculador ya que existen criterios de autores que establecen rangos para garantizar el correcto funcionamiento de un floculador.

Puntos establecidos en el centro del floculador para el gradiente

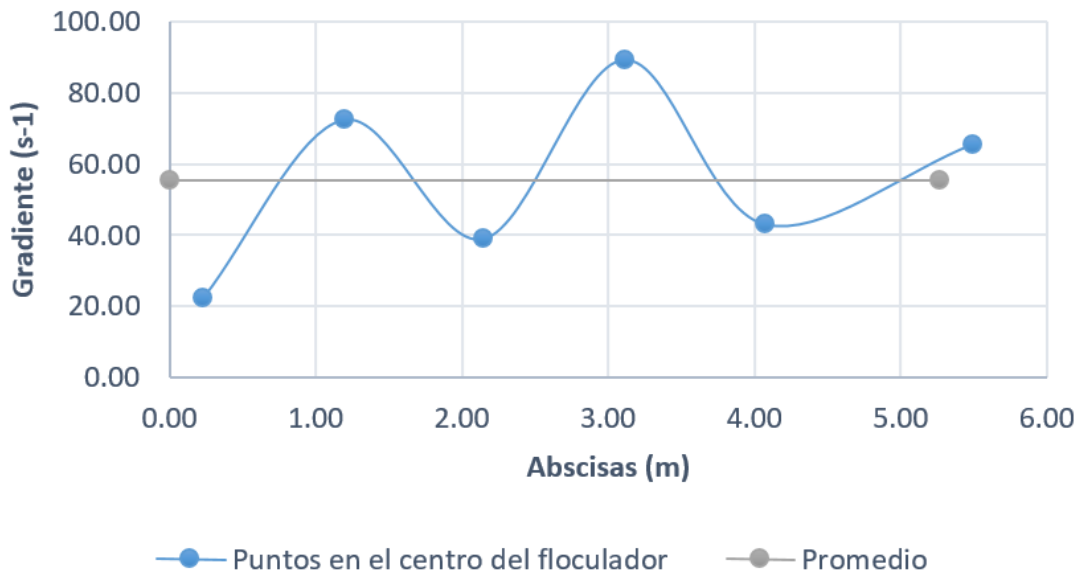


FIGURA 23: REPRESENTACIÓN DE LOS PUNTOS MOSTRADOS EN LA TABLA 24 DE LOS GRADIENTES EN EL CENTRO DE LA PRIMERA CÁMARA DEL FLOCULADOR.

Fuente: Elaboración propia.

Nota: El gradiente máximo ($89,43 \text{ s}^{-1}$) se da en la abscisa 3,11 m, el gradiente mínimo ($22,23 \text{ s}^{-1}$) se da en la abscisa 0,23 m. El promedio de gradientes obtenido fue de $55,28 \text{ s}^{-1}$ en los 6 puntos del eje en el centro del floculador.

6.1. ESTUDIO COMPARATIVO

Para realizar el estudio comparativo se tomó en cuenta varios criterios empezando por los datos de entrada que se muestran en la tabla 2. Estos datos de entrada sirvieron tanto para el cálculo del diseño convencional como para la modelación numérica, sin embargo, para el diseño convencional se utilizó el coeficiente de Manning de 0,012 para los cálculos correspondientes, mientras que para la modelación numérica el dato de entrada en el software es la rugosidad absoluta de 0,0035 debido a aproximaciones al número de Manning usado en el diseño convencional, esto se explica en la sección 5.3.3.

Se comparó todos los parámetros obtenidos en la sección 6.1 en el diseño convencional con los que se obtuvieron en la simulación numérica teniendo la velocidad como dato que sirvió para el cálculo de los parámetros en la primera cámara como es, el tiempo de retención, velocidades, áreas, radio hidráulico y gradientes de velocidad.

Los resultados obtenidos se encuentran a continuación:

	Velocidades (m/s)		
	Diseño Convencional	Modelación Numérica	Variación respecto al diseño convencional
Cambio de Dirección	0,23	0,22	0,01
Centro del Floculador		0,20	0,03

TABLA 25: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LA VELOCIDAD OBTENIDOS EN EL DISEÑO CONVENCIONAL Y EN LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.

Fuente: Elaboración propia.

Nota: La velocidad en la primera cámara es igual a 0,23 m/s, las velocidades obtenidas en la modelación numérica en los cambios de dirección y en el centro del floculador se calcularon obteniendo el promedio de seis puntos con resultados de 0,22 m/s y 0,20 m/s respectivamente. Las variaciones respecto al diseño convencional fueron de 0,01 m/s en los puntos de cambio de dirección y de 0,03 m/s en el centro del floculador. Las velocidades localizadas en todo el floculador son muy variables, por este motivo se tiene variación en los resultados.

	Gradientes de velocidad (s^{-1})		
	Diseño Convencional	Modelación Numérica	Variación respecto al diseño convencional
Cambio de Dirección	67,57	66,47	1,10
Centro del Floculador		55,28	12,29

TABLA 26: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL GRADIENTE DE VELOCIDAD OBTENIDOS EN EL DISEÑO CONVENCIONAL Y EN LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.

Fuente: Elaboración propia.

Nota: El gradiente de velocidad se calculó a partir de las velocidades obtenidas en la modelación numérica, es por esto la variación en los resultados que en el caso de los cambios de dirección varía 1,1 s^{-1} y en el centro del floculador la diferencia es de 12,29 s^{-1} .

	Radio hidráulico (m)		
	Diseño Convencional	Modelación Numérica	Variación respecto al diseño convencional
Cambio de Dirección	0,09	0,09	0,00
Centro del Floculador		0,10	0,01

TABLA 27: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL RADIO HIDRÁULICO OBTENIDOS EN EL DISEÑO CONVENCIONAL Y EN LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.

Fuente: Elaboración propia.

Nota: La variación de resultados del radio hidráulico en el diseño convencional y en la modelación numérica son despreciables.

	Pérdida total (m)		
	Diseño Convencional	Modelación Numérica	Variación respecto al diseño convencional
Cambio de Dirección	0,095	0,095	0,000
Centro del Floculador		0,076	0,019

TABLA 28: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LAS PÉRDIDAS TOTALES OBTENIDOS EN EL DISEÑO CONVENCIONAL Y EN LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.

Fuente: Elaboración propia.

Nota: La pérdida total en el diseño convencional varía en 0,019 m con relación a la pérdida calculada en la simulación numérica en el centro del floculador. No se detectan variaciones en el cálculo de la pérdida total en los cambios de dirección.

	Área de la sección del flujo (m ²)		
	Diseño Convencional	Modelación Numérica	Variación respecto al diseño convencional
Cambio de Dirección	0,07	0,07	0,00
Centro del Floculador		0,08	0,01

TABLA 29: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL ÁREA DE LA SECCIÓN DEL FLUJO OBTENIDOS EN EL DISEÑO CONVENCIONAL Y EN LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Al usar la velocidad obtenida en la simulación numérica en el centro del floculador la variación en el área de la sección del flujo es de 0,01 m², es decir que el modelo debería hacerse para un área mayor con esa diferencia. Con la velocidad obtenida en la modelación numérica en los cambios de dirección no hay variación en el área de la sección del flujo.

Tiempo de retención (min)		
Diseño Convencional	Modelación Numérica	Variación respecto al diseño convencional
3,00	3,15*	0,15
	3,83**	0,83

*Tiempo de retención establecido con la velocidad calculada en los cambios de dirección

**Tiempo de retención establecido con la velocidad calculada en la zona central del floculador

TABLA 30: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL TIEMPO DE RETENCIÓN OBTENIDOS EN EL DISEÑO CONVENCIONAL Y EN LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Con las velocidades obtenidas en la modelación numérica se calculó los tiempos de retención a ser considerados en el floculador. La diferencia de tiempo de retención que existe en los cambios de dirección es de 0,15 minutos y en el centro del floculador de 0,83 minutos. Estas

son las variaciones que se tendrían que considerar si diseñamos con las velocidades obtenidas en la simulación numérica.

En la Tabla 25, 26, 27 28, 29, 30 se observan todos los parámetros comparados del diseño convencional y de la simulación numérica. Las velocidades, gradientes, radio hidráulico, área, pérdida total y tiempo de retención varían más en los puntos del centro del floculador que en los puntos en los cambios de dirección con respecto a los resultados obtenidos en el diseño convencional.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

En el presente trabajo de titulación se realizó un estudio comparativo entre la metodología de diseño convencional y la evaluación por modelación numérica para un floculador de tabiques de flujo horizontal teniendo como caso de estudio al floculador horizontal ubicado en la planta de tratamiento de la “Central Termoelectrica El Descanso”.

Se ha realizado un diseño convencional para un floculador horizontal de tabiques de tres cámaras según las metodologías y criterios técnicos para dimensionamiento de este tipo de obras. De esta manera, con base al diseño convencional se verificó aspectos relacionados con dimensiones, pérdidas hidráulicas, capacidad del floculador, geometría, entre otros.

A través del estudio se implementó el modelo numérico OpenFOAM en consideración al estudio de caso seleccionado. Es importante indicar que como fuera establecido en el alcance del estudio, el modelo se implementó para la primera cámara del floculador, debido a requerimientos de tiempo computacional, capacidad computacional e información disponible.

Finalmente se realizó un estudio comparativo de los resultados mediante el análisis de los resultados obtenidos con base al diseño convencional y de los resultados y otra información adicional sobre campos de flujo obtenidos en la modelación numérica.

Con respecto al estudio convencional se indica que:

- La velocidad promedio establecida fue de 0,23 m/s para la primera cámara, 0,18 m/s para la segunda cámara y 0,17 m/s para la tercera cámara.
- Los gradientes de velocidad establecidos fueron de $67,56 s^{-1}$ para la primera cámara, $46,76 s^{-1}$ para la segunda cámara y $42,27 s^{-1}$ para la tercera cámara.
- El tiempo de retención adoptado (pruebas de jarras preliminares) fue de 3 min para la primera cámara, 11 minutos para la segunda cámara y 9 minutos para la tercera cámara.

Por otro lado, para la modelación numérica se definieron dos ejes de análisis. Un eje que contempla los cambios de dirección en los tabiques y un eje que contempla la zona central del floculador. En cada uno de estos ejes se identificaron 6 puntos para calcular las velocidades de flujo arrojadas por el modelo. Cabe señalar que estos puntos se encuentran a una profundidad de 0,0584 metros dado que a esa profundidad se estableció la velocidad media que caracterizaría de mejor manera el flujo del floculador.

De acuerdo a los ejes indicados, en la modelación numérica se ha determinado:

- Una velocidad promedio de 0,22 m/s en el eje de los cambios de dirección y 0,20 m/s en el eje de la zona central.
- Un gradiente promedio de $66,47 \text{ s}^{-1}$ en el eje de los cambios de dirección y $55,28 \text{ s}^{-1}$ en el eje de la zona central.
- Un tiempo de retención, con la velocidad medida en el eje de cambio de dirección, de 3,15 minutos; mientras que, con la velocidad medida en el eje de la zona central, el tiempo de retención fue de 3,83 minutos.

Si se considera la velocidad que fue adoptada para el diseño convencional (0,23 m/s) y las velocidades promedio obtenidas para los ejes de análisis en el modelo numérico se estableció que:

- La velocidad de diseño convencional es mayor que la velocidad en los cambios de dirección del modelo numérico. Sin embargo, es importante señalar que en los puntos de estudio que se encuentran a la salida del floculador el modelo devolvió velocidades de 0,24 m/s y 0,30 m/s.
- La velocidad de diseño convencional es mayor que la velocidad promedio establecida en el eje central del floculador según el modelo numérico. Sin embargo, se identificó dos secciones del eje central que presenta velocidades mayores que la velocidad en el diseño. Los valores obtenidos para la velocidad del diseño convencional y las velocidades medias de las diferentes secciones presentan variaciones de 1% en el eje de cambios de dirección y de 3% en el eje de la zona central.
- Con base a los resultados de velocidades arrojados por el modelo, y las variaciones respecto a la velocidad de diseño, se podría indicar que, la velocidad que fuera adoptada para el caso de estudio, de acuerdo a la metodología y los criterios técnicos de la literatura técnica, sería adecuadamente conservador.

Si se considera el gradiente hidráulico que fue adoptado para el diseño convencional ($67,57 \text{ s}^{-1}$) y los gradientes promedio obtenidos para los ejes de análisis en el modelo numérico se establece que:

- El gradiente de velocidad del diseño convencional es mayor que el gradiente de velocidad en los cambios de dirección del modelo numérico. Sin embargo, es importante señalar que en los puntos de estudio que se encuentran a la salida del floculador el modelo devolvió gradientes de $74,82 \text{ s}^{-1}$ y $100,74 \text{ s}^{-1}$.
- El gradiente de velocidad del diseño convencional es mayor que el gradiente medio establecido en el eje central del floculador según el modelo numérico. Sin embargo, se identificó dos secciones del eje central que presentan gradientes de velocidad mayores que el gradiente de velocidad en el diseño convencional, el uno de $89,43 \text{ s}^{-1}$ y el otro de $72,48 \text{ s}^{-1}$.
- Los resultados obtenidos para el gradiente del diseño convencional y para el gradiente de velocidades medio de las diferentes secciones, presentan variaciones de $1,10 \text{ s}^{-1}$ en el eje de cambios de dirección y de $12,29 \text{ s}^{-1}$ en el eje de la zona central.
- Con base al análisis comparativo de gradientes de velocidad, se podría indicar que, para el diseño convencional, de acuerdo a la metodología y los criterios técnicos de la literatura tradicional, se ha establecido un gradiente de velocidad representativo para el proceso de floculación.

Si se considera el radio hidráulico y el área de la sección del flujo que fue adoptado para el diseño convencional y el radio hidráulico y el área de la sección del flujo obtenidos para los ejes de análisis en el modelo numérico se establece que las variaciones de resultados son despreciables,

lo cual implica que los parámetros de flujo adoptados para el caso de estudio, y relacionados con calado, distribución teórica de velocidades, y geometría de la sección, son adecuados.

Con relación a la pérdida total de energía de flujo que fuera adoptada para el diseño convencional, la modelación establece una ligera diferencia con el valor obtenido en el eje de la zona central del floculador. Este hecho se debe a que, como ya se señaló previamente, la velocidad promedio en dicho eje es menor que la velocidad media adoptada para el diseño convencional.

Con respecto a los tiempos de retención, debido a la variación en las velocidades obtenidas en la simulación numérica, los tiempos proyectados varían con respecto a los tiempos de retención del caso de estudio. Para los ejes de análisis en el modelo numérico se establece que:

- El tiempo de retención del diseño convencional es menor que los tiempos de retención en los ejes de análisis. Esto debido a que, en ambos casos, las velocidades promedio son menores a las del diseño convencional.

De acuerdo a la modelación numérica se observa que en los ejes de análisis de cambio de dirección y central existe un incremento de velocidad en los extremos de entrada y de salida, por lo cual se concluye que en el diseño convencional se debería considerar un espaciamiento variado no uniforme de los tabiques.

7.2. RECOMENDACIONES

Con base a las conclusiones establecidas en el presente estudio, considerando tanto los resultados del diseño convencional, así como los resultados encontrados mediante la modelación numérica se recomienda lo siguiente:

- Para el floculador hidráulico horizontal de la planta de tratamiento de la Central Termoeléctrica El Descanso se recomienda entre otros los siguientes aspectos: 1) Evaluar el proceso de formación de flocs con los tiempos de retención establecidos en la modelación numérica para la primera cámara. 2) Así mismo, se recomienda evaluar los tiempos de retención en la segunda y tercera cámara, debido a que la configuración geométrica que presenta el floculador no está acorde a la recomendación técnica dirigida a lograr un aumento paulatino de los tiempos de retención. 3) Evaluar el desarrollo y mantenimiento de flocs para las condiciones y los gradientes hidráulicos establecidos en la modelación numérica.
- Para complementar la simulación numérica del floculador hidráulico horizontal de la planta de tratamiento de la Central Termoeléctrica El Descanso se recomienda entre otros los siguientes aspectos: 1) Analizar detalladamente los factores del flujo de agua mediante el programa de post-procesamiento, revisando los puntos de mayor interés ya que de esta manera se podrá obtener información detallada de interés. 2) Continuar el proceso de simulación numérica para la primera y segunda cámara. 3) Formular una propuesta de modelación complementaria que contemple mayores plazos de ejecución para proceder con análisis de escenarios y simulación de mayor alcance, proceso que demanda considerables recursos computacionales y tiempo. Se recomienda potenciar el clúster de la Universidad de Cuenca para minimizar tiempos de simulación numérica. 4) Usar distintos softwares de modelación que simplifiquen el trabajo de generación de la malla del proyecto, como en este caso, una herramienta de ayuda para la generación de la malla fue AutoCAD.

- Considerando que además de los floculadores hidráulicos horizontales, son de interés técnico los floculadores hidráulicos de flujo vertical, se recomienda realizar un estudio similar para los procesos de flujo en este tipo de obras.
- Se recomienda hacer un estudio complementario con base a la modelación numérica para optimizar el diseño del floculador.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, G., & Azevedo, J. (1976). *MANUAL DE HIDRAULICA*. HARLA.
- Arboleda, J. (2000). *Teoría y Práctica de la Purificación de la Agua*. Bogotá: Interamericana de Colombia.
- Arocha, S. (2011). *Acueducto: Fundamentos Teórico-Prácticos*. Venezuela: OIKOS IMPRESOS, C.A.
- Camp, T. (1955). *Flocculation and flocculation basins*. ASCE, vol. 120.
- Chow, V. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. Bogota: McGraw-Hill.
- ELECAUSTRO. (2019). *ElecAustro energía para la vida*. Obtenido de <https://www.elecaustro.gob.ec/centrales-y-represas/central-termica-el-descanso/>
- Endesa, S. A. (Julio de 2002). *Endesa, Centrales Térmicas*. Obtenido de http://www.endesa.com/es/conoceendesa/lineasnegocio/Electricidad/Centrales_termoel%C3%A9ctricas
- Fernández, J. (2012). *Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos*. Barcelona: Editorial Reverté.
- Guapán, G. (2015). *Plan de desarrollo y organización territorial*. Guapán.
- Izquierdo Flores, A. M. (2015). DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DEL COAGULANTE SULFATO DE ALUMINIO APLICADO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA “EL DESCANSO”. *TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE*. Cuenca, Azuay, Ecuador.
- Jorge, A. (2000). *Teoría y Práctica de la Purificación de la Agua*. Bogotá: Interamericana de Colombia.
- Núñez, Á. (2014). “DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE EN LAS COMUNIDADES PICHÁN CENTRAL, CHOCAVÍ CHICO Y CHOCAVÍ CENTRAL DE LA PARROQUIA SAN ISIDRO DE PATULÚ”. *Tesis de grado*. Riobamba, Ecuador.
- OpenCDF. (2021). *OpenFOAM*. Obtenido de <https://www.openfoam.com/>
- Pacheco, E., & Carrillo, V. (2021). *Coagulación-Floculación: Consideraciones técnicas para diseño hidráulico*. Notas de Clase, Universidad de Cuenca: Cuenca.
- Pacheco, E., & Carrillo, V. (2021). *Diseño de Pequeñas Plantas de Agua Potable: Diseño hidráulico de obras principales*. Notas de Clase, Universidad de Cuenca: Cuenca.

- Romero Rojas, J. A. (1999). *Potabilización del agua*. México: Alfaomega grupo editor.
- SALOME-Platform. (2005). *SALOME*. Obtenido de <https://www.salome-platform.org/>
- Snel, H., & Arboleda Valencia, J. (1982). *Influencia de la escala de turbulencia en el proceso de floculación del agua*. Bogotá: Separata de la revista ACODAL.
- TeKippe, R. J., & Ham, R. K. (1971). *Velocity-gradient paths in coagulation*. Journal AWWA.
- Vázquez, J. (2004). La ecuación de Navier-Stokes. Un reto físico-matemáticos para el siglo XXI. *Monografías de la Real Academia de Ciencias de Zaragoza.*, 31-56.
- Vergaray, G., & Méndez, C. (1994). Eficacia de un programa para proteger la calidad del agua proveniente de plantas de tratamiento. *Revista Peruana de Epidemiología*, 5-11.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2008). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. Pearson.
- Villegas, R., & Letterman, R. (1976). *Optimizing flocculator power input*. Journal of the Environmental Engineering Division.
- Xamán, J., & Gijón-Rivera, M. (2015). *Dinámica de fluidos computacional para ingenieros*. Bloomington: Liberty Drive.
- Yolanda, A. (2000). *Tratamiento de Agua Coagulación y Floculación*. Lima: SEDAPAL.

ANEXOS

APÉNDICE A

SIMULACIÓN SOFTWARE OPENFOAM

1) Directorio 0

En este directorio se crean los archivos correspondientes a las condiciones iniciales del modelo que se esté realizando cuando el tiempo ($t=0$), entre las variables por definir se encuentra el caudal, velocidad, presión, rugosidad, energía turbulenta y otras variables. Se crearán nuevas carpetas en los diferentes intervalos de tiempo en las cuales se tendrá condiciones de velocidad, presión, etc., en los diferentes tiempos de la simulación. Dentro del directorio 0 se crean seis archivos los cuales serán detallados a continuación:

- **alpha.water.orig:** En este archivo se muestra la configuración utilizada para la fracción volumétrica que son las condiciones del agua configurando los límites del mallado para indicar en que puntos hay o no hay ingreso de agua. Dentro de este archivo las funciones que fueron tomadas en cuenta para el desarrollo del modelo del floculador horizontal a realizarse fueron (intel) `fixedValue=1` la cual indica la entrada de agua al sistema, `zeroGradient` indica que la variable actúa como un muro impermeable, `intelOutlet=0` indica que existe tanto ingreso como salida del aire. El detalle de la simulación del caso de estudio se muestra a continuación:

```

    object      alpha.water;
}
// ***** //

dimensions    [0 0 0 0 0 0];

internalField uniform 0;

boundaryField
{
    inlet1
    {
        type      fixedValue;
        value     uniform 1;
    }

    inlet2
    {
        type      zeroGradient;
    }

    concretewall
    {
        type      zeroGradient;
    }

    outlet
    {
        type      zeroGradient;
        value     uniform 0;
    }

    atmosphere
    {
        type      inletOutlet;
        inletValue uniform 0;
        value     uniform 0;
    }
}
// ***** //

```

FIGURA 24: VARIABLES QUE SE USARON EN EL SOFTWARE OPENFOAM DEL ARCHIVO ALPHA.WATER.ORIG.

Fuente: Elaboración propia.

- U: Este archivo corresponde a la velocidad, para la configuración lo que se realizó fue asignar el valor del caudal inicial que recorre por el modelo que se está realizando que es de 15L/s, al realizarse la simulación se determina automáticamente la velocidad mediante la ecuación de continuidad, la función a la cual se le asigna el valor del caudal es `flowRateInletVelocity` 0,015, las unidades en la que ingresa el caudal es en m^3/s . El detalle de la simulación del caso de estudio se muestra a continuación:

```

    object      U;
}
// * * * * * //

dimensions    [0 1 -1 0 0 0];

internalField  uniform (0 0 0);

boundaryField
{
    inlet1
    {
        type      flowRateInletVelocity;
        volumetricFlowRate constant 0.015;
    }

    inlet2
    {
        type      fixedValue;
        value     uniform (0 0 0);
    }

    concretewall
    {
        type      fixedValue;
        value     uniform (0 0 0);
    }

    atmosphere
    {
        type      pressureInletOutletVelocity;
        value     uniform (0 0 0);
    }

    outlet
    {
        type      inletOutlet;
        inletValue uniform (0 0 0);
        value     $internalField;
    }
}

```

FIGURA 25: VARIABLES QUE SE USARON EN EL SOFTWARE OPENFOAM DEL ARCHIVO U (VELOCIDAD).

Fuente: Elaboración propia.

- p_rgh: Este archivo corresponde a la configuración de la presión modificada, puesto que el modelo es un floculador horizontal la presión en la atmósfera será igual a cero, sin embargo, al tener un modelo con turbulencia se considera la mezcla del agua con aire por lo que se modifica la presión que actúa sobre las paredes del elemento. El detalle de la simulación del caso de estudio se muestra a continuación:

```

    object      p_rgh;
}
// ***** //

dimensions    [1 -1 -2 0 0 0];

internalField uniform 0;

boundaryField
{
    atmosphere
    {
        type      totalPressure;
        p0        uniform 0;
        U         U;
        phi       phi;
        rho       rho;
        psi       none;
        gamma     1;
        value     uniform 0;
    }
    outlet
    {
        type      zeroGradient;
    }
    ".*"
    {
        type      fixedFluxPressure;
        value     uniform 0;
    }
}
// ***** //

```

FIGURA 26: VARIABLES QUE SE USARON EN EL SOFTWARE OPENFOAM DEL ARCHIVO P_RGH.

Fuente: Elaboración- propia

- nut: Este archivo corresponde a la configuración de la viscosidad cinemática turbulenta, la cual representa la rugosidad en las paredes y el fondo del floculador, para la simulación se debe ingresar el valor de la rugosidad absoluta (ks) del material que en este caso es asbesto-cemento teniendo un ks de 0,0035. El detalle de la simulación del caso de estudio se muestra a continuación:

```

    object    nut;
}
// ***** //

dimensions  [0 2 -1 0 0 0];

internalField  uniform 0;

boundaryField
{
    concretewall
    {
        type            nutkRoughWallFunction;
        value            uniform 0;
        Ks                uniform 0.0035;
        Cs                uniform 0.5;
    }

    ".*"
    {
        type            calculated;
        value            uniform 0;
    }
}

// ***** //

```

FIGURA 27: VARIABLES QUE SE USARON EN EL SOFTWARE OPENFOAM DEL ARCHIVO NUT.

Fuente: Elaboración propia.

- k: Este archivo muestra la energía turbulenta, no se realizó ningún cambio ya que está determinado previamente mediante experimentación. El detalle de la simulación del caso de estudio se muestra a continuación:

```

    object    k;
}
// ***** //

dimensions  [0 2 -2 0 0 0];

internalField  uniform 0.0001;

boundaryField
{
    inlet1
    {
        type            fixedValue;
        intensity        0.05;
        value            $internalField;
    }

    concretewall
    {
        type            kqRWallFunction;
        value            $internalField;
    }

    ".*"
    {
        type            inletOutlet;
        inletValue        $internalField;
        value            $internalField;
    }
}

// ***** //

```

FIGURA 28: VARIABLES QUE SE USARON EN EL SOFTWARE OPENFOAM DEL ARCHIVO K.

Fuente: Elaboración propia.

- omega: Se muestra en este archivo la tasa específica de disipación viscosa, para esto se asigna este valor al punto de entrada como valor uniforme, y en las paredes y fondo con

la función omegaWallFunction. El detalle de la simulación del caso de estudio se muestra a continuación:

```

    object      omega;
}
// ***** //

dimensions    [0 0 -1 0 0 0];

internalField uniform 0.003;

boundaryField
{
    inlet1
    {
        type      fixedValue;
        value      $internalField;
    }

    concretewall
    {
        type      omegaWallFunction;
        value      $internalField;
    }

    ".*"
    {
        type      inletOutlet;
        inletValue $internalField;
        value      $internalField;
    }
}

// ***** //

```

FIGURA 29: VARIABLES QUE SE USARON EN EL SOFTWARE OPENFOAM DEL ARCHIVO OMEGA.

Fuente: Elaboración propia.

2) Directorio constant

En este directorio se crean archivos correspondientes a las constantes de la simulación como son los valores de la gravedad, criterios de turbulencia, transporte, se dispone además de un subdirectorio donde se define la geometría de la malla y las características físicas de los bordes. Dentro del directorio constant se dispone de tres archivos que son detallados a continuación:

- g: Este archivo corresponde a la gravedad, en donde el único valor a considerar es el de la gravedad el cual se debe asignar en el eje Z tomando como positivo hacia arriba.

	g
dimensions	[0 1 -2 0 0 0]
value	(0 0 -9.81)

TABLA 31: VARIABLES QUE SE USARON EN EL SOFTWARE OPENFOAM DEL ARCHIVO G.

Fuente: Elaboración propia.

- transportProperties: Corresponde a los parámetros de transporte para agua y aire, para este caso la temperatura a considerar del agua es 15°C y con presión igual a la atmosférica.

transportProperties		
phases	(wáter air)	
water	transportModel	Newtonian
	nu	[0 2 -1 0 0 0 0] 1.14e-06
	rho	[1 -3 0 0 0 0 0] 999.1026
intel1	transportModel	Newtonian
	Un	[0 2 -1 0 0 0 0] 1.48e-05
	rho	[1 -3 0 0 0 0 0] 1
sigma		[1 0 -2 0 0 0 0] 0.07

TABLA 32: VARIABLES QUE SE USARON EN EL SOFTWARE OPENFOAM DEL ARCHIVO TRANSPORTPROPERTIES.

Fuente: Elaboración propia.

- **turbulentProperties:** Se muestra las propiedades de turbulencia, este archivo funciona con el modelo k0megaSST mediante el método RASModel, para la configuración de este modelo no se realizó ningún cambio.

turbulentProperties		
simulationType	RAS	
RAS	RASModel	k0megaSST
	turbulence	on
	printCoeffs	on

TABLA 33: VARIABLES QUE SE USARON EN EL SOFTWARE OPENFOAM DEL ARCHIVO TURBULENTPROPERTIES.

Fuente: Elaboración propia.

3) Directorio system

En este directorio se encuentran todos los criterios necesarios para la solución del problema, se puede definir el volumen inicial de agua en caso de ser necesario, además se generan los algoritmos y funciones necesarias para la solución de las ecuaciones de gobierno del flujo definiendo el solver que se utilizará dentro de la simulación. Dentro del directorio se encuentran cuatro archivos que se detallaran a continuación:

- **controlDict:** Este archivo muestra el tiempo de duración de la simulación, el solver a utilizar que para este caso fue el interFoam, la precisión de los resultados y se controla el número de Courant que es el que asegura la convergencia de la simulación. Dentro de este archivo existen varias funciones que deben ser definidas según el modelo, el valor de deltaT dependerá del número de divisiones que se desee hacer en la simulación el cual se ha colocado 0,1, el writeInterval es definido según cada cuanto tiempo se quiera grabar un intervalo de la simulación que será 0,05 para tener resultados precisos sin alargar el tiempo de simulación. Estos valores dependen de la precisión que se quiera en los resultados. El detalle de la simulación del caso de estudio se muestra a continuación:

```

    object      controlDict;
}
// ***** //

application    interFoam;

startFrom      startTime;

startTime      188.3;

stopAt         endTime;

endTime        1000;

deltaT         0.1;

writeControl   adjustableRunTime;

writeInterval  0.05;

purgewrite     0;

writeFormat    ascii;

writePrecision 6;

writeCompression compressed;

timeFormat     general;

timePrecision  6;

runTimeModifiable yes;

adjustTimeStep yes;

maxCo          1;
maxAlphaCo     1;
maxDeltaT      1;
functions
{

```

FIGURA 30: VARIABLES QUE SE USARON EN EL SOFTWARE OPENFOAM DEL ARCHIVO CONTROL.DICT.

Fuente: Elaboración propia.

- **setFieldsDict:** En este archivo se encuentra el volumen inicial de agua que tendrá la geometría antes de iniciar la simulación, para este caso el volumen inicial de agua es:

```

    object      setFieldsDict;
}
// ***** //

defaultFieldValues
(
    volScalarFieldValue alpha.water 0
);

regions
(
    boxToCell
    {
        box (3.15 5.27 0) (3.15 5.75 0.146);
        fieldValues
        (
            volScalarFieldValue alpha.water 1
        );
    }
);

// ***** //

```

FIGURA 31: VARIABLES QUE SE USARON EN EL SOFTWARE OPENFOAM DEL ARCHIVO SETFIELDS.DICT.

Fuente: Elaboración propia.

- fvSolution y fvSchemes: Estos dos últimos archivos no fueron cambiados para ninguna función.