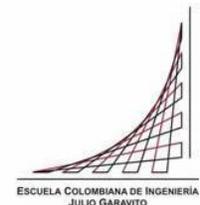


Maestría en Ingeniería Civil

**Modelación del flujo en 3D en el proceso de sedimentación primaria
para el tratamiento de aguas residuales domesticas utilizando
ANSYS-FLUENT**

Miguel Ángel Diaz García

Bogotá, D.C., 25 de octubre de 2022



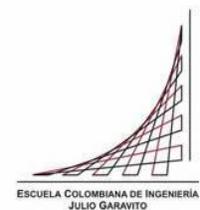
**Modelación del flujo en 3D en el proceso de sedimentación primaria
para el tratamiento de aguas residuales domesticas utilizando
ANSYS-FLUENT”**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con
énfasis en recursos hídricos y medio ambiente**

German Ricardo Santos Granados

Director

Bogotá, D.C., 25 de octubre de 2022



La tesis de maestría titulada “Modelación del flujo en 3D en el proceso de sedimentación primaria para el tratamiento de aguas residuales domesticas utilizando ANSYS-FLUENT”, presentada por Miguel Ángel Diaz García, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en recursos hidráulicos y medio ambiente.

Director de la tesis

Germán Ricardo Santos Granados

Codirector de la tesis

Liseth Enríquez Castillo

Jurado

Antonio Arenas Amado

Jurado

Andrés Humberto Otalora

Bogotá, D.C., martes 25 de octubre de 2022

A mi Madre y a mi Padre por
creer en mí, apoyarme e instarme al éxito cada día.

A Germán Santos por sus enseñanzas, paciencia e introducirme
en el área de la dinámica de fluidos computacional

Agradecimientos

Agradezco a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por brindarme las herramientas y espacios con los cuales logre acceder al conocimiento que me permite desempeñarme como profesional en la ingeniería de los recursos hidráulicos y medio ambiente.

De igual manera agradezco de manera especial al Doctor German Santos por permitirme hacer parte de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito; como estudiante y asistente graduado, oportunidad que me ha permitido sacar adelante este proyecto y me ha fortalecido como ingeniero, tanto a nivel personal como profesional.

También, a la Doctora Liseth Enríquez, le debo gratitud absoluta por ser esa voz de conocimiento, apoyo y experiencia incondicional que permitieron hacer posible este proyecto.

Finalmente, debo agradecer a las personas más importantes en mi vida; mi madre y mi padre, por su entrega, soporte y amor constante. A mi familia por el continuo apoyo y ánimo, con él cual fue posible obtener la motivación para hacer realidad este proyecto de ingeniería para optar al título de maestría.

Tabla de contenido

Capítulo 1. Contexto general de la investigación	16
1.1. Introducción	16
1.2. Alcances de la investigación	19
1.2.1. Objetivo general.....	19
1.2.2. Objetivos específicos	19
Capítulo 2. Marco teórico	20
2.1. Antecedentes.....	20
2.2. Bases teóricas	29
2.2.1. Aguas residuales domesticas	29
2.2.2. Teoría de la sedimentación.....	34
2.2.3. Diseño hidráulico de sedimentadores primarios.....	38
2.2.4. Resumen de parámetros de diseño de sedimentadores convencionales.	48
2.2.5. Modelación matemática de fluidos.	48
Capítulo 3. Descripción de la metodología	72
3.1. Modelación de la geometría.....	73
3.2. Mallado de la Geometría.....	73
3.3. Definición método de solución y modelos	76
3.4. Asignación y definición de las condiciones de frontera	79
3.5. Definición de los esquemas numéricos de solución del modelo	80
3.6. Asignación de los parámetros de inicialización	81
3.7. Simulación y monitoreo de la convergencia numérica.....	81
3.8. Verificación de los resultados de la simulación y análisis.....	83
3.9. Validación del modelo elaborado	83
Capítulo 4. Planteamiento del modelo del sedimentador primario	85
4.1. Dimensionamiento del sedimentador primario de estudio	85
4.1.1. Población y caudales de estudio.....	85
4.1.2. Lineamientos técnicos y normativos	90
4.1.3. Diseño del sedimentador primario.....	91
4.2. Modelación de la geometría del sedimentador primario	103
4.3. Discretización de la geometría (Mallado)	107
4.4. Configuración del modelo CFD del sedimentador primario	110

4.4.1.	Configuración del módulo Solver	111
4.4.2.	Selección y configuración de modelos	113
4.4.3.	Definición y configuración de las fases de la mezcla.....	117
4.4.4.	Condiciones de frontera del modelo.....	120
4.4.5.	Selección de los métodos de solución	126
4.4.6.	Configuración de los parámetros de inicialización.....	129
Capítulo 5.	Resultados.....	130
5.1.	Análisis de independencia	130
5.1.1.	Análisis Malla.....	130
5.1.2.	Análisis pasos de tiempo	134
5.2.	Resultados del modelo del clarificador secundario.....	137
5.2.1.	Patrones de flujo y perfiles de velocidad	138
5.2.2.	Eficiencia de sedimentación.....	142
5.2.3.	Energía cinética turbulenta	147
5.3.	Validación del modelo.....	149
5.4.	Identificación de los elementos de mejora y optimización del sedimentador	153
Capítulo 6.	Conclusiones y Recomendaciones	155
6.1.	Recomendaciones	158
Capítulo 7.	Bibliografía.....	159
Capítulo 8.	Anexos.....	164
8.1.	ANEXO I - Memoria de dimensionamiento Sedimentador.....	164
8.2.	ANEXO II - Datos entrada modelo	165
8.3.	ANEXO III - Resultados Modelación	166
8.4.	ANEXO IV - Plano estructura de sedimentación dimensionada	167

Listado de tablas

Tabla 1. Procesos de tratamiento de aguas residuales domésticas.	20
Tabla 2. Investigaciones desarrolladas a través de la modelación numérica con CFD.....	22
Tabla 3. Concentración de los sólidos en el agua residual doméstica.....	31
Tabla 4. Porcentaje de solidos presentes en el agua residual domestica (ARD) de acuerdo con su diámetro 33	
Tabla 5. Tipos de sedimentación en función de las características de las partículas.....	36
Tabla 6. Parámetros de diseño para sedimentadores primarios.....	38
Tabla 7. Parámetros de operación.	41
Tabla 8. Valores típicos para los parámetros de diseño de sedimentadores primarios.....	48
Tabla 9. Clasificación de los modelos de turbulencia.	51
Tabla 10. Modelos disponibles en el programa ANSYS FLUENT.....	51
Tabla 11. Categorías para los regímenes de flujo multifásico.	56
Tabla 12. Modelos multifásicos Eulerianos empleados por ANSYS FLUENT	57
Tabla 13. Clasificación de las representaciones discretas de la geometría o malla.....	74
Tabla 14. Métodos de modelación de flujo multifásico, turbulencia y energía.	78
Tabla 15. Métodos de solución y discretización espacial	80
Tabla 16. Población y caudales empleados para el dimensionamiento del sedimentador primario. 86	
Tabla 17. Análisis de concentraciones obtenidas con base en los monitoreos del agua residual cruda. 89	
Tabla 18. Eficiencias de tratamiento de las unidades del sistema.....	90
Tabla 19. Criterios de diseño para sistemas de sedimentación primaria.	91
Tabla 20. Parámetros de diseño sedimentador.....	91
Tabla 21. Parámetros de operación.	92
Tabla 22. Cargas hidráulicas para caudales máximos y mínimos en el sistema.....	93
Tabla 23. Parámetros de diseño vertederos de descarga.	96
Tabla 24. Características mallas generadas.	107
Tabla 25. Distribución granulométrica en el agua residual doméstica afluyente a un sedimentador primario. 114	
Tabla 26. Fracciones de volumen de las fases discretas	115
Tabla 27. Condiciones de frontera seleccionadas para el modelo.....	121

Tabla 28 . Tiempos de computo del modelo en función de la malla.	131
Tabla 29. Análisis de los resultados obtenidos para las mallas empleadas mediante error porcentual. 133	
Tabla 30. Análisis de los resultados obtenidos para las mallas empleadas mediante error porcentual (Desviación malla fina y gruesa respecto a la intermedia).	134
Tabla 24 . Análisis de los resultados obtenidos para los pasos de tiempo empleados mediante la desviación porcentual.....	137
Tabla 32. Fracciones de volumen para los diferentes diametros analizados de particulas	143
Tabla 33. Eficiencia de remocion para las fases particulada.	145
Tabla 34. Concentración afluyente sedimentador primario PTAR existente.	149
Tabla 35. Fracciones de volumen sedimentador diseñado y datos validación.....	150
Tabla 36. Fracciones de volumen sedimentador diseñado y datos validación.....	150
Tabla 37. Eficiencia de remoción para las fases particulada.	151
Tabla 38. Error porcentual del modelo de validación con respecto a los datos existentes.....	153
Tabla 39. Error porcentual del valor modelado con respecto al modelo de validación.....	153

Listado de figuras

Figura 1. Estudio del flujo en dos condiciones: 1) Una fase - 2) Dos fases.	27
Figura 2. Resultados de la modelación desarrollada en un sedimentador secundario.....	27
Figura 3. Fracción de volumen de las tres fases discretas que representan los sólidos suspendidos totales.	28
Figura 4. Componentes de la nueva configuración de sedimentador primario.....	29
Figura 5. Porción de soldados en el agua residual.....	30
Figura 6. Composición de las aguas residuales domésticas.	30
Figura 7. Composición de sólidos totales en el agua residual doméstica	32
Figura 8. Distribución de los sólidos en el agua residual por su tamaño	33
Figura 9. Configuración típica sedimentador circular primario de alimentación central.....	35
Figura 10. Configuración típica sedimentador circular primario de alimentación periférica	36
Figura 11. Esquema clarificador primario circular.....	40
Figura 12. Componentes mecánicos e hidráulicos de un sedimentador circular primario.....	40
Figura 13. Pasos de resolución para el algoritmo segregado basado en la presión.	66
Figura 14. Pasos de resolución para el algoritmo acoplado basado en la presión.....	67
Figura 15. Pasos metodológicos para la modelación del sedimentador primario.....	72
Figura 16. Malla con cuadriláteros estructurada.....	75
Figura 17. Malla con cuadriláteros no estructurada.	75
Figura 18. Malla híbrida triangular/cuadrilateral.....	75
Figura 19. Tipos de celdas para geometrías en tres dimensiones.....	76
Figura 20. Identidades geométricas de una celda Hexaédrica.	76
Figura 21. Algoritmo segregado aplicado a la simulación de un sedimentador primario.....	77
Figura 22. Condiciones de frontera aplicadas para la simulación del sedimentador primario. ...	79
Figura 23. Valores de inicialización asignados para la simulación del sedimentador primario. ...	81
Figura 24. Pasos para el monitoreo de la convergencia numérica.	82
Figura 25. Parámetros y elementos de análisis del modelo elaborado.	83
Figura 26. Pasos para la validación del modelo.	84
Figura 27. Diagrama de flujo del tratamiento que cuenta con la unidad de sedimentación primaria estudiada.	88
Figura 28. Diámetro efectivo del tanque sedimentador.	94
Figura 29. Altura útil y efectiva del sedimentador primario	95

Figura 30. Ubicación del vertedero perimetral del sedimentador primario	97
Figura 31. Dimensiones de la sección del vertedero.	98
Figura 32. Dimensiones de la sección de la tolva de lodos	101
Figura 33. Dimensiones de la sección de fondo del tanque	102
Figura 34. Estructura sedimentador primario	103
Figura 35. Región interior de flujo	103
Figura 36. Dimensiones región interior de flujo del sedimentador primario.....	103
Figura 37. Geometría desarrollada en DesignModeler del interior del sedimentador.....	104
Figura 38. Partes A y B de la geometría.....	105
Figura 39. Partes C y D de la geometría.	105
Figura 40. Partes E y F de la geometría.....	106
Figura 41. Mallas generadas para la modelación	109
Figura 42. Regiones de frontera para el modelo.	110
Figura 43. Geometría y malla cargadas cargada por el sistema de análisis Fluid Flow.	111
Figura 45. Configuración general del modelo.....	113
Figura 45. Configuración del modelo de interacción de partículas.....	115
Figura 46. Configuración del modelo de turbulencia	116
Figura 47. Configuración del modelo de energía.....	117
Figura 48. Configuración de los materiales del modelo (fase continua).....	118
Figura 49. Configuración de los materiales del modelo (fases discretas)	118
Figura 51. Configuración de la fase primaria.....	119
Figura 52. Configuración de la fase secundaria (Suprame).....	119
Figura 53. Configuración de la fase secundaria (Suprama).....	120
Figura 54. Configuración de la fase secundaria (Sedimentables).....	120
Figura 54. Configuración de las condiciones de frontera del modelo.....	123
Figura 55. Asignación de la tasa de disipación de la energía y la energía cinética turbulenta. 124	
Figura 56. Configuración de la velocidad y su componente vectorial.	124
Figura 57. Asignación de las fracciones de volumen en el inlet.....	124
Figura 58. Configuración del Outlet o salida.....	125
Figura 59. Configuración de la simetría superior	125
Figura 60. Configuración de las paredes.....	125
Figura 61. Configuración de los métodos de solución	127
Figura 62. Configuración de los coeficientes de relajación	128

Figura 63. Configuración de la inicialización de la solución.....	129
Figura 64. Perfil de velocidades en el rango ajustado	131
Figura 65. Fracción de volumen corte ZX, rango ajustado	132
Figura 66. Flujo másico para las mallas evaluadas.	133
Figura 67. Perfil de velocidades para time step de 2, 3 y 4 segundos en el rango ajustado	135
Figura 68. Fracción de volumen corte ZX, rango ajustado para los pasos de tiempo de 2,3 y 4 segundos.	135
Figura 69. Perfil de flujo región de entrada.	138
Figura 70. Perfil de flujo región de entrada.....	139
Figura 71. Patrón de flujo sección pantalla.....	139
Figura 72. Perfil de flujo en la tolva.	140
Figura 73. Líneas de corriente en las regiones extremas del tanque.....	141
Figura 74. Líneas de corriente en la región de salida.....	141
Figura 75. Patrones generales de flujo.....	142
Figura 76. Patrones de fracción de cada uno de los rangos de partículas evaluados.....	143
Figura 77. Patrones generales para las fracciones de volumen de 10, 50 y 80 μm	146
Figura 78. Energía cinética turbulenta y tasa de disipación de energía.....	148
Figura 79. Fracciones de volumen para el modelo de validación y el modelo del sedimentador diseñado en rango ajustado.....	152

Listado de gráficos

Gráfica 1. Fraccion de volumen particulas de 80 μm	108
Gráfica 2. Velocidad sobre el plano Y en la ventana de ingreso.....	140
Gráfica 3. Fraccion de volumen particulas de 80 μm	144
Gráfica 4. Fracción de volumen partículas de 10 μm	144
Gráfica 5. Eficiencia de remoción para los diámetros de partículas evaluados.....	145
Gráfica 6. Eficiencia de remoción para los sistemas analizados	152

Listado de anexos

8.1.	ANEXO I - Memoria de dimensionamiento Sedimentador.....	164
8.2.	ANEXO II - Datos entrada modelo	165
8.3.	ANEXO III - Resultados Modelación	166
8.4.	ANEXO IV - Plano estructura de sedimentación dimensionada	167

Resumen

Para el énfasis de los recursos hidráulicos y medio ambiente de la Maestría en Ingeniería Civil, es de gran importancia desarrollar estudios relacionados con las metodologías de modelación numérica de fluidos, por medio de herramientas de dinámica de fluidos computacional o por sus siglas en inglés CFD (computational dynamics fluids) como ANSYS-FLUENT, las cuales pueden ser aplicadas para diseñar, evaluar y optimizar las diferentes unidades que conforman los sistemas de tratamiento de agua residual, sin incurrir en altos costos de implementación y obteniendo resultados en un tiempo razonable. De esta manera se podrá garantizar una adecuada eficiencia de las unidades de tratamiento que se traducirá en la reducción del porcentaje de sólidos y nutrientes que se vierte a los cuerpos de agua superficial, y en la mitigación de los problemas de contaminación que actualmente afectan las fuentes de abastecimiento en las diferentes regiones del país.

Por lo anterior, en la presente investigación se empleó un modelo CFD para encontrar la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales (SST) en un sedimentador primario diseñado para el tratamiento de las aguas residuales de un municipio tipo de la región occidental de Colombia, empleando un enfoque euleriano y aplicando el modelo de mezcla integrado en el software ANSYS FLUENT (Mixture Model), un modelo multifásico simplificado con el cual se describió el comportamiento de las fases granulométricas del agua residual doméstica en el clarificador diseñado, encontrando que la eficiencia a la cual la unidad operara una vez construida se encuentra cercana al 50% en la remoción de sólidos suspendidos totales.

El modelo desarrollado permitió identificar los principales patrones de flujo generados en el sedimentador primario diseñado, su eficiencia, zonas de recirculación y re suspensión de partículas mediante la aplicación de la dinámica de fluidos computacional.

La modelación efectuada permitió determinar de forma aproximada y sin modelos físicos, el funcionamiento que tendrá una vez construido a escala real el sedimentador primario.

Como parte del estudio fue posible identificar cuáles son las variables de mayor importancia en el funcionamiento de la estructura por medio de su modelación numérica con ANSYS FLUENT, además de servir como elemento de guía para la modelación futura de unidades de sedimentación primaria durante la etapa de prefactibilidad y factibilidad de proyectos de saneamiento urbano y rural en Colombia.

Capítulo 1. Contexto general de la investigación

1.1. Introducción

En Colombia las aguas residuales no se manejan de forma adecuada, generando problemas sanitarios y ambientales en las poblaciones municipales.

De acuerdo con el estudio nacional del agua publicado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), en Colombia se realiza el tratamiento del 42.2% de las aguas residuales generadas (IDEAM, 2019), y del 31,4% de las plantas de tratamiento de agua residual existentes tan solo el 24% opera bajo las eficiencias y procesos adecuados para garantizar la remoción de la carga orgánica (Mendía & Pachón, 2016).

A nivel nacional, no existen sistemas de tratamiento de aguas residuales adecuados en muchos municipios, para gestionar de forma eficiente los efluentes generados por las poblaciones urbanas y rurales como lo describe en su estudio (Mendía & Pachón, 2016).

La contaminación de los cuerpos de agua superficial generada por vertimientos de agua residual sin tratamiento, además del aporte de sistemas de tratamiento inadecuados o mal administrados y operados, generan un problema sanitario de alta complejidad para la sociedad en Colombia (Comisión de regulación de saneamiento y agua potable (CRA), 2019).

De acuerdo con el Estudio Nacional del Agua (ENA) en Colombia se genera una carga de DBO de 1,134,084 toneladas al año, y de este valor se remueve el 42% por medio de sistemas de tratamiento, adicionalmente, la remoción de sólidos suspendidos totales es del 33% y de la carga total de fósforo y nitrógeno, apenas se remueve el 12% (IDEAM, 2019).

De los 1,122 municipios existentes en Colombia de acuerdo con el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2020), 1,101 son clasificados como municipios y 21 como áreas no municipalizadas. De estos 1,122, tan solo 352 cuentan con sistemas de tratamiento de aguas residuales (IDEAM, 2019).

Estas estadísticas demuestran que en Colombia existe una problemática con el manejo de las aguas residuales, lo que genera un deterioro de los recursos hídricos en el país.

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales existentes en Colombia presentan fallas debido a las limitaciones en la fase de diseño de las unidades, inadecuada elaboración de los estudios de tratabilidad de las aguas residuales o ausencia de dichos estudios, problemas de

eficiencia relacionados con la mala operación de las unidades de sedimentación primaria y de los sistemas de tratamiento preliminar. Estos problemas generan el vertimiento de efluentes sin el adecuado tratamiento a los cuerpos de agua superficial, generando elevadas cargas contaminantes en las fuentes hídricas, lo que genera problemas como la eutroficación, el crecimiento de organismos que deterioran la calidad de las fuentes de agua superficiales, dificultando la navegabilidad y procesos hidrodinámicos de los cuerpos hídricos (IDEAM, 2019).

De acuerdo con la problemática actual de vertimientos a nivel nacional, la implementación de las metodologías CFD para estudiar el comportamiento de los sedimentadores y la realización de nuevos diseños de estos sistemas, permite dar alternativas eficientes y confiables para depurar las aguas residuales generadas, evaluando la influencia de las variables existentes en el diseño y la operación de estos sistemas.

Existen diferentes elementos matemáticos para elaborar la modelación numérica de los fluidos en diferentes estructuras y condiciones físicas. En el mercado se ofrecen softwares como Flow 3D, OpenFoam, ANSYS-FLUENT, Star cmm+ y Autodesk CFD (Berrío, 2015), los cuales permiten resolver las ecuaciones de transporte y conservación de masa o continuidad, por medio de métodos de discretización. De estos softwares existentes el que presenta mayor soporte técnico, un entorno más simplificado de cálculo y acceso libre en alguna de sus versiones es el ANSYS-FLUENT. Este software además de que permite evaluar el comportamiento de los fluidos bajo diferentes condiciones, también incluye el ecuacionamiento necesario para modelar la interacción partículas - fluido que ocurre en las unidades de tratamiento preliminar, primario y secundario que constituyen los sistemas de tratamiento de aguas residuales. De esta manera, es posible mejorar el diseño y operación de las unidades de tratamiento, con el fin de optimizar su funcionamiento y garantizar una adecuada gestión de los vertimientos.

Teniendo en cuenta que la Escuela Colombiana De Ingeniería Julio Garavito cuenta con un convenio y soporte asistido por los desarrolladores del software ANSYS-FLUENT, en esta investigación se empleó esta herramienta para evaluar el comportamiento hidrodinámico de una unidad de sedimentación primaria convencional y su eficiencia en la reducción de sólidos suspendidos, todo esto con el fin de identificar si las estructuras convencionales son una solución adecuada para realizar el tratamiento primario del agua residual.

Para la estructuración del modelo del sedimentador primario evaluado se tomó como referencia una población y se efectuó el diseño geométrico e hidráulico de la unidad. Una vez obtenidas las

dimensiones, se configuro la geometría en tres dimensiones mediante los softwares Autodesk Civil3D y SpaceClaim.

Posteriormente se discretizo el volumen modelado el cual se considera como la región interna o región de flujo del sedimentador primario.

Para la simulación del escenario inicial se consideró una serie de submodelos, los cuales hacen parte de la configuración del programa, donde se destacan el modelo de mezcla, el modelo turbulencia y los parámetros iniciales para las condiciones de frontera.

Para la evaluación del modelo se consideró, emplear diferentes time step size y discretizaciones de la malla con el objetivo de generar un modelo que se ajuste en relación al tiempo computacional y el grado de acercamiento a los datos de validación del modelo. Los valores de validación del modelo se tomaron con base en otros estudios elaborados.

El modelo desarrollado considero una composición granulométrica de acuerdo con las características propias del agua residual doméstica, tomando como fuente de referencia las fracciones de volumen que componen la fase de sólidos, siendo los diámetros de 80 μm , 50 μm y 10 μm , los más representativos de la composición total en el agua residual como lo expone en su estudio (Enriquez, 2019).

El modelo de mezcla del software ANSYS FLUENT empleado, permiten efectuar un análisis de las fases del agua residual considerando las fracciones de volumen tomando como fases secundarias los tres diámetros de partículas analizados y como fase primaria el agua.

La eficiencia y el comportamiento hidrodinámico en el sedimentador primario dimensionado se evaluaron tomando las fracciones de volumen a la entrada y a la salida, una vez verificada la estabilidad y convergencia del modelo.

La fase predominante en las fases estudiadas, o el porcentaje predominante en la composición granulométrica de la mezcla son las partículas de 80 μm todo teniendo en cuenta que el agua residual entrante a los sistemas de sedimentación primaria ha sido tratada mediante unidades preliminares las cuales efectúan procesos mecánicos y físicos, enfocados en remover los sólidos de diámetros superiores a los 80 μm y no los diámetros más finos de partículas. Considerando lo anterior, el estudio se enfocó en describir los procesos hidrodinámicos que determinan la eficiencia en la remoción de las partículas, para finalmente proponer escenarios que pueden ser desarrollados en futuros estudios con la geometría diseñada, para incrementar la eficiencia en el proceso de sedimentación primaria.

1.2. Alcances de la investigación

1.2.1. Objetivo general

Realizar la evaluación del comportamiento hidrodinámico y la eficiencia de remoción de los sólidos suspendidos totales de un sedimentador primario convencional para el tratamiento del agua residual municipal, por medio del software ANSYS-FLUENT.

1.2.2. Objetivos específicos

- Identificar las variables más relevantes en el diseño de un sedimentador primario convencional, empleando la dinámica de fluidos computacional.
- Implementar un modelo CFD para un sedimentador primario convencional, empleando el submodelo de mezcla para estudiar la interacción de las fases granulométricas del agua residual doméstica.
- Evaluar el impacto que tiene el comportamiento hidrodinámico de un sedimentador primario convencional en la reducción de los sólidos suspendidos totales, empleando el submodelo k-épsilon estándar.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1. Antecedentes

Los procesos de tratamiento de aguas residuales han sido y son de gran importancia para la sociedad, puesto que del adecuado desarrollo de estos depende la salud pública de las poblaciones y la disponibilidad de agua para el abastecimiento.

En la actualidad existen diferentes procesos de tratamiento para llevar a cabo la remoción de las sustancias de interés sanitario presentes en el agua residual municipal. Sin embargo, su variación en la caracterización fisicoquímica y el nivel de contaminación hace que no exista un sistema de tratamiento típico para todos los tipos de aguas residuales. En Colombia se han implementado diferentes procesos de tratamiento de aguas residuales municipales, los cuales han sido agrupados en tres etapas o categorías, dependiendo del tipo de contaminante a remover del agua residual (Tabla 1) (Rodríguez, 1996), sin embargo, estos procesos se complementan entre sí para cumplir con los parámetros establecidos en el marco normativo nacional, que en el caso de Colombia se encuentran definidos en la Resolución 0631 de 2015 y el Reglamento Técnico ajustado por la Resolución 0330 de 2017. La combinación de estos procesos da lugar a lo que se denomina planta de tratamiento de agua residual.

Tabla 1. Procesos de tratamiento de aguas residuales domésticas.

Etapas	Procesos
Tratamiento Preliminar y Primario	Desbaste, Sedimentación, Flotación, Separación de aceites, Neutralización
Tratamiento Secundario	Lodos activados, Estabilización por contacto, Lagunas de estabilización, Lagunas de aireación, Filtros Percoladores, Reactores anaerobios, Zanjón de Oxidación
Tratamiento Terciario	Filtración, Cloración y ozonación, Procesos de Oxidación, Adsorción por carbón activado, Intercambio iónico y catiónico, Microfiltración

Fuente: (Rodríguez, 1996)

El análisis de un proceso de sedimentación primaria se lleva a cabo mediante la evaluación hidrodinámica de la unidad y considerando las variables físicas de las partículas o sólidos suspendidos presentes en el agua residual. Con la evaluación hidrodinámica se busca identificar las variables de mayor impacto en el proceso para optimizar su eficiencia mediante el ajuste de los criterios de diseño y operación de la unidad. (Davis, 2010).

Con respecto a este último aspecto, es importante que en las unidades de sedimentación se garanticen las velocidades de flujo mínimas para evitar la acumulación de sólidos en la tubería de entrada, adicionalmente, se deben promover condiciones de flujo favorables en su interior para evitar el transporte de los sólidos hacia el efluente del proceso, como lo describe en su investigación (Tebbutt, 1979).

En cuanto a los criterios de diseño de un sedimentador primario, el Reglamento Técnico (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017) y las metodologías convencionales recomiendan un rango ideal para las dimensiones y los parámetros hidráulicos de la unidad, tales como el tiempo de retención hidráulico y la carga hidráulica superficial.

La dinámica de fluidos computacional se ha empleado a nivel global para la modelación numérica de diferentes estructuras implementadas para realizar el tratamiento del agua residual, ya que esta herramienta permite evaluar el desempeño hidrodinámico de las unidades y de los procesos de sedimentación de partículas, brindando la posibilidad de analizar diferentes condiciones (Karpinska & Bridgeman, 2015).

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es utilizada en los diferentes segmentos de la ciencia y la industria. Permite simular procesos relacionados con las reacciones químicas, procesos de transferencia de calor, desarrollo del flujo en estructuras, entre otras aplicaciones.

La mecánica de fluidos y los métodos numéricos se suman para desarrollar a través de software métodos de resolución de las ecuaciones descritas, que representan el comportamiento de los fluidos. Puede ser utilizada en la fase conceptual de un proyecto para el diseño, ayudando a determinar la viabilidad y la mejor solución en la estructura de un sistema, permitiendo representar diversos escenarios (ESSS, 2016). Con las herramientas de la dinámica de fluidos computacional es posible:

- Simular difusión y convección de sustancias disueltas o suspendidas en los medios como aire y agua.
- Desarrollar la modelación y diseño de las estructuras hidráulicas para el control y tratamiento de las aguas residuales.
- Elaborar planificación y gestión de recursos hídricos.
- Estudio, análisis y simulación de la dispersión de sustancias en corrientes hídricas.
- Simular hidrodinámica y hemodinámica.

Para aplicar la modelación CFD a unidades de sedimentación primaria convencional es necesario conocer aspectos de diseño y operación como son la geometría de la unidad, el diseño de la estructura de entrada al sedimentador, la carga hidráulica superficial o tasa de desbordamiento, el tiempo hidráulico de retención, entre otros factores establecidos en la Resolución 0330, (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017).

En la Tabla 2 se presentan algunos de los estudios que autores como Tarpagkou & Pantokratoras (2012), Goula A. M., Kostoglou, Karapantsios, & Zouboulis (2008), han realizado mediante herramientas CFD, para realizar la evaluación de unidades de sedimentación implementados en el campo del tratamiento del agua residual.

Tabla 2. Investigaciones desarrolladas a través de la modelación numérica con CFD.

Autor	Año	Título publicación	Resumen
Larsen	1977	On the hydraulics of rectangular settling basins: Experimental and Theoretical Studies	La publicación se centra en describir las características hidráulicas de las estructuras rectangulares de sedimentación, efectuando la evaluación de experimentos y analizando las características desde la teoría de la sedimentación de partículas.
Adams and Rodi	1989	Modeling of flow an mixing in sedimentation tanks	Estudio basado en la implementación de un modelo de turbulencia k-e, ajustado a una geometría simple, para la simulación del flujo en el procesode sedimentación de aguas residuales.

Autor	Año	Titulo publicación	Resumen
Imam and McCorquodale	1983	Simulation of flow in rectangular clarifiers	El estudio se enfoca en realizar un análisis de como la estabilidad de los modelos de flujo en sedimentadores, es definida en función de la variación del tamaño de la malla, aplicando métodos de diferencias finitas para resolver la ecuación de cantidad de movimiento.
Stamou	1991	On the prediction of flow and mixing in settling tanks using a curvature K-ε model	Para el análisis del flujo en los sedimentadores circulares, el estudio empleo el modelo de turbulencia k-ε el cual es modificado para describir los efectos de las líneas medias de corriente de flujo en las secciones de curvatura en la geometría en los tanques de sedimentación.
Matko T, Fawcett N, Sharp A & Stephenson T	1996	Recent Progress in the Numerical Modelling of Wastewater Sedimentation Tanks	El estudio efectúa una recopilación del avance científico en la modelación numérica de sedimentadores en el tratamiento de aguas residuales.
Goula A, Kostoglou M, Karapantsios T & Zouboulis A	2008	A CFD methodology for the design of sedimentation tanks in potable water treatment. Case study: The influence of feed flow control baffle	La investigación se enfoca en emplear un modelo con una distribución de partículas dada para un tanque de sedimentación en la potabilización de agua, mediante herramientas CFD, analizando el comportamiento del flujo bajo la influencia de una pantalla deflectora en la sección de entrada al sedimentador.
Tarpagkou R. & Pantokratoras A.	2012	CFD methodology for sedimentation tanks: The effect of secondary phase on fluid phase using DPM coupled calculations.	El estudio se enfoca en realizar un modelo 3D con herramientas CFD, evaluando la interacción entre las fases continua y discreta del fluido, variando el tamaño de las partículas.

Autor	Año	Titulo publicación	Resumen
Karpinska & Bridgeman	2015	CFD-Aided Modelling of Activated Sludge Systems – A Critical Review	La investigación se enfoca en elaborar una simulación de la dinámica del flujo en un sistema de lodos activados, evaluado la eficiencia en los procesos de aireación. Se emplea la metodología CFD como herramienta para simular el comportamiento bajo diferentes escenarios de operación del sistema.
Liseth Enriquez Castillo	2019	Nueva configuración de un clarificador primario para el tratamiento de agua residual doméstica.	El estudio se enfoca en realizar un análisis del comportamiento hidrodinámico y la eficiencia de un sedimentador primario ubicado en la PTAR de Cañaveralejo, empleando herramientas CFD para analizar posibles mejoras en la eficiencia del proceso aplicando diferentes modificaciones a las estructuras de disipación de energía en la unidad, como los son los baffles o pantallas deflectoras del flujo. El estudio desarrolla un análisis mediante un modelo de mezcla multifásico, obtenido de un estudio de granulometría para el agua residual tratado por la PTAR.
Ganjare A & Patwardhan A	2019	CFD simulations of single-phase flow in settling tanks: comparison of turbulence models	El estudio emplea una modelación en tres dimensiones, configurando una sola fase para simular el comportamiento del flujo en sedimentadores rectangulares y circulares. Con la investigación se comparan los perfiles de velocidad y el comportamiento hidrodinámico en

Autor	Año	Titulo publicación	Resumen
			ambas estructuras. Se emplean modelo se turbulencia k-épsilon y k-omega.
Medina, M.E. Valle & Laurent, J.	2020	Incorporation of a compression term in a CFD model based on the mixture approach to simulate activated sludge sedimentation	El estudio desarrollado por los autores emplea el programa de dinámica de fluidos computacional OpenFOAM®, para crear una herramienta que permita predecir el comportamiento hidrodinámico y particular en una unidad de sedimentación secundaria en el proceso de tratamiento de agua residuales mediante lodos activados.

Fuente: (Larsen, 1977; Imam & McCorquodale, 1983; Adams & Rodi, 1990; Stamou A. I., 1991; Matko, Fawcett, Sharp, & Stephenson, 1996; Goula, Kostoglou, Karapantsios, & Zouboulis, 2008; Tarpagkou & Pantokratoras, 2012; Karpinska & Bridgeman, 2015; Enriquez, 2019; Ganjare & Patwardhan, 2019; Medina & Laurent, 2020).

Los primeros investigadores en emplear las herramientas CFD desarrolladas por ANSYS fueron Stamou, Theodoridis, & Xanthopoulos (2009), quienes plantearon un modelo numerico para el diseño de un sedimentador secundario implementado en la planta de tratamiento de aguas residuales de Psyttalia en Atenas, con el fin de evaluar la interacción entre las partículas y el fluido y la eficiencia de la unidad. El modelo se desarrollo considerando una estructura geométrica en dos dimensiones, y fue configurado con el módulo CFX de ANSYS, y el modelo de turbulencia k-ε.

La modelación de unidades de sedimentación ha sido estudiado mediante herramientas CFD por diferentes autores en la actualidad, autores como Medina & Laurent (2020), han estudiado el comportamiento hidrodinámico y la eficiencia en estructuras de sedimentación secundaria, estudiando la distribución de partículas en el agua residual proveniente de sistemas de tratamiento mediante lodos activados, evaluando el efecto de diferentes

variables como lo son las condiciones atmosféricas, el efecto de la densidad y el efecto de diferentes variables de diseño (Medina & Laurent, 2020)

Por otro lado, existen estudios centrados en evaluar el comportamiento de las fases de sólidos presentes en el agua residual en función de los diámetros de las partículas existentes de acuerdo con la granulometría y reología del afluente a las unidades de sedimentación (Hirom & Devi, 2022).

De igual forma se han evaluado diferentes modelos en estado no permanente en unidades de sedimentación primaria, empleando sub modelos para simular la floculación, las propiedades de las fases, las condiciones o variables de temperatura y el efecto del viento, los cuales son elementos integrados que permiten a los modelos computacionales ser más precisos y permiten avanzar rápidamente en el mejoramiento de los diseños y operación de estas unidades (Hirom & Devi, 2022).

En la actualidad autores como Deldar, Dehkordi, & Arani (2018), han evaluado mediante modelos de fases discretas o (Discrete Phase Model (DPM)), el comportamiento de diferentes fases integradas en el fluido, considerando una distribución de partículas específica (Deldar, Dehkordi, & Arani, 2018).

Como parte de la investigación los autores evalúan la ubicación de un baffle en la zona de entrada del flujo, para incrementar la eficiencia de remoción de partículas, encontrando que en las unidades de sedimentación primaria se alcanzan eficiencias cercanas al 100% para las partículas de un diámetro superior a los 50 μm (Deldar, Dehkordi, & Arani, 2018).

Para el caso de estudio Deldar, Dehkordi, & Arani (2018), estudiaron el caso particular del flujo mediante una condición de dos fases continuas y otro escenario evaluando una sola fase continua, encontrando que para concentraciones en la segunda fase menor a 0.2 kg/m^3 , la fase secundaria tiene una interferencia muy reducida en la condición y campo de flujo en la unidad de sedimentación (Deldar, Dehkordi, & Arani, 2018).

De acuerdo con lo anterior, para modelos de dos fases con una condición de concentración superior Deldar, Dehkordi, & Arani (2018), encontraron el comportamiento presentado en la (Figura 1) a continuación.

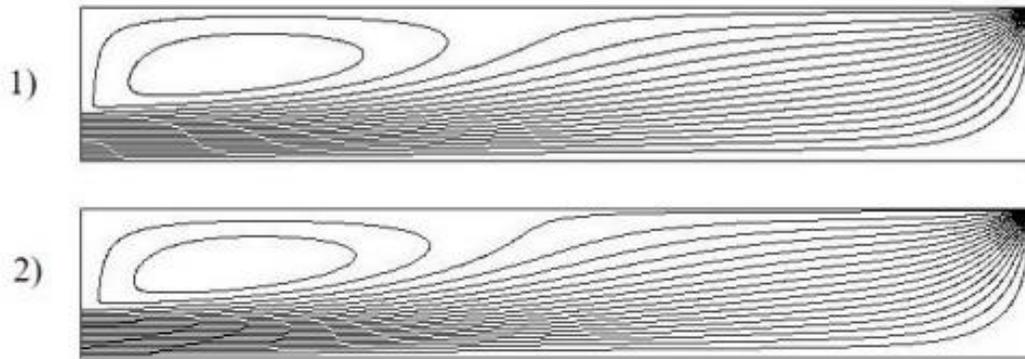


Figura 1. Estudio del flujo en dos condiciones: 1) Una fase - 2) Dos fases.

Fuente: (Deldar, Dehkordi, & Arani, 2018)

En Colombia recientemente se han desarrollado estudios para la modelación matemática de sistemas de sedimentación secundaria por medio de modelos de balance poblacional (PBM). Juan Carlos Berrío Betancourt, desarrollo la modelación de tanques de sedimentación circulares, con afluentes provenientes del proceso de lodos activados (Berrío, 2015). Para la modelación se empleó ANSYS-FLUENT y STAR-CMM+, analizando un escenario inicial para el tanque con una sola fase, y un segundo escenario con un fluido de dos fases. Como producto de la modelación numérica se obtiene un perfil de velocidades para la estructura, en el cual se presenta en la (Figura 2).

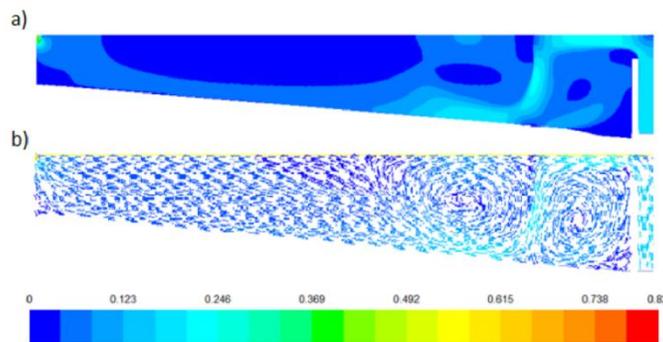


Figura 2. Resultados de la modelación desarrollada en un sedimentador secundario

a) Perfil de velocidad del agua b) Vectores de velocidad (m/s).

Fuente: (Berrío, 2015)

En la Figura 2 se pueden observar los movimientos circulares del flujo generados por un bafle ubicado en una zona cercana a la entrada del agua residual, el cual hace parte de la estructura que se acopla al barredor de lodos instalado en las estructuras de sedimentación convencionales. Este comportamiento hidrodinámico permite optimizar el proceso de

floculación y aglomeración de las partículas que se encuentran en esas zonas de recirculación.

Enriquez (2019) evaluó, a través de un modelo CFD y del software FLUENT, el sedimentador primario convencional implementado para realizar el tratamiento del agua residual afluyente a la planta de tratamiento de agua residual de Cañaveralejo (Cali-Colombia). La geometría del sedimentador primario fue construida en 3D e incluyó los componentes más relevantes para el funcionamiento de la unidad; El modelo fue configurado con el modelo de turbulencia k- ϵ y con el modelo multifásico de mezcla, el cual fue constituido por una fase continua y tres fases discretas, las cuales representarían la distribución del tamaño de partículas que normalmente se encuentra en el agua residual doméstica. Los resultados de la investigación (Figura 3) mostraron las limitaciones de diseño que presenta la unidad, pues al incluir un bafle en la zona central del sedimentador, se genera una zona de recirculación que repercute significativamente en su comportamiento hidrodinámico y en la sedimentación de las partículas, lo que finalmente se traduce en una reducción importante de la eficiencia del proceso.

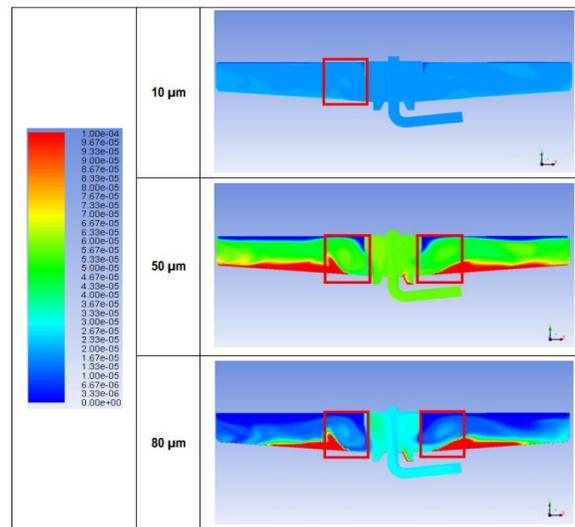


Figura 3. Fracción de volumen de las tres fases discretas que representan los sólidos suspendidos totales.

Fuente: (Enriquez, 2019)

A partir de las limitaciones identificadas en el sedimentador convencional, Enriquez (2019) utilizó la misma herramienta computacional para desarrollar una propuesta de diseño que permitiera optimizar la eficiencia del sedimentador, esta alternativa consistió en la inclusión

de una segunda pantalla deflectora que redujera significativamente el impacto del flujo en la zona cercana a la tolva de lodos mostrado en la (Figura 4).

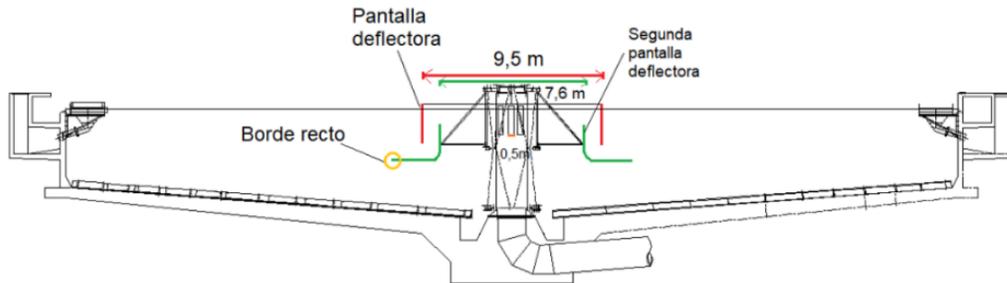


Figura 4. Componentes de la nueva configuración de sedimentador primario.

Fuente: **(Enriquez, 2019)**

Las metodologías CFD se utilizan ampliamente en Europa y América para el diseño y optimización de los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Como se muestra en los estudios desarrollados por diferentes investigadores, es posible probar el comportamiento de diferentes geometrías y condiciones de funcionamiento, permitiendo mejorar el proceso de diseño y operación de los sedimentadores primarios.

2.2. Bases teóricas

A continuación, se dará una descripción general de las principales características que posee el agua residual doméstica, al igual que los principios teóricos que rigen el proceso de sedimentación y de su modelación matemática, de acuerdo con los métodos numéricos propios del software ANSYS FLUENT.

2.2.1. Aguas residuales domesticas

El agua residual doméstica es un fluido que se caracteriza por tener una composición con un 99.9% de agua y un 0,1% compuesto por sólidos orgánicos e inorgánicos suspendidos y disueltos, además de microorganismos (Sperling, 2007).

De acuerdo con la definición de Sperling (2007), en el porcentaje donde se encuentran los sólidos está presente la contaminación, representada por materia orgánica e inorgánica. En la Figura 5, presentada a continuación se puede observar de forma esquemática la fracción de agua y sólidos en el agua residual doméstica.

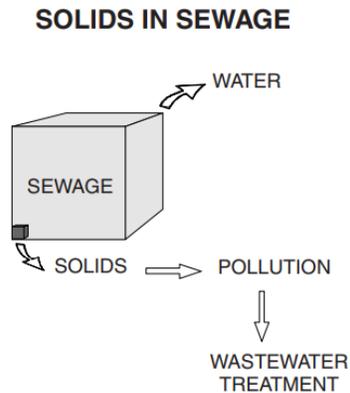


Figura 5. Porción de soldados en el agua residual.

Fuente: **(Sperling, 2007)**

Los sólidos presentes en el agua residual en forma de materia orgánica e inorgánica están constituidos por sustancias como carbohidratos, fosforo, nitrógeno, lípidos, proteínas y microorganismos y por arena, sales metales, detergentes y sustancias medicinales.

En la Figura 6 a continuación se presenta en resumen los principales compuestos constituyentes de las aguas residuales de acuerdo con Tebbutt (1979) y Enriquez (2019).

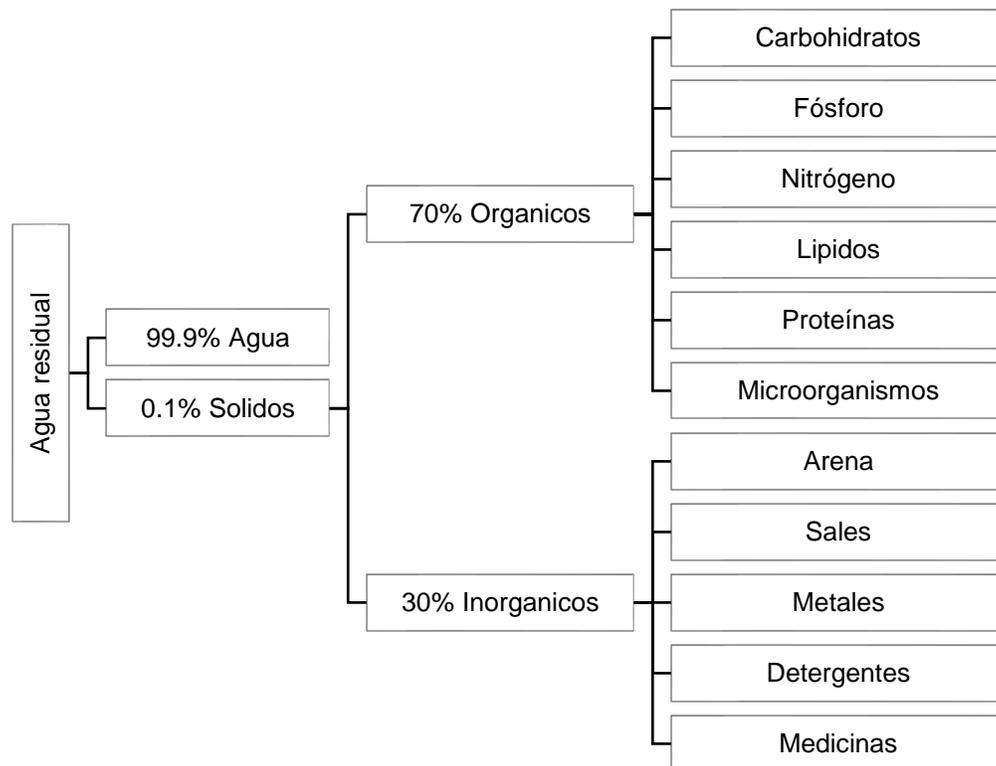


Figura 6. Composición de las aguas residuales domésticas.

Fuente: (Tebbutt, 1979; Enriquez, 2019)

Del contenido considerado como sólidos en el agua residual doméstica de acuerdo con lo descrito anteriormente, se puede definir dicha fracción; como la materia remanente después de someter el fluido a una temperatura de 103°C (Jordão, 2005). Es de gran importancia tener en cuenta que los sólidos están compuestos por partículas que son denominadas como sedimentables, suspendidas y disueltas, los últimos dos, a su vez se caracterizan en fijos y volátiles (Jordão, 2005).

Como tal las características del agua residual doméstica varían en función de la región en la cual sea generada, dependiendo de las dinámicas socio económicas de la zona de estudio y los usos dados al agua (Sperling, 2007).

Teniendo en cuenta lo anterior, el agua residual doméstica se clasifica en diferentes grupos en función de la concentración presente en su caracterización fisicoquímica (Tabla 3).

Tabla 3. Concentración de los sólidos en el agua residual doméstica

Parámetro	Concentración		
	Débil (mg/L)	Media (mg/L)	Fuerte (mg/L)
Sólidos totales	370	730	1160
Sólidos Suspendidos Totales	120	230	360
Sólidos Suspendidos Volátiles	90	175	280
Sólidos Suspendidos Fijos	30	55	80
Sólidos Disueltos Totales	250	500	800
Sólidos Disueltos Volátiles	105	200	300
Sólidos Disueltos Fijos	145	300	500
Sólidos Sedimentables	5	10	20

Fuente: (Jordão, 2005).

La materia sólida presente en el agua residual que durante un tiempo de entre 1 a 2 horas se decanta, es conocida como sedimentable y es una característica que permite determinar que

concentración de los sólidos puede ser removida mediante este proceso. Por otro lado, están los sólidos que en un rango de tiempo de 2 horas no tienden a ser decantadas, por lo que se les denomina como no sedimentables (Jordão, 2005).

Los sólidos también se clasifican de acuerdo con Jordão (2005), en función de una característica propia denominada capacidad de filtración, la cual determina mediante la filtración de una muestra de agua residual domestica a través de una membrana de fibra de vidrio con un tamaño de poro de 1.2 μm , la fracción de partículas que pasan por el filtro y las que no pasan (Jordão, 2005). En la Figura 7, se presenta la composición de estos dos grupos de acuerdo con lo expuesto por Sperling (2007), Mendonça (2000) y Enriquez (2019).

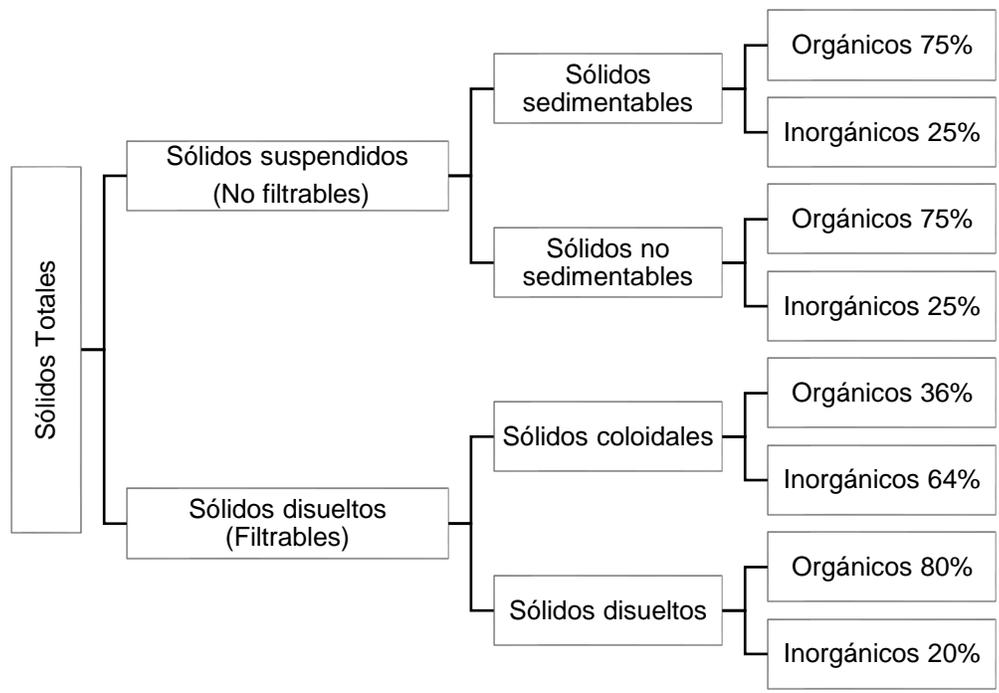


Figura 7. Composición de sólidos totales en el agua residual doméstica
Fuente: (Mendonça, 2000; Sperling, 2007; Enriquez, 2019)

En las aguas residuales domésticas, también se considera de gran importante la clasificación de los sólidos en función del diámetro de las partículas. Las partículas de diámetros más pequeños se caracterizan dentro del grupo de solidos disueltos, mientras que las de diámetros superiores son caracterizadas dentro del grupo de los sólidos suspendidos (Sperling, 2007). En la Figura 8, presentada a continuación se muestra la distribución de los sólidos de acuerdo con su diámetro.

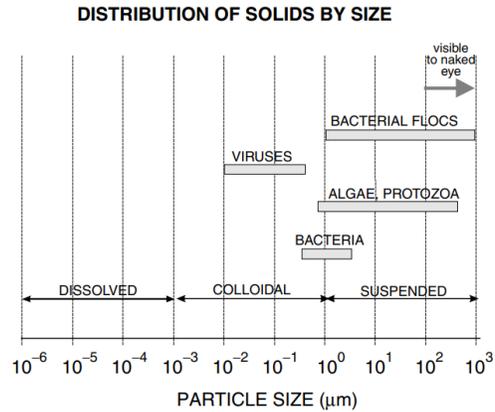


Figura 8. Distribución de los sólidos en el agua residual por su tamaño
Fuente: (Sperling, 2007)

Como se presenta en la Figura 8, existe un rango de partículas ubicado entre las suspendidas y las disueltas las cuales son denominadas como coloidales. Estas partículas coloidales se caracterizan por tener diámetros entre los 0.001 µm y hasta los 1 µm, mientras que los disueltos se presentan en diámetros inferiores a los 0.001 µm y los suspendidos en diámetros superiores a 1 µm.

De acuerdo con lo descrito por autores como Enriquez (2019), los porcentajes correspondientes a cada uno de los sólidos existentes en el agua residual domestica se presentan en la tabla continuación (Tabla 4).

Tabla 4. Porcentaje de solidos presentes en el agua residual domestica (ARD) de acuerdo con su diámetro

Descripción	Clasificación			
	Disueltos	Coloidales	Supracoloidales	Sedimentables
Tamaño de partícula (µm)	<0.001	0.001 - 1	1 - 100	>100
Porcentajes presentes en el ARD (%)	41 - 64	7 - 16	12 - 28	15 - 17

Fuente: Adoptado de Enriquez (2019)

Las partículas que son predominantes en el agua residual doméstica o presentes en mayor porcentaje son las contenidas en los sólidos disueltos, como lo expone Sperling (2007).

2.2.2. Teoría de la sedimentación

Como parte de los procesos unitarios empleados en el tratamiento de las aguas residuales, existe un proceso que es de vital importancia en la remoción de sólidos orgánicos e inorgánicos contenidos en el agua residual, en el cual se remueven principalmente sólidos suspendidos sedimentables (Romero R. J., 1999). De acuerdo con lo anterior; la operación mediante la cual se separan las partículas contenidas en una suspensión empleando las fuerzas gravitacionales es conocida bajo el nombre de clarificación, sedimentación o espesamiento (Romero R. J., 1999).

La sedimentación, también es llevada a cabo mediante la adición de compuestos floculantes los cuales permiten incrementar el peso molecular de las partículas y su velocidad de decantación, favoreciendo su separación en una suspensión (Romero R. J., 2013).

El proceso de sedimentación ocurre de diferentes formas en función de las características de los sólidos, de acuerdo con su grado de floculación y concentración (Romero R. J., 1999). Como tal las partículas contenidas en una suspensión pueden presentar características homogéneas en relación con su tamaño, peso o forma cuando se someten a la sedimentación, lo anterior les brinda la característica de ser denominadas partículas discretas (Romero R. J., 1999).

Se pueden encontrar, otro tipo de partículas denominadas como precipitantes o floculentas, las cuales varían su volumen y densidad cuando se adhieren con otras por medio de mecanismos como lo son; el arrastre, la precipitación, el barrido o la floculación (Romero R. J., 1999).

De acuerdo con Romero R. J. (1999), la existencia de distintos tipos de partículas con concentraciones diferentes, genera la necesidad de contemplar diferentes formas de sedimentación, por lo que, en la operación de sedimentación pueden considerarse cuatro tipos los cuales son conocidos como; sedimentación discreta o no floculenta (Tipo 1), floculenta (Tipo 2), zonal y por compresión (Romero R. J., 1999).

De acuerdo con Romero R. J. (2013), la operación de sedimentación puede ser empleada con tres funciones, como único tratamiento de las aguas residuales, como un sistema de tratamiento previo a los procesos secundarios o como un sistema de tratamiento que hace parte de los procesos secundarios y como tratamiento terciario para efectuar la remoción de sólidos floculados o precipitados químicamente, en plantas de tratamiento de aguas residuales (Romero R. J., 2013).

La sedimentación primaria se caracteriza por ser empleada como una operación que permite remover los sólidos suspendidos sedimentables, para que posteriormente el agua efluente pasa

a un proceso de tratamiento secundario mediante biomasa suspendida o fija. De acuerdo con lo anterior las unidades de sedimentación primaria pueden remover desde el 50% hasta el 70% de sólidos suspendidos y alrededor del 25% al 40% de demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) (Metcalf and Eddy, Inc., 2003).

Otros autores como Sonune & Ghate (2004), describen que las eficiencias de remoción de estas unidades de tratamiento pueden tener porcentajes de reducción de sólidos suspendidos totales (SST) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), de entre el 40% y el 70%, y el 25% al 50%, respectivamente (Sonune & Ghate, 2004).

En la actualidad las plantas de tratamiento de aguas residuales emplean tanques de sedimentación con elementos mecánicos utilizados para facilitar la operación de las unidades, estos sedimentadores pueden ser circulares o rectangulares (Metcalf and Eddy, Inc., 2003).

Las unidades de sedimentación primaria circulares se caracterizan por presentar patrones de flujo radiales, los cuales se generan mediante el direccionamiento del flujo por eje central de la estructura (Metcalf and Eddy, Inc., 2003).

La estructura de un sedimentador primario convencional tiene en la parte inferior una tolva que permite acumular los sólidos precipitados, junto con una salida de fondo que permite extraer los sólidos acumulados en el fondo de la estructura (Metcalf and Eddy, Inc., 2003). En las (Figura 9) y (Figura 10), a continuación, se muestran las configuraciones típicas de un sedimentador primario circular.

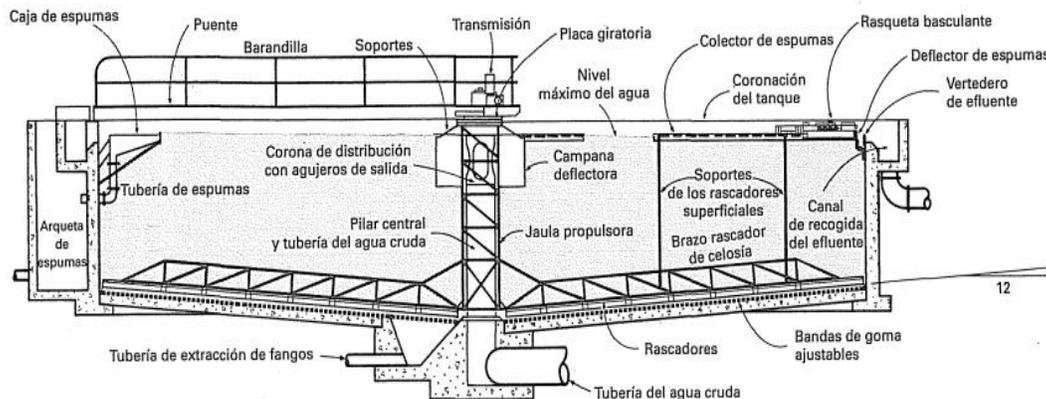


Figura 9. Configuración típica sedimentador circular primario de alimentación central
Fuente: (Metcalf and Eddy, Inc., 2003)

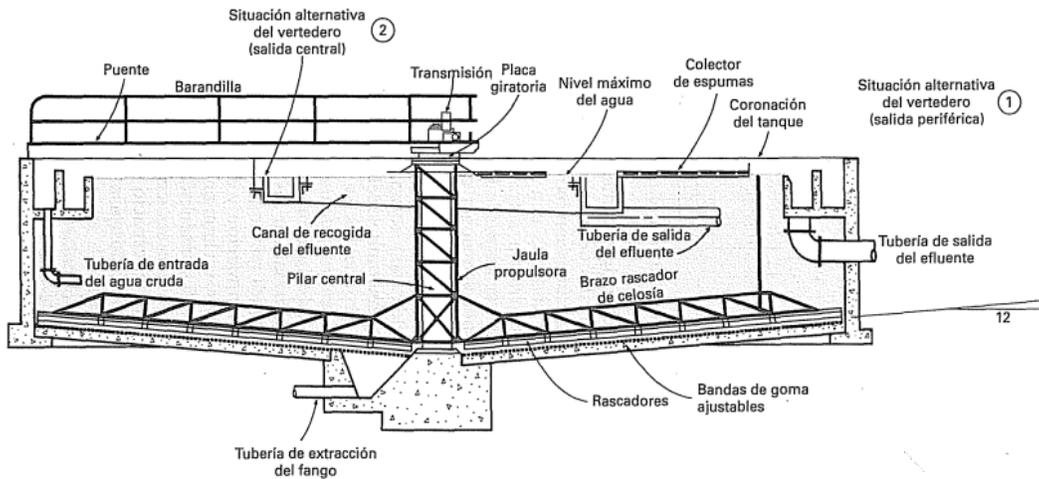


Figura 10. Configuración típica sedimentador circular primario de alimentación periférica
Fuente: (Metcalf and Eddy, Inc., 2003)

De acuerdo con autores como Romero R. J. (1999), Arboleda (2000) y Metcalf and Eddy, Inc. (2003), existen cuatro tipos de fenómenos de sedimentación, los cuales se identifican en función de las características de las partículas suspendidas presentes en el agua residual. De acuerdo con lo anterior en la Tabla 5 presenta dicha caracterización.

Tabla 5. Tipos de sedimentación en función de las características de las partículas

Tipo de sedimentación	Características de las partículas	Descripción del proceso
Partículas discretas (Tipo 1)	Suspensión con baja concentración de sólidos	No hay interacción entre las partículas ni con el resto del fluido. Las partículas sedimentan como entidades individuales.
Floculenta (Tipo 2)	Partículas aglomerables en suspensiones relativamente diluidas.	Las partículas se aglomeran, agrupándose para conformar un mayor tamaño. Al unirse sedimentan a mayor velocidad.
Retardada o zonal (Tipo 3)	Soluciones o suspensiones de concentración intermedia	Las partículas interfieren entre sí en su descenso manteniendo posiciones estables, la posición de estas permanece relativamente fija y sedimentan como una unidad.

<p>Compresión (Tipo 4)</p>	<p>Suspensiones con concentración suficiente para formar estructuras de partículas.</p>	<p>La sedimentación se genera producto de la compresión de la estructura conformada por las partículas. El efecto de compresión se genera por el peso de las partículas que se adhieren a la estructura.</p>
---------------------------------------	---	--

Fuente: (Arboleda, 2000); (Metcalf and Eddy, Inc., 2003)

De acuerdo con lo descrito por autores como Neis & Tiehm (1997) y Betancourt, Bürger, Diehl, & Faràs, 2014, el diámetro, tamaño, densidad e interacción entre las fases sólidas y líquidas en el agua residual determina la velocidad de decantación y por tanto la eficiencia del proceso de sedimentación. Como tal la concentración de sólidos en el afluente de los sedimentadores primarios no afecta el comportamiento hidrodinámico de las unidades, todo considerando que las concentraciones en suspensión no son de gran magnitud, por lo que las condiciones de esfuerzo cortante y resistencia al flujo no cambian de forma profunda las condiciones hidrodinámicas del agua (Neis & Tiehm, 1997); (Betancourt, Bürger, Diehl, & Faràs, 2014).

Para garantizar estas eficiencias es necesario evitar los efectos externos que generen interferencias en la sedimentación de las partículas en el interior de las estructuras, tales como la turbulencia en las zonas de entrada y salida del agua residual, las corrientes del viento o interferencias en el flujo, como las zonas de recirculación que pueden generar la reducción en la eficiencia del proceso.

Teniendo en cuenta lo anterior, diferentes investigadores han desarrollado estudios con los cuales ha sido posible efectuar la optimización del proceso de sedimentación de los sólidos contenidos en el agua. Entre las medidas empleadas para incrementar la eficiencia de las unidades de sedimentación se destacan las siguientes (Tsukamoto, 2002):

- Adición de coagulantes químicos que permiten generar un cambio en las cargas de las partículas, de tal manera que se genere la atracción entre las mismas, para que mediante una mezcla lenta en la estructura se incremente su diámetro y densidad, y de esta manera se pueda incrementar su velocidad de sedimentación.

- Optimización del diseño de las estructuras convencionales mediante la construcción de pantallas o placas que permitan reducir la turbulencia y velocidad del agua, de tal manera que se puedan minimizar las zonas de recirculación en el interior de las estructuras de sedimentación.

2.2.3. Diseño hidráulico de sedimentadores primarios

Para el dimensionamiento de una unidad de sedimentación primaria se deben tener en cuenta diferentes parámetros como la carga hidráulica, el caudal, la velocidad de ingreso a la estructura, el tiempo de retención y la geometría de la unidad. De acuerdo con el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2017), en Colombia se deben considerar diferentes parámetros para garantizar el adecuado funcionamiento de las unidades de sedimentación primaria. Con base en lo anterior se presentan en la Tabla 6 los parámetros de diseño más relevantes y establecidos con base en autores como Metcalf and Eddy, Inc. (2003), la Comisión Nacional del Agua - CONAGUA (2008) y Romero R. J. (2013).

Tabla 6. Parámetros de diseño para sedimentadores primarios.

Parámetro	Valor	Unidades
Tiempo de retención	1,5 – 2,5	h
Carga hidráulica Superficial caudal máximo horario	48 - 120	m ³ /m ² día
Carga hidráulica Superficial caudal medio diario	24 – 49	m ³ /m ² día
Pendiente de fondo	5 - 10	%
Diámetro	3 - 45	m
Profundidad	3 - 5	m

Fuente: Adoptado de Metcalf and Eddy, Inc. (2003), Romero R. J. (2013) y Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2017)

La estructura de las unidades de sedimentación primaria cuenta con dos zonas, denominadas de clarificación y de concentración o espesamiento (Voutchkov, 2017). En la primera zona sucede el proceso de sedimentación por efecto gravitacional y la segunda zona es la región de la unidad donde se acumula y concentran las partículas sedimentadas formando una capa densa de lodo (Voutchkov, 2017).

Los sedimentadores primarios circulares se caracterizan por tener flujos radiales, los cuales son generados por la ubicación perimetral de los vertederos de salida, ubicados en la parte superior de la unidad. El flujo es alimentado desde la región central de la estructura, donde ingresa el agua afluente mediante una tubería que recorre la geometría en dirección ascendente por la región central, hasta descargar el agua (Voutchkov, 2017).

En la zona de ingreso la unidad cuenta con un componente EDI, por sus siglas en inglés energy dissipating inlet, el cual se encarga de reducir la energía cinética con la cual ingresa el flujo a la unidad (Monroe Environmental, 2022).

Algunas estructuras cuentan con pantallas cilíndricas que direccionan el flujo, conocidas como feed well, las cuales buscan introducir y conducir el flujo con el menor grado de turbulencia posible a la zona de sedimentación. Estas pantallas usualmente son dimensionadas con un diámetro del 15% al 25% del diámetro de la unidad y se extienden desde el 30% hasta el 75% de la profundidad útil de la estructura (Voutchkov, 2017).

El fondo cónico de las unidades de sedimentación primaria cuenta con una pendiente la cual permite inducir el desplazamiento de los sólidos decantados hasta la tolva de acumulación y concentración de lodo. Las unidades típicas cuentan con relaciones de pendiente desde 1:10 hasta 1:12 y son construidas de acuerdo con el mecanismo de colección del lodo (Voutchkov, 2017).

En la parte más profunda las unidades poseen una tolva o hopper, la cual se encarga de acumular el lodo, para posteriormente ser extraído mediante una tubería de descarga ubicada en la zona más baja de la estructura (Monroe Environmental, 2022). Para el empuje de los sólidos decantados existe un mecanismo conocido como brazo mecánico barredor, el cual se encarga de empujar las partículas depositadas en el fondo hasta la tolva, conformando un manto de lodos (Voutchkov, 2017).

El agua sale de la estructura a través de un vertedero perimetral que la conduce hasta un canal de sección rectangular, el cual se conecta a una cámara de descarga, induciendo un flujo perimetral y homogéneo (Voutchkov, 2017). Los vertederos típicamente son de geometría triangular y se dimensionan en función del caudal de salida y el tirante hidráulico, con cargas hidráulicas menores a 190 m³/día por metro lineal de vertedero. (Voutchkov, 2017).

Las unidades de sedimentación primaria también suelen ser equipadas con un skimmer o desnatador, el cual se encarga de remover los sólidos flotantes que ingresan a las unidades y no son removidos mediante sedimentación. Estos equipos cuentan con un baffle deflector, el cual detiene los sólidos flotantes antes de pasar a través de los vertederos perimetrales, permitiendo que los flotantes sean captados por el desnatador el cual se desplaza en sentido radial de forma suave (Monroe Environmental, 2022).

En las Figuras 11 y 12 se observa la geometría más empleada en el diseño y construcción de las unidades de sedimentación circular primaria.

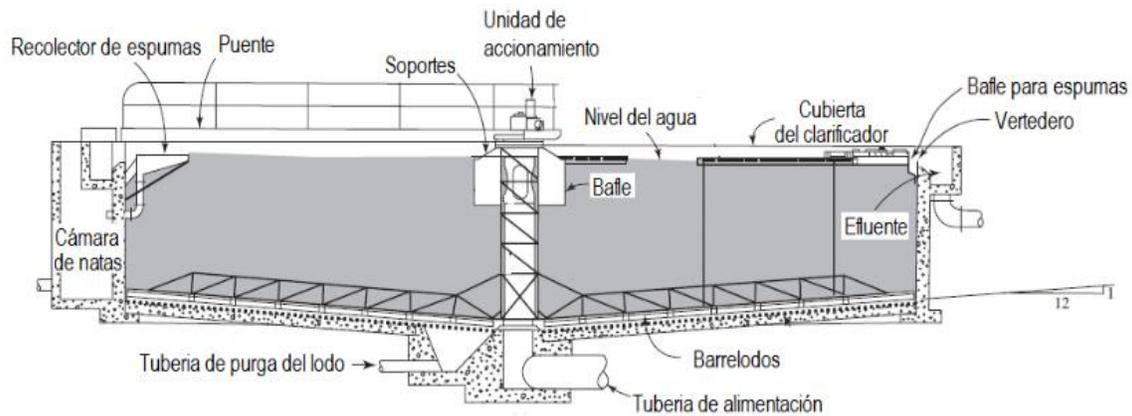


Figura 11. Esquema clarificador primario circular.
Fuente: (Davis, 2010)

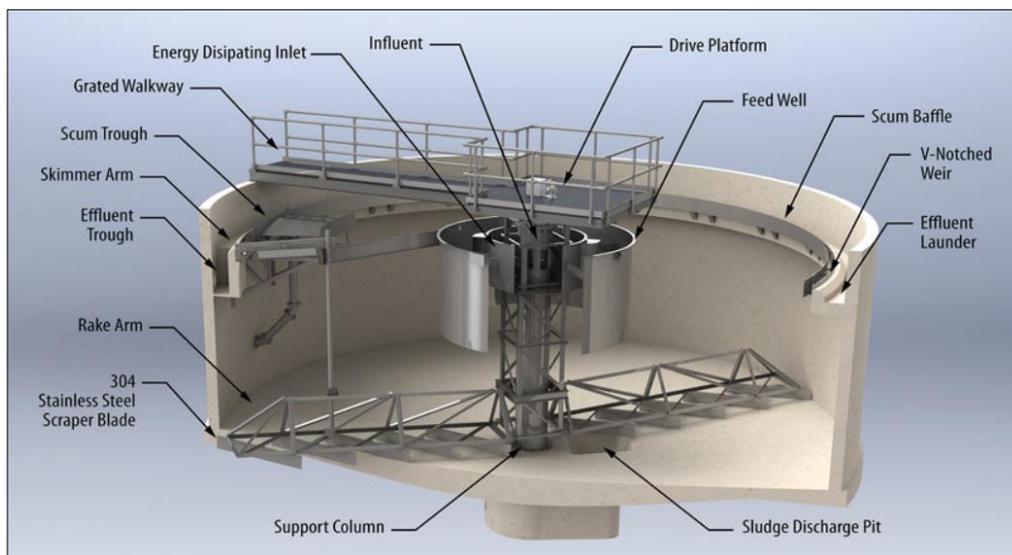


Figura 12. Componentes mecánicos e hidráulicos de un sedimentador circular primario.
Fuente: (Monroe Environmental, 2022).

2.2.3.1. Área superficial del sedimentador primario

El área superficial de las unidades de sedimentación primaria se calcula como el cociente entre el caudal y la carga hidráulica superficial (Ecuación 1) de diseño establecida según la Resolución 0330 (Tabla 7). Este criterio debe ser calculado para el caudal máximo horario y para el caudal medio diario. De acuerdo con lo anterior, se debe seleccionar el área superficial que permita cumplir con el mayor rango de tasas de desbordamiento, cumpliendo con el valor de diámetro, profundidad y con los tiempos de retención.

La importancia de los criterios anteriores radica en que permiten seleccionar el diámetro y la profundidad para que la unidad de sedimentación primaria tenga un adecuado funcionamiento de acuerdo con lo establecido por (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2017)).

$$A = \frac{Q}{CH}$$

Ecuación 1

Donde:

Q : Caudal de diseño unitario $\left(\frac{m^3}{d}\right)$

CH : Carga hidráulica superficial $\left(\frac{m^3}{m^2d}\right)$

Tabla 7. Parámetros de operación.

Parámetro	Caudal diseño	Carga hidráulica
	L/s	m ³ /m ² día
Caudal máximo horario unitario proyectado	QMH	80
		120
Caudal medio diario unitario proyectado	Qmd	30
		50

Fuente: (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017)

2.2.3.2. Diámetro del sedimentador primario

Para las unidades con una configuración circular, el diámetro se estima a partir de la ecuación del área de un círculo y se despeja la variable de interés como se presenta en la (Ecuación 2) (Comisión Nacional del Agua - CONAGUA, 2008).

$$\phi = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

Ecuación 2

Donde:

ϕ : Diámetro del sedimentador primario (m)

A : Área superficial del sedimentador primario (m²)

2.2.3.3. Volumen del sedimentador primario

El volumen útil de un sedimentador primario se estima de acuerdo con el tiempo de retención seleccionado de acuerdo con los criterios técnicos definidos por autores como Metcalf and Eddy, Inc. (2003), Romero R. J. (2013) y como lo establece el reglamento técnico de diseño.

El caudal es tomado de acuerdo con la estimación efectuada en función de la población a atender para el horizonte de diseño y la dotación de acuerdo con lo definido por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2017). En la (Ecuación 3) se presenta la expresión para su estimación.

$$V_{Uni} = Q \times TRH \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

Q : Caudal máximo horario $\left(\frac{m^3}{d}\right)$

TRH : Tiempo de retención hidráulico (horas)

2.2.3.1. Altura útil del sedimentador primario

La altura útil se define como la cota máxima de la lámina de agua en el sedimentador. Se calcula según la (Ecuación 4) como el cociente entre el volumen y el área superficial calculada. La altura útil debe ser la misma para el caudal máximo horario y el caudal medio diario (Comisión Nacional del Agua - CONAGUA, 2008).

$$h = \frac{V}{A} = \frac{Q \times TRH}{A} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

Q : Caudal máximo horario $\left(\frac{m^3}{d}\right)$

TRH : Tiempo de retención hidráulico (horas)

V : Volumen del sedimentador primario (m^3)

A : Área superficial del sedimentador primario (m^2)

2.2.3.2. Carga de rebose sobre el vertedero

La carga hidráulica sobre el vertedero se estima de acuerdo con la ecuación 5:

$$CV = \frac{Q}{\pi \phi} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

\emptyset : Diámetro del sedimentador primario (m)

Q : Caudal máximo horario $\left(\frac{m^3}{d}\right)$

El rango de la carga sobre el vertedero puede estar entre 48 a 240 m³/m d, de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua - CONAGUA (2008).

2.2.3.3. Longitud del vertedero

La longitud del vertedero se calcula en función del caudal máximo horario y la carga de rebose sobre el vertedero (Ecuación 6) la cual es adaptada de Romero R. J. (2013).

$$LV = \frac{Q}{CV} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

CV : Carga de rebose sobre el vertedero $\left(\frac{m^3}{m d}\right)$

Q : Caudal máximo horario $\left(\frac{m^3}{d}\right)$

2.2.3.4. Perímetro del sedimentador primario

Teniendo en cuenta que el sedimentador es circular, el perímetro se calculará con base en la (Ecuación 7), mediante el diámetro, de acuerdo como lo expone Romero R. J. (2013).

$$P_{Sed} = \pi \emptyset \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

\emptyset : Diámetro del sedimentador primario (m)

π : constante matemática adimensional

2.2.3.5. Diámetro tubería de entrada al sedimentador primario

La velocidad en la sección de entrada a la unidad de sedimentación primaria se recomienda sea como mínimo de 0,6 m/s de acuerdo con Comisión Nacional del Agua - CONAGUA (2008), con el objetivo de evitar la colmatación y sedimentación de sólidos en su interior. Con base en la velocidad mínima recomendada se utiliza la (Ecuación) 8 para calcular el diámetro de la sección de entrada al sedimentador.

$$D_{in} = \sqrt{\frac{Q \times 4}{\pi \times v}}$$

Ecuación 8

Donde:

D_{in} : diámetro tubería ingreso al tanque (m)

v : Velocidad de ingreso (m/s)

Q : Caudal máximo horario $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

2.2.3.6. Dimensionamiento vertederos de salida

Los vertederos de salida son de tipo triangular con apertura de 90°. Los parámetros para su dimensionamiento deben considerar las ecuaciones de descarga a través de vertederos triangulares de 90° y la geometría de la estructura hidráulica (Romero R. J., 2013). En la (Ecuación 9) se presenta la expresión para la estimación del tirante hidráulico dado en función del caudal que pasa a través del vertedero (Avila, 1994).

$$H = \left(\frac{\left(\frac{Q}{NV} \right)}{1.343} \right)^{\frac{1}{2.47}}$$

Ecuación 9

Donde:

H : Lámina de agua a través de un vertedero (m)

Q : Caudal máximo horario $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

NV : Numero de vertederos

2.2.3.7. Velocidad a través de la sección de los vertederos

La velocidad de flujo a través del área compuesta por los vertederos se recomienda tenga un valor de entre 0,1 a 0,3 m/s. Esta velocidad se puede estimar calculando el área total que suma la sección de todos los vertederos, de acuerdo con Comisión Nacional del Agua - CONAGUA (2008).

$$v_{SV} = \frac{Q}{A_{SV}}$$

Ecuación 10

Donde:

Q : caudal máximo horario $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

A_{SV} : área total sección del vertedero (m^2)

2.2.3.8. Canal de salida

El canal de salida perimetral del tanque sedimentador se encuentra ubicado en el diámetro exterior del tanque, posterior al perímetro de los vertederos triangulares (Romero R. J., 2013). Se recomienda la sección transversal debe como mínimo ser de dos veces la altura del canal de salida de acuerdo con Comisión Nacional del Agua - CONAGUA (2008). A continuación, se presentan las ecuaciones a tener en cuenta para la evaluación hidráulica del canal.

Caudal específico:

$$q = \frac{Q}{B} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

Q : caudal máximo horario ($\frac{m^3}{s}$)

B : ancho solera del canal (m)

Profundidad crítica

$$Y_c = \left(\frac{(q)^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

q : caudal máximo horario ($\frac{m^2}{s}$)

B : ancho del canal (m)

g : aceleración gravitacional ($\frac{m}{s^2}$)

Profundidad normal

Para estimar la lámina de agua se efectúa la iteración del valor de H teniendo en cuenta, los valores conocidos de caudal, solera del canal, pendiente y el coeficiente de rugosidad de acuerdo con el material del canal (Armijos, 2018).

$$Q = \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{(B \cdot H)^{\frac{5}{3}}}{(B+2H)^{\frac{2}{3}}} \right) \cdot S^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

n : número de Manning

B : ancho solera del canal (m)

H : lámina de agua en el canal (m)

s : pendiente del canal (m/m)

Q : caudal máximo horario $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

2.2.3.9. Dimensionamiento tolva de acumulación de lodos

La tolva se diseña de acuerdo con los parámetros definidos en el reglamento técnico de diseño establecido en la resolución 0330. Para el diseño se tiene en cuenta el diámetro de la tubería afluente al tanque y el espesor del muro de recubrimiento (Comisión Nacional del Agua - CONAGUA, 2008).

El diámetro menor de la tolva debe ser como mínimo dos veces el diámetro de la tubería más el espesor del muro de recubrimiento.

Diámetro menor

$$\phi_{min} = 2b + (D_{in} + e_{in})$$

Ecuación 14

Donde:

D_{in} : diámetro tubería de entrada (m)

e_{in} : espesor de recubrimiento de la tubería de entrada (m)

b : ancho del fondo de la tolva (m)

El ángulo de inclinación de la tolva de acuerdo con lo establecido en la resolución 0330 por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2017), debe garantizar una pendiente de mínimo el 5% y máximo el 10%.

Diámetro mayor

$$\phi_{mayor} = \left(\frac{H}{\tan(\alpha)} \times 2\right) + \phi_{min}$$

Ecuación 15

Donde:

H : altura de la tolva de lodos (m)

α : ángulo de la tolva de lodos (grados)

ϕ_{min} : diámetro mínimo de la tolva de lodos (m)

Profundidad recta del fondo

La profundidad recta medida desde el diámetro del tanque hasta el diámetro máximo de la tolva de lodos se estima en función de la inclinación de esta sección horizontal.

$$P_f = \tan(\beta) \times \left(\frac{\phi - \phi_{mayor}}{2} \right) \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

ϕ : diámetro del tanque sedimentador (m)

β : ángulo del fondo del tanque (grados)

ϕ_{max} : diámetro máximo de la tolva de lodos (m)

Volumen de la tolva

El volumen de la tolva de lodos se estima en función del volumen de la sección de ingreso.

Debe tener la capacidad de almacenar el lodo generado en el proceso de sedimentación durante un periodo de 24 horas (Comisión Nacional del Agua - CONAGUA, 2008).

$$V_{Tolva} = \left(\frac{\pi H}{3} \left(\frac{\phi_{mayor}^2}{2} + \frac{\phi_{mayor}}{2} \times \frac{\phi_{min}}{2} + \frac{\phi_{min}^2}{2} \right) \right) - \left(\frac{D_{in} + e_{in}}{2} \right)^2 (\pi H) \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

ϕ_{min} : diámetro mínimo de la tolva de lodos (m)

H : altura de la tolva de lodos (m)

ϕ_{max} : diámetro máximo de la tolva de lodos (m)

D_{in} : diámetro tubería de entrada (m)

e_{in} : espesor de recubrimiento de la tubería de entrada (m)

2.2.4. Resumen de parámetros de diseño de sedimentadores convencionales.

Con el fin de resumir y presentar los criterios comúnmente usados en el diseño de los sedimentadores convencionales en la (Tabla 8), se presentan algunos valores típicos para los parámetros de diseño de los mismos.

Tabla 8. Valores típicos para los parámetros de diseño de sedimentadores primarios.

Referencias	Carga superficial (m/d)	Tiempo de retención (horas)	Profundidad (m)	Carga sobre el vertedero (L/(s m))
Metcalfe & Eddy, Inc.	32 – 48	1.5 – 2.5	3 – 5	1.4 – 5.8
Normas de los diez estados	41	---	>2.1	<2.2
Manual de diseño nava	49	---	3	<14
Ejército Estados Unidos de América	12 – 41	2.5	2.5 – 4.5	0.7 – 1.7
Steel y McGhee	24 – 60	1 – 2	1 – 5	---
Fair et al.	---	2	3	---
Sundstrom y Klei	---	1 – 4	---	---
USEPA	24 – 49	---	3 – 5	---
Tchobanoglous y Schroeder	30 – 60	---	3 – 5	---
IWPC	30 – 45	2	>1.5	1.2 – 5.2

Fuente: (Romero Rojas, 2000)

2.2.5. Modelación matemática de fluidos.

La modelación matemática de fluidos está enfocada en predecir el comportamiento de los fluidos bajo diferentes condiciones físicas y químicas, las cuales son propias de las características de la sustancia y el entorno en el cual se estudia. Está conformada por una serie de expresiones

matemáticas que permiten predecir cómo se comportan los fluidos bajo diferentes condiciones, estas expresiones o ecuaciones son fundamentales para estudiar los fluidos y son conocidas en el área de la mecánica de fluidos como las ecuaciones de Navier-Stokes e involucran la ley de conservación de la masa (Ecuación 9), ley de conservación de la cantidad de movimiento o momento (Ecuación 10), y la ley de conservación de la energía (Ecuación 12) (Sturm, 2010; Baraya, 2017).

Las ecuaciones 9, 10 y 12, son desarrolladas desde el enfoque euleriano que es aplicable a sistemas de referencia no inerciales y para fluidos Newtonianos incompresibles (ANSYS, 2017). La ecuación de conservación de la masa para estos sistemas de referencia no inerciales se expresa de forma similar para flujos laminares (ANSYS, 2017).

2.2.5.1. Ecuación de conservación de la masa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde ρ es la densidad del fluido, ∇ es el operador Nabla, \vec{v} es el vector de velocidades en las tres direcciones y S_m es la masa añadida a la fase continua de dispersión de la segunda fase (ANSYS, 2017).

La (Ecuación 18) es la forma general para expresar la ecuación de la conservación de la masa y es válida para flujos compresibles e incompresibles (ANSYS, 2017).

2.2.5.2. Ecuación de conservación del momento

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde p es la presión estática, $\bar{\tau}$ es el tensor de esfuerzos (Ecuación 20), $\rho \vec{g}$ es la fuerza gravitacional y \vec{F} describe las fuerzas externas de cuerpo (ANSYS, 2017).

El tensor esfuerzo se define de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde μ es la viscosidad molecular, I es el tensor identidad y el segundo término en la parte derecha es el efecto del volumen de dilatación (Lauder & Spalding, 1972; ANSYS, 2017).

2.2.5.3. Ecuación de conservación de la energía

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\alpha_k \vec{v}_k (\rho_k E_k + p))) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde k_{eff} es la conductividad efectiva ($\sum \alpha_k (k_k + k_t)$), k_t es la conductividad térmica turbulenta, definida de acuerdo con el submodelo de turbulencia empleado en la configuración del modelo de dinámica computacional (ANSYS, 2017).

El término expresado al costado derecho de la (Ecuación 21), representa la transferencia de energía generada por la conducción térmica (ANSYS, 2017).

El coeficiente definido como S_E , hace referencia a cualquier otra fuente volumétrica de calor definida para el modelo (ANSYS, 2017).

Para la definición del término E_k , o energía en la fase k se emplea la expresión presentada en la (Ecuación 22).

$$E_k = h_k - \frac{p}{\rho_k} + \frac{v_k^2}{2} \quad \text{Ecuación 22}$$

Para una fase compresible se aplica la expresión anterior, mientras que, para una fase incompresible se define como $E_k = h_k$, donde el término h_k es la entalpia de sensibilidad para la fase k (ANSYS, 2017). Los términos expresados como v_k y ρ_k , hacen referencia a la velocidad de desplazamiento para la fase k y la densidad para la fase k de forma respectiva (ANSYS, 2017).

2.2.5.4. Modelación de la Turbulencia

Existen diferentes modelos de turbulencia que permiten describir las fluctuaciones producidas en el flujo, puntualmente en los campos de velocidad (ANSYS, 2017). Las fluctuaciones en una mezcla transportan magnitudes como lo son el momento o la cantidad de movimiento, la energía y concentraciones específicas en un fluido (ANSYS, 2017). Este comportamiento genera la necesidad de desarrollar modelos, basados en su gran mayoría en las ecuaciones del promedio temporal de Reynolds de las ecuaciones de Navier – Stokes (RANS por sus siglas en inglés) (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Los modelos mediante el desarrollo de estos promedios temporales permiten reducir los tiempos computacionales de resolución de las ecuaciones numéricas que describen el comportamiento de los fluidos (ANSYS, 2017).

Los modelos existentes se diferencian entre sí por la cantidad de ecuaciones de transporte que agregan al sistema de ecuaciones de la aproximación RANS (Versteeg & Malalasekera, 2007). En la (Tabla 8) se presentan los diferentes modelos de turbulencia integrados con mayor frecuencia en los programas de computational dynamics fluids o CFD.

Tabla 9. Clasificación de los modelos de turbulencia.

Numero de ecuaciones	Nombre del modelo
Dos	$k - \epsilon$ model
Dos	$k - \omega$ model
Dos	Renormalized Group (RNG) $k - \epsilon$
Siete	Reynolds stress model
Tres	Shear Stress Transport (SST) $k - \omega$

Fuente: Adoptado de Versteeg & Malalasekera (2007); Karpinska & Bridgeman (2015)

El software ANSYS FLUENT, ofrece diferentes modelos de turbulencia para llevar a cabo el proceso de simulación los cuales se muestran la (Tabla 10).

Tabla 10. Modelos disponibles en el programa ANSYS FLUENT.

Modelo	Sub modelo
Spalart-Allmaras model	-
$k - \epsilon$ models	<ul style="list-style-type: none"> • Standard $k - \epsilon$ model • Renormalization-group (RNG) • $k - \epsilon$ model • Realizable $k - \epsilon$ model
$k - \omega$ models	<ul style="list-style-type: none"> • Standard $k - \omega$ model • Shear-stress transport (SST) $k - \omega$ model
Transition $k - \kappa l - \omega$ model	-
Transition SST model	-
$v^2 - f$ model (add-on)	-

Modelo	Sub modelo
Reynolds stress models (RSM)	<ul style="list-style-type: none"> • Linear pressure-strain RSM model • Quadratic pressure-strain RSM model • Low-Re stress-omega RSM model
Detached eddy simulation (DES) model, which includes one of the following RANS models.	<ul style="list-style-type: none"> • Spalart-Allmaras RANS model • Realizable $k - \epsilon$ RANS model • SST $k - \omega$ RANS model
Large eddy simulation (LES) model, which includes one of the following sub-scale models.	<ul style="list-style-type: none"> • Smagorinsky-Lilly subgrid-scale model • WALE subgrid-scale model • Dynamic Smagorinsky model • Kinetic-energy transport subgrid-scale model

Fuente: Adoptado de ANSYS (2017).

Los modelos existentes pueden ser empleados de acuerdo con las características físicas en el fluido y sus características, además del grado de precisión que se requiera en la simulación del comportamiento, las herramientas computacionales disponible y el tiempo requerido para efectuar la simulación (ANSYS, 2017).

Los modelos más empleados en la simulación de flujos incompresibles son los denominados Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS), los cuales permiten reducir grandes requerimientos computacionales y son adoptados para aplicaciones prácticas en la ingeniería (ANSYS, 2017). Dentro de los modelos de tipo RANS, se encuentran los modelos Spalart-Allmaras, los modelos $k - \epsilon$, $k - \omega$ y sus variantes y el modelo RSM (Low re stress omega model) (ANSYS, 2017).

Uno de los modelos $k - \epsilon$ más empleados en la modelación de fluidos es el estándar, el cual se caracteriza por emplear dos ecuaciones fundamentales, mediante las cuales lleva a cabo la solución de las ecuaciones de transporte, permitiendo determinar de forma independiente la velocidad turbulenta y la escala de longitud (ANSYS, 2017).

El modelo fue propuesto inicialmente por Launder & Spalding (1972), logrando obtener la robustez y razonable precisión para diferentes tipos de flujos turbulentos (ANSYS, 2017).

El modelo es definido como semi – empírico, basado en un modelo de ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta denominado bajo la variable (k) y su tasa de disipación identificada como la variable (ε) (Launder & Spalding, 1972).

La ecuación identificada en el modelo como ecuación de transporte para (k) es derivada de la ecuación exacta de transporte para la energía cinética turbulenta. Por otro lado, la ecuación del modelo de transporte para la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta (ε), es obtenida empleando un análisis físico (ANSYS, 2017). El modelo de turbulencia k – ε asume que el flujo tiene un desarrollo totalmente turbulento y los efectos de la viscosidad molecular pueden llegar a ser despreciables, siendo ideal aplicar el modelo estándar para flujo con una turbulencia elevada o totalmente desarrollada (ANSYS, 2017).

Ecuaciones de transporte para el modelo k - ε estándar

Las expresiones para describir el transporte para las variables (k) y (ε) se presentan en las (Ecuación 23) y (Ecuación 24), donde (k) es la energía cinética turbulenta y (ε) es la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta. Estas se expresan de la siguiente manera (ANSYS, 2017):

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad \text{Ecuación 23}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad \text{Ecuación 24}$$

En las ecuaciones (Ecuación 23) y (Ecuación 24) G_k identifica la generación de energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad media (ANSYS, 2017). La variable G_b es la generación de energía cinética turbulenta debido a la flotabilidad. En lo que respecta la variable identificada como Y_M , representa la contribución de la dilatación fluctuante en turbulencia compresible para toda la tasa de disipación (ANSYS, 2017).

Las variables $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, y $C_{3\epsilon}$ son valores constantes. Las variables σ_ϵ y σ_k son los números de Prandtl para la turbulencia para (k) y (ε) respectivamente. Las variables S_k y S_ϵ son términos

definidos por el usuario, las cuales pueden ser fuentes externas de energía cinética turbulenta o de la tasa de disipación de energía turbulenta (ANSYS, 2017).

En el modelo las constantes $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, C_μ , σ_ε y σ_k están definidas por defecto en el modelo del programa ANSYS FLUENT, de acuerdo con experimentos efectuados para los flujos turbulentos fundamentales y de turbulencia de rejilla isotrópica decadente (ANSYS, 2017). Y se presentan a continuación; $C_{1\varepsilon}=1.44$, $C_{2\varepsilon}=1.92$, $C_\mu=0.09$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ y $\sigma_k = 1.0$.

Ecuaciones modelación viscosidad turbulenta

La viscosidad turbulenta o Eddy Viscosity, es expresada en función de las variables (k) y (ε), de acuerdo con la (Ecuación 25).

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde C_μ es una constante (ANSYS, 2017).

Determinación de los parámetros de turbulencia

Es importante tener en cuenta que los parámetros de turbulencia que deben ser definidos en las condiciones de frontera pueden ser determinados de acuerdo con las ecuaciones de energía cinética turbulenta (Ecuación 28), la tasa de disipación de energía cinética turbulenta (Ecuación 30), la intensidad turbulenta (Ecuación 27) y la longitud característica de la sección transversal (Ecuación 29) (ANSYS, 2009).

Numero de Reynolds

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{v D}{\nu} \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde ρ es la densidad del fluido, v es la velocidad de flujo a través de la sección hidráulica, D es el diámetro para conductos circulares, μ es la viscosidad dinámica y ν es la viscosidad cinemática (Avila, 1994).

Intensidad turbulenta

$$I = \frac{u'}{\bar{u}} = 0.16 (Re_{D_H})^{-\frac{1}{8}} \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde u' corresponde a una perturbación, I corresponde a la intensidad turbulenta, cuyo rango se encuentra entre 1% y 10% y \bar{u} equivale a una velocidad media (ANSYS, 2009).

Energía cinética turbulenta

$$k = \frac{3}{2} (\bar{u} \cdot I)^2 \quad \text{Ecuación 28}$$

Donde \bar{u} equivale a una velocidad media en la sección hidráulica e I es la intensidad turbulenta (ANSYS, 2009; Sánchez, 2014).

Longitud característica de la sección transversal

$$l_m = 0,07D_h \quad \text{Ecuación 29}$$

Donde D_h es el diámetro de la sección hidráulica en la condición de frontera para el modelo (ANSYS, 2009).

Tasa de disipación de energía

$$\varepsilon = C_\mu^{\frac{3}{4}} \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l_m} \quad \text{Ecuación 30}$$

En donde C_μ corresponde a una constante empírica con un valor por defecto de 0.09 y l_m es la longitud característica de acuerdo con la (Ecuación 29) (ANSYS, 2009).

2.2.5.5. Modelos de flujo multifásico.

Para la simulación del transporte de partículas se emplean modelos denominados multifásicos, mediante los cuales se efectúa el análisis de las diferentes fases que componen los fluidos. Estos modelos matemáticos de fluidos emplean diferentes esquemas numéricos los cuales permiten describir la interacción entre cada una de las fases que componen la mezcla (ANSYS, 2017).

Existen cuatro categorías que agrupan los flujos multifásicos, los cuales se presentan en la (Tabla 11).

Tabla 11. Categorías para los regímenes de flujo multifásico.

Categoría	Interacción de Fases	Ejemplos
Uno	Flujos con interacción Gas – Líquido o Líquido – Líquido	<ul style="list-style-type: none">• Flujo de burbujas• Flujo de gotas
Dos	Flujos con interacción Gas – Sólido	<ul style="list-style-type: none">• Transporte Neumático• Flujo cargado de partículas
Tres	Flujos con interacción Líquido - Sólido	<ul style="list-style-type: none">• Sedimentación• Transporte de sedimentos
Cuatro	Flujos con interacción de tres fases	<ul style="list-style-type: none">• Sedimentación

Fuente: Adoptado de ANSYS (2017).

Para el cálculo numérico de los flujos multifásicos existen dos enfoques matemáticos los cuales son denominadas como Euleriana y Lagrangiana (ANSYS, 2017).

Enfoque Euler – Lagrange: En este modelo la fase líquida es analizada como un medio continuo, mediante el cual se resuelven las ecuaciones de Navier – Stokes. Gran parte de las partículas son consideradas de forma individual, de tal manera que son modeladas para la fase discreta o dispersa.

En la fase discreta, es posible el desarrollo del intercambio de la cantidad de movimiento (momento), masa y energía con la fase continua. En el modelo se realiza la estimación para cada partícula o grupo de éstas, las cuales siguen las mismas trayectorias.

El modelo es limitado para los sistemas que cuentan con baja concentración de partículas en la fase discreta, como lo describe en su investigación Enriquez (2019).

El modelo Euler – Lagrange no necesita ecuaciones adicionales de cierre para la fase discreta ya que éste sigue el movimiento de cada partícula individualmente (Enriquez, 2019), lo que lo

hace conveniente para la consideración de propiedades como densidad, granulometría, velocidad de asentamiento, entre otras (ANSYS, 2017).

Enfoque Euler – Euler: En el modelo conceptualizado como euleriano las fases son consideradas como continuas y para cada una de éstas se resuelven las ecuaciones de continuidad y de momento. El modelo se puede emplear para resolver problemas en los cuales se analicen flujos complejos, sin embargo, no en todos los planteamientos genera los mejores resultados, teniendo en cuenta que requiere información experimental para poder cerrar el sistema de ecuaciones.

En el enfoque euleriano o Euler - Euler, las diferentes fases del fluido son consideradas de forma matemática en una interacción permanente, teniendo en cuenta que el esquema considera que el volumen de una de las fases no puede ser ocupado por las otras fases. De acuerdo con lo anterior el modelo introduce el concepto de fracción de volumen (ANSYS, 2017).

Las fracciones de volumen asumen una función continua en el espacio y tiempo, y la sumatoria de sus porcentajes correspondientes en la mezcla debe ser igual a 1 (ANSYS, 2017).

El modelo ANSYS FLUENT emplea tres diferentes métodos Eulerianos multifásicos para simular el comportamiento de las fases, los cuales se presentan en la (Tabla 12).

Tabla 12. Modelos multifásicos Eulerianos empleados por ANSYS FLUENT

Modelos Eulerianos disponibles en ANSYS FLUENT	Características
Model Volume of fluid Model (VOF)	Este modelo se caracteriza por emplear una técnica de rastreo o seguimiento de las superficies aplicado a una malla fija de tipo Euleriano. El método está desarrollado para dos o más fluidos inmiscibles el objeto de interés es la posición de la interfase entre los fluidos.
Mixture Model	El modelo de mezcla o mixture model por su definición en inglés, es diseñado para efectuar el análisis de dos o más fases que pueden ser fluidos o partículas. Las partículas o fluidos que componen las fases son analizadas por el esquema numérico de forma continua, considerando la interacción que existe entre las fases.

Modelos Eulerianos disponibles en ANSYS FLUENT	Características
	<p>El modelo resuelve la ecuación de cantidad de movimiento para la mezcla y asigna velocidades relativas a las fases dispersas.</p> <p>El modelo de mezcla es muy empleado para la simulación de procesos de sedimentación y separadores ciclónicos de partículas.</p>
Eulerian Model	<p>El modelo Euleriano es el más complejo de los modelos integrados en ANSYS FLUENT para el análisis de flujos multifásicos.</p> <p>Este modelo está desarrollado para resolver las ecuaciones de momentum y continuidad para de forma independiente para cada una de las fases que se estén estudiado en la mezcla.</p> <p>Este modelo se emplea frecuentemente para el análisis de lechos fluidizados o la fluidización de partículas en un medio.</p>

Fuente: Adoptado de ANSYS (2017).

El modelo de mezcla es el más empleado en el análisis de las unidades de sedimentación primaria de acuerdo con autores como Zhang (2014), De Clercq (2003) y Enriquez (2019), gracias a las facilidades computacionales que brinda y el aproximado grado de similitud que logra en comparación con los procesos de sedimentación empleados en los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Este modelo tiene la capacidad de resolver las ecuaciones matemáticas de continuidad, momentum y energía para la mezcla, las ecuaciones de fracción de volumen para las fases secundarias y las expresiones algebraicas asignadas para las velocidades relativas de cada fase, presentando un esquema simplificado y con un tiempo computacional de cálculo adecuado para la simulación del proceso de sedimentación primaria (ANSYS, 2017).

El modelo de mezcla emplea la ecuación de continuidad de acuerdo con la expresión de la (Ecuación 31) (ANSYS, 2017).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0$$

Ecuación 31

Donde \vec{v}_m es la velocidad promedio de la masa y este dado por la (Ecuación 32) (ANSYS, 2017).

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m} \quad \text{Ecuación 32}$$

Donde $\rho_k \vec{v}_k$ son la densidad y velocidad para cada una de las fases analizadas en la mezcla y ρ_m es la densidad de la mezcla, que está dada de acuerdo con la expresión presentada en la (Ecuación 33).

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad \text{Ecuación 33}$$

Donde α_k es la fracción de volumen de cada una de las fases (ANSYS, 2017).

En la (Ecuación 34) se presenta la expresión empleada por el modelo de mezcla la cual se basa en la expresión presentada para el momentum. Esta ecuación se obtiene como la sumatoria de los momentos individuales de cada una de las fases de la mezcla (ANSYS, 2017).

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] \\ + \rho_m \vec{g} + \vec{F} + \nabla \cdot (\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k}) \end{aligned} \quad \text{Ecuación 34}$$

Donde n es el número de fases analizado o estudiado en la mezcla, \vec{F} es la fuerza de cuerpo y μ_m es la viscosidad dinámica de la mezcla (ANSYS, 2017), dada por la expresión presentada en la (Ecuación 35). La variable $\vec{v}_{dr,k}$ es la velocidad de deriva o desplazamiento dada de acuerdo con la (Ecuación 36).

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad \text{Ecuación 35}$$

Donde α_k y μ_k son la fracción de volumen de la fase analizada y la viscosidad dinámica de la misma fase.

$$\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \quad \text{Ecuación 36}$$

Para la resolución de la ecuación de energía, el modelo de mezcla emplea la expresión matemática definida por la (Ecuación 21), donde se emplea la ecuación de energía para la fase secundaria o E_k , expresada mediante la (Ecuación 22).

Ecuación fracción de volumen

Para la fase secundaria (p), el modelo de mezcla emplea una ecuación para estimar la fracción de volumen correspondiente, obtenida con base en la ecuación de continuidad (ANSYS, 2017). Esta fracción de volumen puede ser obtenida mediante la (Ecuación 37).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_{dr,p}) + \sum_{q=1}^n (\dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq}) \quad \text{Ecuación 37}$$

Donde los términos notados con q se refieren a la fase principal y los términos definidos con p se refieren a la fase secundaria. Los términos α hacen referencia a la fracción de volumen e la fase, ρ a la densidad y la variable \dot{m} hace referencia a la transferencia de masa entre las fases. La expresión para estimar la velocidad de deriva o desplazamiento de la fase (Ecuación 38), se define con base en el diferencial de velocidad asignado para las fases primaria y secundaria (Ecuación 39), además de la fracción másica para cualquier fase k , que es definido por la variable C_k , de acuerdo con la (Ecuación 40) (ANSYS, 2017).

$$\vec{v}_{dr,p} = \vec{v}_{pq} - \sum_{k=1}^n C_k \vec{v}_{qk} \quad \text{Ecuación 38}$$

$$\vec{v}_{pq} = \vec{v}_p - \vec{v}_q \quad \text{Ecuación 39}$$

$$C_k = \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m} \quad \text{Ecuación 40}$$

Donde

La velocidad de movimiento de la fase principal a la fase secundaria está definida por la variable \vec{v}_{pq} y las velocidades de cada fase están dadas por las variables \vec{v}_p y \vec{v}_q .

2.2.5.6. Métodos de Discretización

Para la resolución de las ecuaciones matemáticas de transporte, los softwares como ANSYS-FLUENT, utilizan métodos de discretización espacial (ANSYS, 2017). Los métodos más empleados son las diferencias finitas, el método de los elementos finitos y el método de los volúmenes finitos, la selección de estos métodos depende de la resolución espacial de la geometría de interés (1D, 2D o 3D) (ESSS, 2016). Por medio de los métodos de discretización;

“se intercambia el dominio continuo por un dominio discreto, donde un conjunto de volúmenes de control es empleado para representar el dominio original” (ESSS, 2016).

Los elementos o campos implícitos en las ecuaciones fundamentales de transporte se expresan en volúmenes de control, mediante los cuales se desarrolla un sistema de ecuaciones resuelto numéricamente (ESSS, 2016).

El conjunto de volúmenes de control, conocido como la malla de la geometría, es uno de los aspectos más relevantes del proceso de modelación, ya que, de este componente, y de la definición apropiada de las condiciones de frontera, depende en gran medida la convergencia y precisión del modelo (ESSS, 2016).

De acuerdo con la descripción anterior, el programa ANSYS FLUENT, emplea modelos espaciales que permiten llevar a cabo la simulación de fluidos con varias fases o multifásicos, resolviendo las ecuaciones de transporte mediante métodos numéricos, de acuerdo con las características físicas que son requeridas para efectuar la modelación del flujo y la turbulencia (Sánchez, 2014).

La discretización de las ecuaciones que gobiernan el transporte, son definidas en función del espacio y del tiempo o conocidas como discretización espacial y temporal (ANSYS, 2017). A continuación, se describen de forma resumida ambas formas de discretización de acuerdo con la guía teórica de ANSYS (2017).

Discretización espacial

El software ANSYS FLUENT emplea una técnica de discretización basada en el volumen de control analizado, para convertir el término escalar general de la ecuación de transporte, en una ecuación algebraica y poder efectuar su resolución de forma numérica (ANSYS, 2017). El método consiste en la integración de la ecuación de transporte sobre cada uno de los volúmenes de control analizados, obteniendo una ecuación discretizada que expresa la ley de conservación sobre el volumen de control de referencia (ANSYS, 2017).

El programa cuenta con los métodos o esquemas de discretización necesarios para los términos convectivos de la ecuación de transporte para la variable de interés ϕ . Los métodos más empleados se conocen bajo los siguientes nombres (Baraya, 2017):

- Esquema de primer orden (upwind)
- Esquema de segundo orden (upwind)
- Esquema (Power Law)
- Esquema QUICK
- Esquema de tercer orden MUSCL

Para analizar la empleabilidad de los esquemas numéricos de discretización, es necesario considerar si el flujo está alineado con la malla, en estos casos, la discretización mediante el esquema numérico de primer orden upwind consigue generar resultados admisibles (Baraya, 2017). En los casos en que el esquema de primer orden no se ajusta adecuadamente y se genera inestabilidad en el modelo, es posible obtener un mejor resultado empleando el esquema de segundo orden upwind. En términos generales, el esquema de primer orden upwind permite obtener un grado de convergencia de forma más rápida que, mediante el esquema de segundo orden, sin embargo, esto puede generar un mayor grado de error en el resultado obtenido. (Baraya , 2017; ANSYS, 2017).

El programa tiene integrado dentro de sus opciones de configuración otro esquema de discretización conocido como Power Law, el cual consiste en el desarrollo de la interpolación del valor nominal de la variable de interés utilizando la solución exacta para una ecuación de convección-difusión unidimensional (ANSYS, 2017). El método tiene un esquema numérico equivalente al de un esquema numérico estándar de primer orden (Baraya , 2017; ANSYS, 2017).

Empleando el esquema QUICK o el MUSCL de tercer orden, es posible conseguir resultados más exactos en relación con los parámetros de validación del modelo, mientras que mediante los esquemas de segundo orden con flujos rotacionales los resultados obtenidos generan un grado de dispersión mayor, en relación con los parámetros de validación (Baraya, 2017).

El esquema QUICK, es aplicable en mallas de composición hexaédrica o con una composición basada en cuadriláteros de acuerdo con lo descrito por Baraya (2017).

Por otro lado, el esquema MUCL de tercer orden es aplicable a todo tipo de discretización (Baraya, 2017). En comparativa el esquema QUICK y el esquema de segundo orden upwind, no generan resultados con mayor precisión respecto uno del otro, por lo que el esquema de segundo orden se ajusta de forma adecuada para la discretización espacial de las ecuaciones de transporte (Baraya, 2017; ANSYS, 2017).

El programa ANSYS FLUENT emplea esquemas de segundo orden upwind, en los términos convectivos y escalares de la ecuación de transporte para los fluidos que tienen características monofásicas (Baraya, 2017).

Por otro lado, las ecuaciones empleadas para la descripción del efecto de turbulencia en el flujo son resueltas por el programa mediante el esquema de primer orden upwind (Baraya, 2017; ANSYS, 2017).

Evaluación de los gradientes y derivadas

Los gradientes empleados en la modelación matemática computacional de fluidos son necesarios para obtener los valores de los escalares conformados en el dominio de la geometría, sin embargo, también son empleados para definir los términos de la difusión y las derivadas de la velocidad (ANSYS, 2017).

El gradiente determinado de las o la variable de interés analizada es empleado para discretizar los términos de convección y difusión en las ecuaciones de conservación para el flujo (ANSYS, 2017).

1El programa ANSYS FLUENT, emplea diferentes métodos para evaluar los gradientes, los cuales son descritos a continuación (ANSYS, 2017):

- Green-Gauss basado en celdas
- Green-Gauss basado en nodos
- Mínimos cuadrados basado en celdas

El programa emplea el teorema de Green-Gauss para estimar el gradiente del escalar ϕ “en el centro de la celda como el promedio aritmético de los valores en los centros de las celdas adyacentes” (Baraya, 2017, p.51).

Por otro lado, el programa emplea el teorema de Green-Gauss, aplicando el promedio aritmético de los valores de los nodos sobre las caras de la celda o elemento finito (ANSYS, 2017).

Los valores nodales aplicados en el teorema son obtenidos desde el ponderado promedio de los valores de los nodos adyacentes a las celdas, tomando como referencia el esquema numérico propuesto por Holmes & Connell (1989).

Los resultados derivados mediante el esquema permiten obtener valores exactos de una función lineal, que rodea desde el centro de las celdas los campos aleatorios no estructurados de la malla, reduciendo así las restricciones del problema y manteniendo una precisión de segundo orden espacial (ANSYS, 2017).

Para el método de mínimos cuadrados el esquema numérico asume que la solución varía linealmente. El cambio en los valores entre las celdas a lo largo del componente vectorial se desarrolla matemáticamente desde el centroide de una celda a la otra (ANSYS, 2017). Este método numérico efectúa el cálculo del gradiente de una celda determinada mediante un sistema de ecuaciones lineales, las cuales son resueltas mediante el método desarrollado por Gram-Schmidt (Baraya, 2017).

En mallas irregulares o no estructuradas, con baja simetría y distorsionadas la precisión del método de mínimos cuadrados para la estimación del gradiente, es comparable con el método para el cálculo del gradiente basado en nodos, los cuales permiten obtener resultados superiores en comparación con el método basado en celdas, sin embargo este último método es mucho menos exigente a nivel computacional lo cual reduce el tiempo de ejecución de la simulación (ANSYS, 2017). Por la simplicidad de este último método y optimización del tiempo de simulación el programa ANSYS FLUENT lo integra por defecto (ANSYS, 2017).

2.2.5.7. Método de solución basado en la presión o Pressure-Based

El método de solución basado en la presión es empleado para fluidos incompresibles como el agua (Baraya, 2017). Mediante un algoritmo el método resuelve las ecuaciones de presión, las cuales permiten lograr la restricción de la conservación de la masa (continuidad) del campo de velocidad (ANSYS, 2017). Las ecuaciones de presión se obtienen a partir de las ecuaciones de continuidad y momento, de tal manera que el campo de velocidad, corregido por la presión, satisfaga la condición continuidad (ANSYS, 2017).

Dado que las ecuaciones fundamentales son no lineales y están acopladas entre sí, el proceso de solución requiere la ejecución de varias iteraciones en las que todo el conjunto de ecuaciones que gobiernan el flujo se resuelve periódicamente hasta lograr la condición de convergencia (ANSYS, 2017).

Existen dos algoritmos de solución basados en la presión para efectuar la interpolación de los valores en los campos, estos están disponibles en el programa ANSYS FLUENT. Los esquemas son conocidos como segregado y acoplado los cuales se describen a continuación (ANSYS, 2017).

Algoritmo segregado

El programa emplea el algoritmo segregado para resolver de forma individual las ecuaciones fundamentales una tras otra, encontrando los valores de todas las variables de interés planteadas mediante los esquemas numéricos (ANSYS, 2017).

Como tal este algoritmo basado en la presión, emplea un conjunto de operaciones ordenadas y sistemáticas de solución en el que las ecuaciones fundamentales que gobiernan el flujo se resuelven de forma secuencial, de tal manera que la solución se ejecuta para cada expresión de forma separada (ANSYS, 2017).

Teniendo en cuenta que las ecuaciones generales o fundamentales que describen el patrón de flujo no son lineales y están acopladas, el ciclo de solución debe desarrollarse de forma iterativa para de esta manera obtener una solución numérica que sea convergente (ANSYS, 2017).

Cada una de las ecuaciones fundamentales se encuentra en resolución durante el desarrollo del algoritmo, mientras tanto, esta se encuentra desacoplada o segregada de otras ecuaciones, lo que proporciona el nombre dado para cada uno de los algoritmos empleados por el programa ANSYS FLUENT (ANSYS, 2017).

El algoritmo segregado es eficiente en cuanto a la memoria, ya que las ecuaciones discretizadas sólo necesitan almacenarse en la memoria de una en una, sin embargo, la convergencia de la solución es relativamente lenta, ya que las ecuaciones se resuelven de forma desacoplada (ANSYS, 2017). En la figura 13 se presentan los pasos desarrollados por el algoritmo en cada iteración elaborada en el proceso de simulación por el programa ANSYS FLUENT.

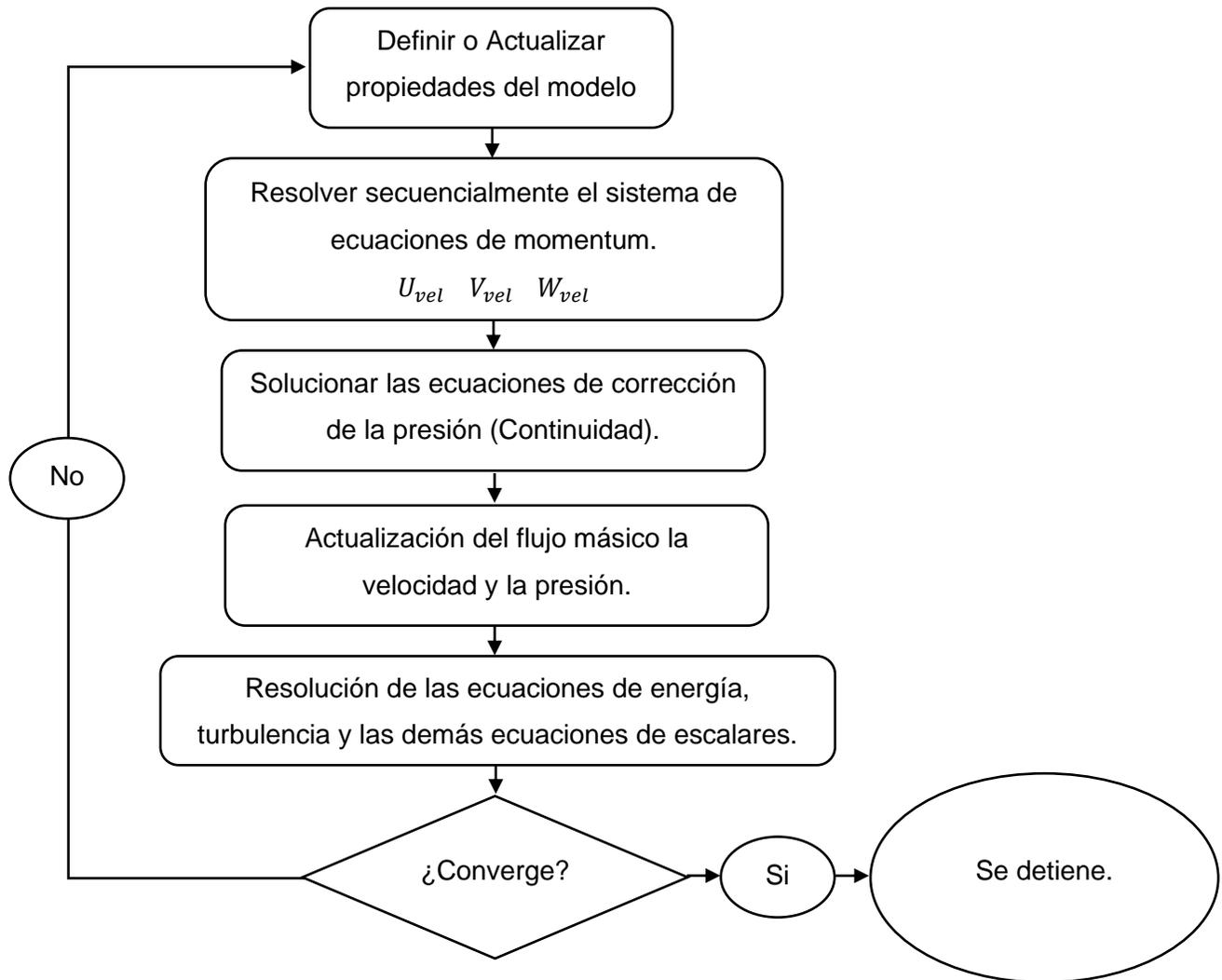


Figura 13. Pasos de resolución para el algoritmo segregado basado en la presión.
Fuente: (ANSYS, 2017).

Algoritmo acoplado

El algoritmo acoplado basado en la presión se encarga de resolver los esquemas numéricos, mediante un sistema acoplado de ecuaciones el cual emplea las expresiones de momento y de continuidad basado en la presión (ANSYS, 2017). Mediante este método de resolución el algoritmo acoplado, permite solucionar el sistema en un único paso. Las ecuaciones de energía, turbulencia y demás escalares se resuelven de forma desacoplada (ANSYS, 2017).

Para este método de solución, la aproximación a la convergencia de la solución es más rápida en comparación con el algoritmo segregado, sin embargo, es necesario contar con una velocidad de procesamiento y memoria superiores, aproximadamente de entre 1,5 a 2 veces el del algoritmo segregado (ANSYS, 2017). En la figura 14 se presentan los pasos desarrollados por el algoritmo en cada iteración elaborada en el proceso de simulación.

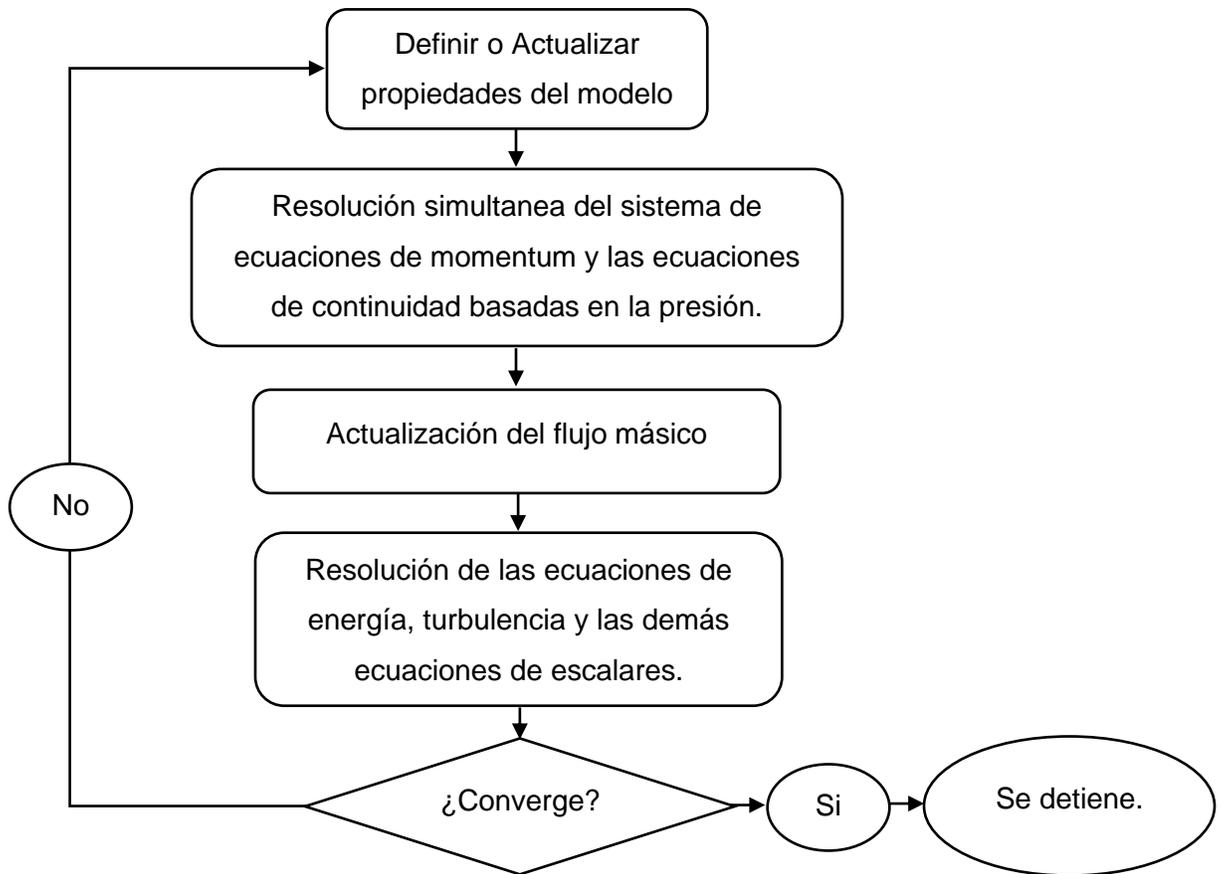


Figura 14. Pasos de resolución para el algoritmo acoplado basado en la presión.
Fuente: (ANSYS, 2017).

De acuerdo con lo descrito para el algoritmo acoplado, se requiere una mayor capacidad de procesamiento para que el sistema discreto de todas las ecuaciones de momentum y continuidad basadas en la presión se almacenen en la memoria del ordenador cuando se resuelven los campos de velocidad y presión (ANSYS, 2017).

Discretización de la ecuación de Momentum

Los métodos de discretizaciones expuestos en la sección ([2.1.5.6.Métodos de Discretización](#)) para las ecuaciones de transporte, son aplicables de igual manera para la ecuación de momentum (ANSYS, 2017).

El programa ANSYS FLUENT emplea esquemas de co-localización, donde los valores para la presión y la velocidad son almacenados en el centro de las celdas de cálculo, sin embargo, las expresiones matemáticas requieren conocer el valor de la presión entre las celdas de cálculo, por lo que, es necesario emplear un esquema de interpolación para estimar estos valores (ANSYS, 2017).

Esquema de interpolación de la presión

El programa ANSYS FLUENT, cuenta con varias alternativas para la estimación de la presión en las regiones donde se requiere interpolar sus valores, ofreciendo varias alternativas para dicho componente del modelo (Baraya, 2017). De acuerdo con lo anterior, el programa integra el esquema estándar de forma predeterminada, mediante el cual es posible resolver gran parte de los problemas estudiados mediante la dinámica de fluidos computacional (Baraya, 2017).

Existen flujos diferentes para los cuales el programa ANSYS FLUENT cuenta con esquemas específicos que permiten obtener una solución más ajustada al comportamiento de estos. (Baraya, 2017; ANSYS, 2017).

En estos casos donde el esquema de interpolación no es válido, existen varios métodos alternativos disponibles los cuales son descritos a continuación de acuerdo con expuesto en la guía teórica de ANSYS (2017).

Para el análisis de flujos en los que interactúan fuerzas de cuerpo de gran magnitud, es recomendable emplear el esquema Body Force Weighted (Baraya, 2017; ANSYS, 2017).

En el estudio de los flujos compresibles es recomendable emplear el esquema de segundo orden, gracias a que se comporta de forma adecuada de acuerdo con ANSYS (2017), siendo este aplicable para mejorar los resultados cuando los esquemas ya mencionados, no se ajustan adecuadamente a la descripción física del problema a resolver (Baraya, 2017; ANSYS, 2017).

Además de lo anterior, es importante tener en cuenta que el esquema de segundo orden no se ajusta adecuadamente en los flujos que presentan gradientes de presión discontinuos, provocados por la presencia de un medio poroso en el dominio o en los problemas donde se plantee el uso del modelo VOF para la descripción del flujo multifásico (ANSYS, 2017).

Existe otro esquema conocido como; opción de escalonamiento de la presión o PRESTO, en el programa ANSYS FLUENT, el cual emplea el equilibrio de continuidad discreto en un volumen de control, aplicándolo alrededor de la celda para calcular la presión de forma escalonada (ANSYS, 2017). Para el caso puntual del análisis de flujos rotacionales de alta velocidad, en los procesos de convección natural, flujos en espiral y flujos con valores numéricos elevados de Rayleigh, se aconseja emplear la opción de escalonamiento de la presión o esquema PRESTO (Baraya, 2017).

Discretización de la ecuación de continuidad

Para la discretización de la ecuación de continuidad empleando el esquema de solución basado en la presión, es necesario relacionar los valores de velocidad de las celdas, definidos bajo la variable \vec{v}_n , con los valores de velocidad almacenados en los centros de las celdas (ANSYS, 2017).

Para la interpolación lineal de las velocidades ANSYS FLUENT utiliza un procedimiento similar al descrito por Rhie & Chow (1983), para evitar que se genere un control no físico de los valores para la presión (ANSYS, 2017). El anterior procedimiento consiste en evaluar el valor de la celda de la velocidad sin efectuar el promedio de forma lineal; en su lugar, se realiza un promedio ponderado por el momentum, utilizando factores de ponderación (ANSYS, 2017).

Esquema de interpolación de densidad

Existe otro esquema de interpolación empleado por el programa ANSY FLUENT, el cual se ajusta adecuadamente a los flujos de características incompresibles. Este esquema de interpolación utiliza el promedio aritmético para efectuar la estimación de la densidad (ANSYS, 2017). Para los flujos compresibles el programa efectúa la estimación considerando la ley de los gases ideales, empleando la interpolación ascendente de la densidad en las celdas (ANSYS, 2017). El programa integra varios esquemas de interpolación, estando estos disponibles para la estimación de la

densidad. Este cuenta con esquemas como; upwind de primer orden (por defecto), upwind de segundo orden, QUICK, MUSCL y cuando es aplicable emplea diferencias centrales (ANSYS, 2017),

El esquema upwind de primer orden está basado en el planteamiento de Karki & Patankar (1989), el cual establece que el valor de la densidad en la celda de referencia es el valor del centro de la celda adyacente superior (ANSYS, 2017). El esquema de primer orden genera estabilidad para la discretización de la ecuación de corrección de la presión y da buenos resultados para la mayoría de las clases de flujos (ANSYS, 2017).

El esquema upwind de segundo orden brinda estabilidad para los flujos con características supersónicas y captura los choques mejor que el esquema de primer orden (ANSYS, 2017). El esquema QUICK empleado para la estimación de la densidad se caracteriza por presentar elementos numéricos similares, a los empleados en el esquema QUICK utilizado para otras variables.

Para el caso específico de los flujos multifásicos, el esquema de densidad QUICK emplea el promedio aritmético para su estimación. Lo anterior aplica cuando las fases tienen características incompresibles (ANSYS, 2017).

Para los cálculos de flujo compresible es recomendable efectuar la simulación inicial mediante un esquema de primer orden para aumentar el factor de estabilidad. Posteriormente es adecuado ejecutar la simulación con un esquema de orden superior para los cálculos de densidad (ANSYS, 2017).

Método de acople Presión – Velocidad.

El método de acople presión-velocidad emplea un esquema de solución basado en la presión, el cual permite efectuar la simulación del flujo estudiado bajo los algoritmos segregado o acoplado (ANSYS, 2017). El programa ANSYS FLUENT integra diferentes algoritmos de acoplamiento, de los cuales tres son los más empleados (ANSYS, 2017). Los siguientes esquemas se basan en el enfoque predictor-corrector (ANSYS, 2017).

- SIMPLE (Semi implicit Method for Pressure Linked Equations)
- SIMPLEC (SIMPLE-consistent)

- PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators)

El algoritmo SIMPLE, utiliza una relación desarrollada entre las ecuaciones de corrección para la velocidad y la presión. Mediante este proceso el algoritmo permite satisfacer la condición de conservación de la masa y obtener el campo de presiones (ANSYS, 2017).

En lo que respecta al procedimiento empleado por el algoritmo SIMPLEC, se destaca la similitud en su proceso de cálculo en relación con el empleado por el algoritmo SIMPLE.

El algoritmo SIMPLEC emplea la expresión utilizada para la corrección del flujo en las celdas, lo que lo diferencia del SIMPLE. (ANSYS, 2017).

Por último, está el esquema de acoplamiento presión-velocidad PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators), el cual forma parte del grupo de algoritmos SIMPLE (ANSYS, 2017). Este algoritmo fundamentalmente es generado teniendo en cuenta el grado superior formado entre la relación de aproximación entre las ecuaciones de corrección para la presión y velocidad (ANSYS, 2017).

El algoritmo PISO realiza dos correcciones enfocadas en mejorar la eficiencia del equilibrio de las ecuaciones de momentum, posterior a las resoluciones de las ecuaciones de corrección de la presión (ANSYS, 2017).

Estas dos correcciones son conocidas como la corrección de celdas adyacentes y la corrección de generado por asimetría en las celdas (ANSYS, 2017).

Para la ejecución de simulaciones en estado permanente, se suelen emplear los métodos establecidos mediante los algoritmos SIMPLE o SIMPLEC ya descritos (Baraya, 2017). Por otro lado, las simulaciones efectuadas en estado no permanente se solucionan empleando el algoritmo de presión implícita PISO (Baraya, 2017; ANSYS, 2017).

Finalmente, es importante mencionar que los métodos SIMPLEC y SIMPLE permiten incrementar los factores de sobre relajación del modelo, lo cual provoca un aumento en el grado de convergencia durante de la simulación (ANSYS, 2017).

Capítulo 3. Descripción de la metodología

Para el planteamiento de la metodología se consideraron una serie de pasos basados en las actividades que se deben ejecutar para realizar la evaluación del comportamiento hidrodinámico y la eficiencia de remoción de los sólidos suspendidos totales de un sedimentador primario convencional para el tratamiento del agua residual municipal, por medio del software ANSYS FLUENT. Para el desarrollo de la presente investigación se consideraron los siguientes pasos presentados en la (Figura 15).



Figura 15. Pasos metodológicos para la modelación del sedimentador primario.

Fuente: (ANSYS, 2017).

De acuerdo con los pasos descritos, a continuación, se efectúan descripción detallada de cada uno de estos con el objetivo de detallar los elementos y componentes específicos de la presente metodología desarrollada.

3.1. Modelación de la geometría

Para la modelación de la geometría se considera el tipo de proyección del modelo, teniendo en cuenta que para el caso puntual se trata de una estructura preconcebida en tres dimensiones con componentes en los ejes equis, ye y zeta.

El diseño de la geometría se lleva a cabo mediante un programa asistido por computadora, empleando para la presente metodología AutoCAD, SpaceClaim y DesignModeler. Las tres aplicaciones permiten generar la geometría de acuerdo con las facilidades de cada espacio gráfico, manejando interfases similares (ANSYS, 2017).

Para el desarrollo de la geometría se proyecta primero la estructura exterior mediante el programa AutoCAD, el cual permite delimitar cual será la sección de interés interior para el desarrollo de la modelación del sedimentador primario.

Una vez se conoce la configuración de la estructura se procede a modelar con SpaceClaim y DesignModeler la geometría correspondiente a la sección interior del tanque en dos dimensiones para mediante la función de revolución generar el volumen correspondiente a la región interior de la estructura.

De esta manera se proyectan en la interfaz gráfica del programa los componentes de interés a modelar como lo son las secciones de flujo en la entrada, el paso por las pantallas deflectoras y la salida sobre la región superior en el vertedero perimetral.

3.2. Mallado de la Geometría

Para el mallado de la geometría existen diferentes técnicas las cuales se caracterizan en dos grandes campos, las mallas estructuradas y las no estructuradas (Sánchez, 2014). Para la presente modelación se plantea el uso de mallas estructuradas las cuales permiten optimizar los tiempos de simulación, mejorar la estabilidad del modelo y obtener resultados con una velocidad

de convergencia mayor, conduciendo estos elementos a un requerimiento computacional acorde con las herramientas disponibles para el desarrollo de la investigación.

La características propias de la clasificación de las mallas es presentada a continuación en la (Tabla 13).

Tabla 13. Clasificación de las representaciones discretas de la geometría o malla

Clasificación Malla	Características
Estructurada	Para este tipo de representación discreta es posible encontrar regularidad en la conexión nodal entre los elementos, además de una simetría elevada entre los elementos que componen la malla. Otra característica propia de una malla estructurada es su grado de calidad ortogonal, definido en función de la conformación ortogonal de las celdas. Estas mallas se caracterizan por tener una configuración hexaédrica en geometrías de tres dimensiones. En la (Figura 16) se muestra un ejemplo de representación discreta estructurada.
No estructurada	Las mallas no estructuradas se caracterizan por presentar conexiones irregulares entre las celdas que la componen. Su distribución geométrica está dada de forma aleatoria debido a la irregularidad o complejidad en la geometría. Las representaciones discretas no estructuradas son típicas de geometrías complejas y con un alto grado de asimetría. En la (Figura 17) se muestra un ejemplo de representación discreta no estructurada.
Hibrida	Existe una tercera clasificación dada para las mallas la cual permite integrar elementos estructurados y no estructurado dentro de una representación discreta. Este tipo de malla se emplea en los casos que las geometrías integran diferentes elementos geométricos que pueden ser de regular conformación y secciones complejas. Para estos casos las regiones geométricas se pueden discretizar con elementos de conexión regular e irregular, buscando obtener condiciones adecuadas entre las celdas. En la (Figura 18) se muestra un ejemplo de representación discreta híbrida.

Fuente: (Sánchez, 2014; ANSYS, 2017).

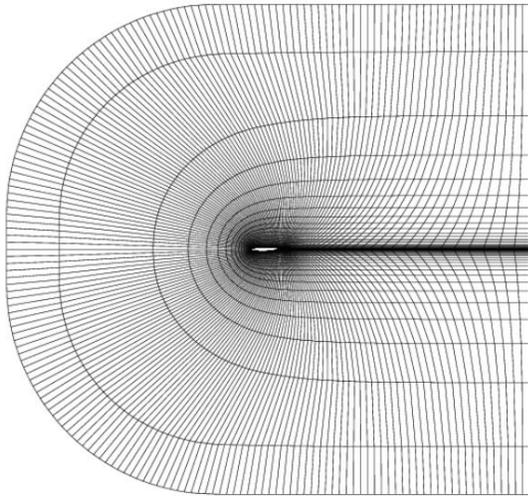


Figura 16. Malla con cuadriláteros estructurada

Fuente: (ANSYS, 2017).

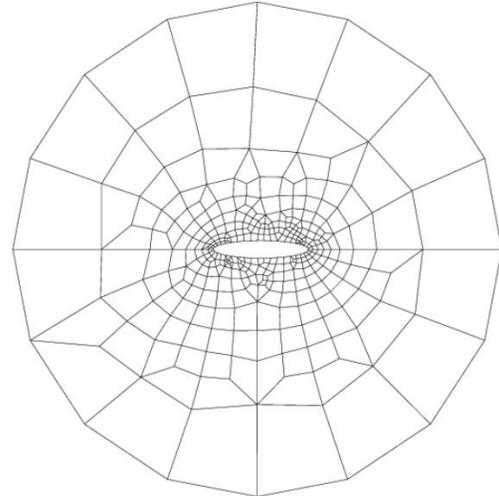


Figura 17. Malla con cuadriláteros no estructurada.

Fuente: (ANSYS, 2017).

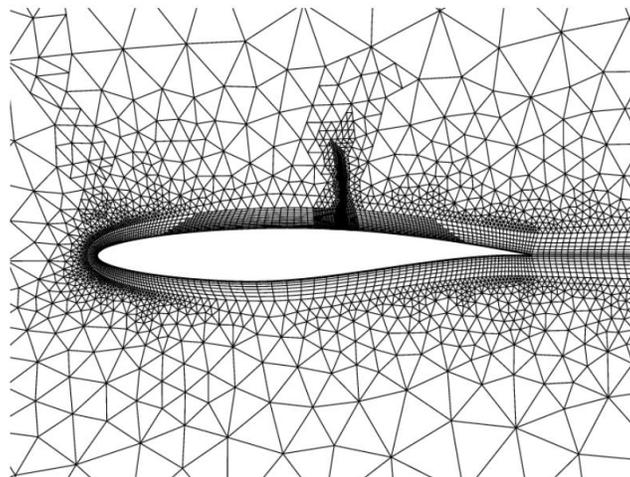


Figura 18. Malla híbrida triangular/cuadrilateral

Fuente: (ANSYS, 2017).

Para el modelo del sedimentador primario se emplea una malla de tipo estructurado, como la presentada en la (Figura 16), con la finalidad de obtener un tiempo computacional eficiente en la simulación, además de mejorar el factor de convergencia y estabilidad en el modelo (ANSYS, 2009).

Para optimizar los tiempos computacionales se emplea una técnica de mallado basada en simplificar los elementos de la representación discreta de la geometría, dividiendo la estructura

en partes geométricas simples, para obtener hexaedros en la mayor parte del dominio. En la (Figura 19), se presentan los tipos de celdas en tres dimensiones generados por el programa ANSYS FLUENT en una representación discreta de una geometría y en la (Figura 20) las identidades geométricas que componen una celda hexaédrica, componente de la representación discreta de la geometría (Sánchez, 2014; ANSYS, 2017).

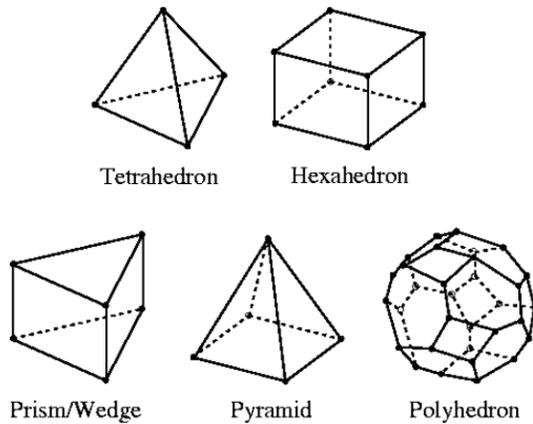


Figura 19. Tipos de celdas para geometrías en tres dimensiones.

Fuente: (ANSYS, 2009)

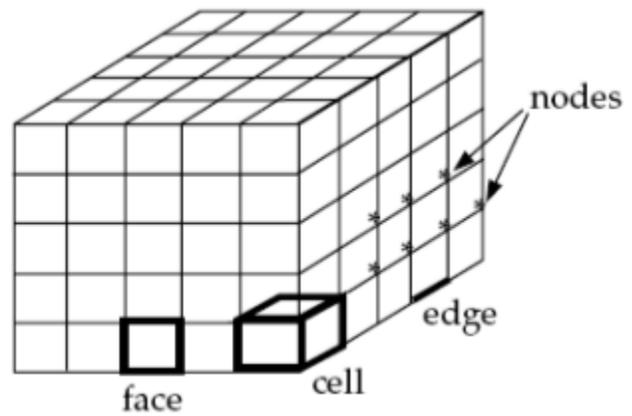


Figura 20. Identidades geométricas de una celda Hexaédrica.

Fuente: (Sánchez, 2014)

Para la presente metodología se emplean tres identidades en la malla las cuales son; caras, celdas líneas y nodos.

3.3. Definición método de solución y modelos

Los métodos de solución como se describió en la sección [2.2.5. Modelación matemática de fluidos](#), emplean algoritmos para resolver las ecuaciones fundamentales. Para el modelo del sedimentador primario se aplica el método numérico conocido como Pressure-Based Solver, el cual se explicó con detalle en la sección [2.2.5.7. Método de solución basado en la presión o Pressure-Based](#).

El método de solución basado en la presión cuenta con dos algoritmos, segregado y acoplado. Para el presente problema se emplea el método segregado teniendo en cuenta que el requerimiento computacional es menor y se ajusta con las herramientas disponibles para el

desarrollo de la presente investigación. En la (Figura 21) se presenta el esquema empleado para la resolución del problema mediante el algoritmo segregado, para el presente estudio.

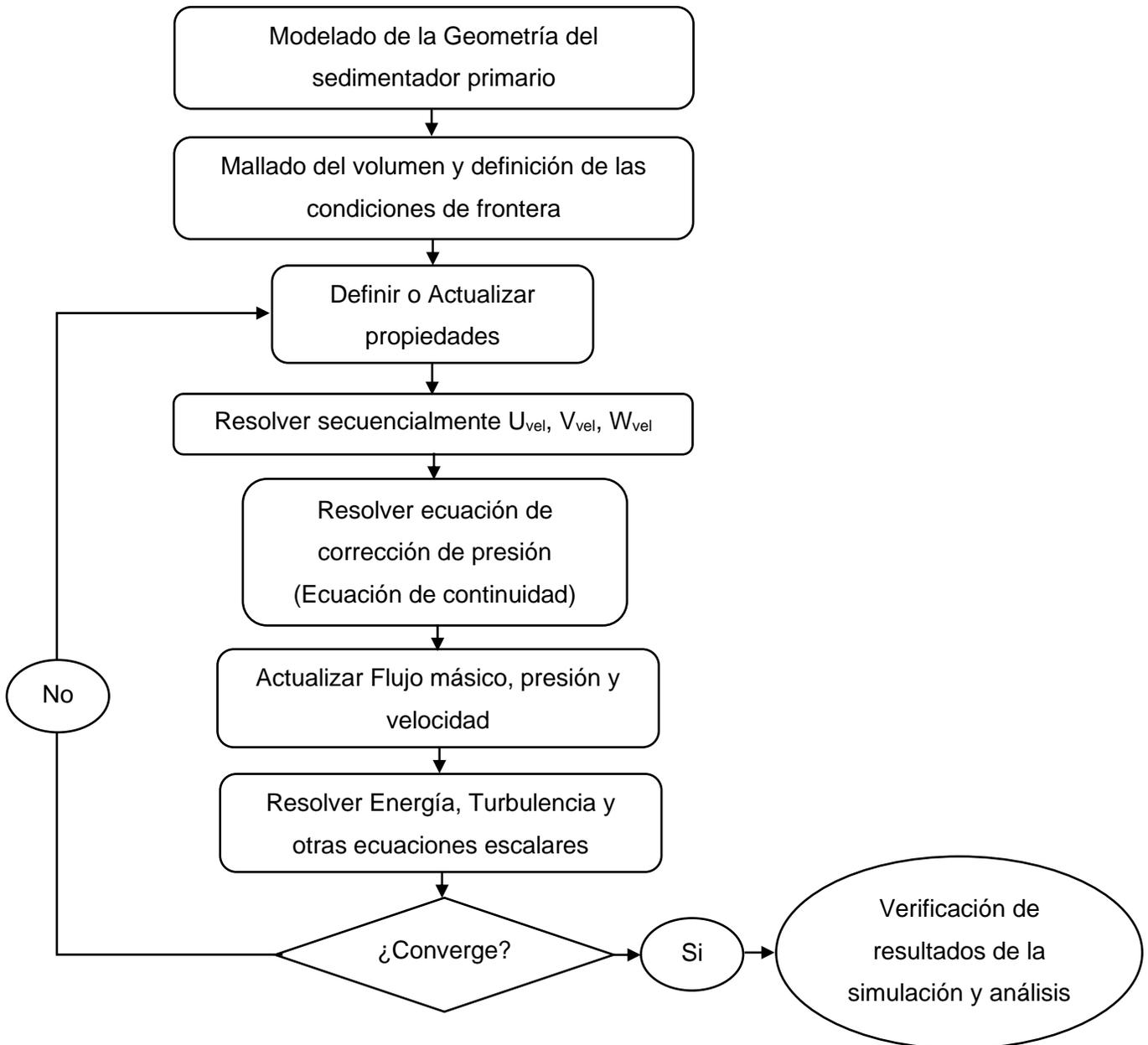


Figura 21. Algoritmo segregado aplicado a la simulación de un sedimentador primario.

Fuente: Adaptado de ANSYS (2017).

Los modelos empleados para la solución del problema mediante el programa ANSYS FLUENT, se enfocan en resolver las ecuaciones de conservación del momento y de la masa.

Para la simulación de la turbulencia, la interacción entre las fases y modelo de energía se emplean los siguientes modelos integrados en el programa ANSYS FLUENT. En la (Tabla 14) se presente en resumen los métodos empleados en la modelación.

Tabla 14. Métodos de modelación de flujo multifásico, turbulencia y energía.

Modelo	Características
Mezcla o Mixture	<p>Para la descripción de la interacción de las fases en el modelo se emplea el modelo de mezcla. Se consideran tres fases en la interfaz sólida y la fase considerada como agua. El modelo se selecciona teniendo en cuenta que el estudio tiene un enfoque Euleriano, teniendo en cuenta las consideraciones descritas en la sección 2.2.5.5. Modelos de flujo multifásico.</p> <p>Las fases se denominan como: Suprame Suprama Sedimentables</p> <p>Cada una de estas fases compone un rango de diámetro de sólidos específico, los cuales se describen con detalle en el capítulo 4. Planteamiento del modelo.</p>
Standard k – ϵ model	<p>El modelo k – ϵ estándar se caracteriza por emplear dos ecuaciones fundamentales, mediante las cuales lleva a cabo la solución de las ecuaciones de transporte, permitiendo determinar de forma independiente la velocidad turbulenta y la escala de longitud (ANSYS, 2017). Este método es empleado de forma amplia para la simulación hidrodinámico de fluidos incompresibles, autores como Enriquez (2019), lo han empleado recientemente.</p>
Ecuación de energía	<p>Para describir el comportamiento de las fases de acuerdo con la temperatura del agua, se asigna el modelo de energía integrado en el programa ANSYS FLUENT. Como se describe en la sección 2.2.5.3. Ecuación de conservación de la energía, se asigna para que el modelo considere la transferencia de energía y su efecto sobre las fases en el proceso de sedimentación primaria estudiado.</p>

Fuente: (ANSYS, 2017).

De acuerdo con los anteriores modelos se establecen los métodos de solución para el desarrollo de la simulación del sedimentador primario estudiado. En resumen, el modelo considera la

interacción entre las fases, la transferencia de energía y los efectos hidrodinámicos generados dentro del sedimentador primario para el estudio de su eficiencia.

3.4. Asignación y definición de las condiciones de frontera

Para la asignación de las condiciones de frontera se toma como referencia la geometría modelada, la cual permite delimitar el problema a resolver y asignar valores preestablecidos a las variables de acuerdo con la condición de borde asignada, permitiendo resolver las ecuaciones de conservación de la masa y del momento (Sánchez, 2014).

Para el modelo del sedimentador primario elaborado, se definen las regiones delimitadas por los muros, las regiones de entrada y salida del agua, además de la región superior que limita la región del dominio computacional.

Teniendo en cuenta lo anterior es posible determinar qué tipo de condición física se aplica a cada una de las zonas que componen el dominio de flujo para el modelo a desarrollar. Considerando lo anterior para la simulación del sedimentador primario se aplican las siguientes condiciones de frontera (Figura 22).

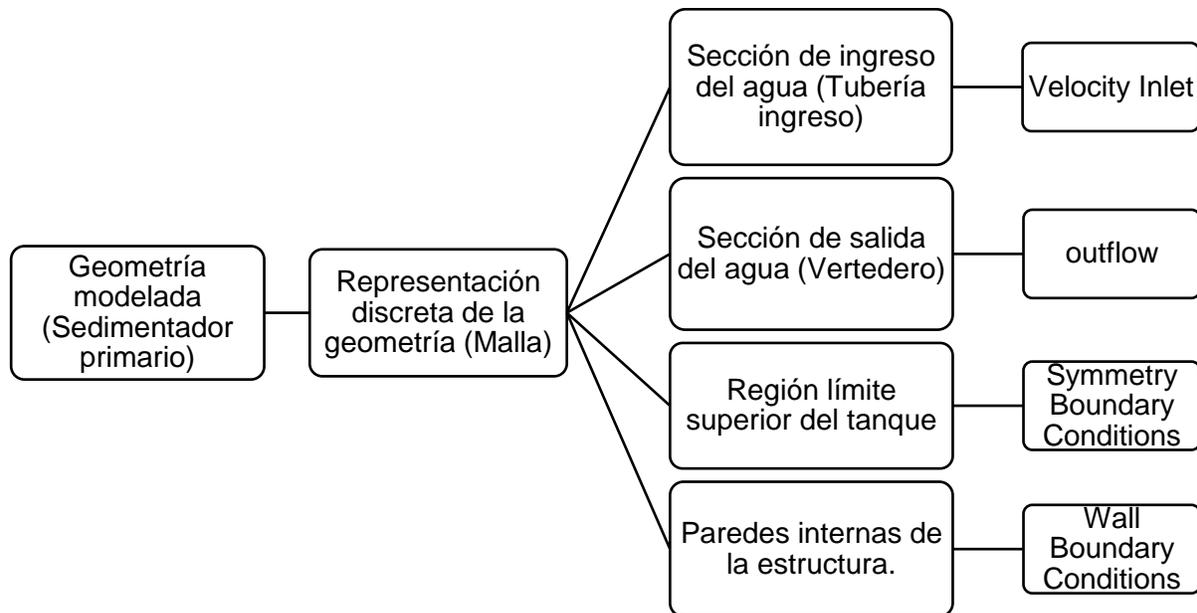


Figura 22. Condiciones de frontera aplicadas para la simulación del sedimentador primario.

Fuente: (ANSYS, 2009)

Teniendo en cuenta las condiciones de frontera del modelo planteado se procede a asignar para cada uno los parámetros como lo son, la tasa de disipación de energía, la energía cinética turbulenta, asignación de las fracciones de volumen, temperatura en el modelo de energía, relación porcentual del flujo saliente respecto a la condición de outflow y velocidad en la sección de entrada. La asignación y descripción específica de estos valores de condición inicial se amplían más adelante en el capítulo 4, en la sección [4.4. Configuración del modelo CFD del sedimentador](#).

3.5. Definición de los esquemas numéricos de solución del modelo

Para la definición de los esquemas numéricos de solución del modelo se tiene en cuenta lo descrito en la sección [2.2.5.6. Métodos de Discretización](#). Teniendo en cuenta lo anterior para el modelo se emplea de forma inicial los esquemas numéricos empleados en otras investigaciones por autores como (De Clercq, 2003; Baraya, 2017; Enriquez, 2019), mediante los cuales se han obtenido resultados sobresalientes en la modelación de unidades de sedimentación. De acuerdo con lo anterior en la (Tabla 15) se presentan los esquemas y métodos numéricos de solución empleados para la simulación del sedimentador primario estudiado.

Tabla 15. Métodos de solución y discretización espacial

Método de solución	Esquema numérico de solución
Acople Presión – Velocidad.	SIMPLE
Discretización espacial	
Gradiente	Mínimos cuadrados basado en celdas
Presión	Ponderado de las fuerzas de cuerpo (Body Force Weighted)
Momentum	Esquema de segundo orden (upwind)
Fracción de volumen	QUICK
Energía cinética turbulenta	Esquema de segundo orden (upwind)
Tasa de disipación E. turbulenta	Esquema de segundo orden (upwind)
Energía	Esquema de segundo orden (upwind)

Fuente: Adoptado de (De Clercq, 2003; Baraya, 2017; Enriquez, 2019).

3.6. Asignación de los parámetros de inicialización

Los parámetros de inicialización del modelo se definen teniendo en cuenta los valores asignados en las condiciones de frontera. Mediante la inicialización el modelo aplica a todo el campo de flujo de forma relativa a las celdas del dominio, los valores iniciales (ANSYS, 2009). Estos valores se asignan para el modelo desde la sección de ingreso del agua al sedimentador primario. Los valores de iniciales a aplicar en el modelo se presentan en la (Figura 23).

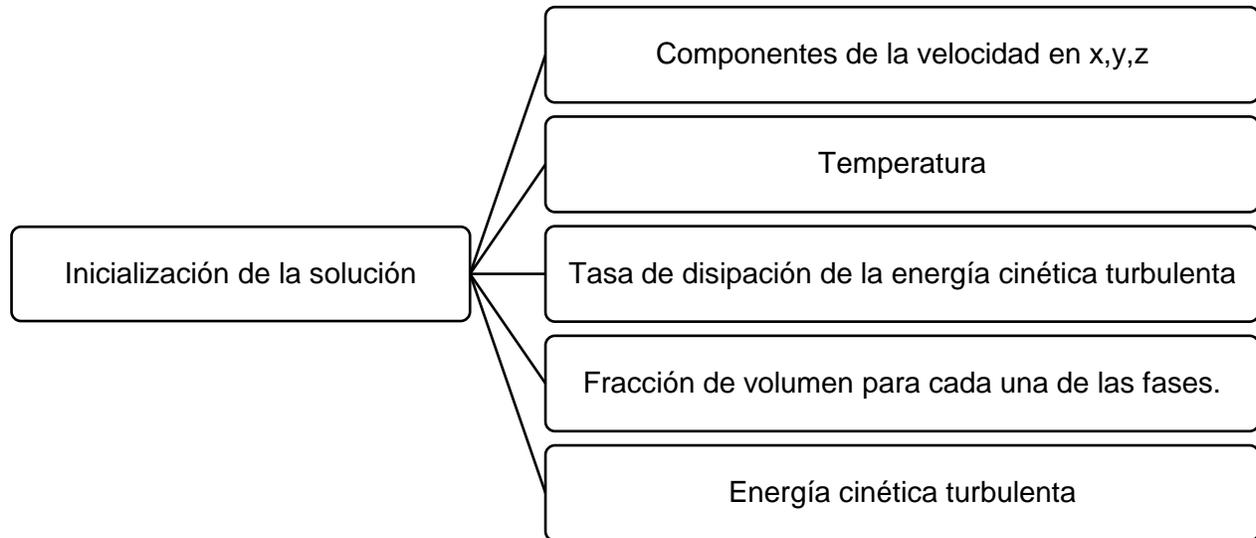


Figura 23. Valores de inicialización asignados para la simulación del sedimentador primario.

Fuente: (ANSYS, 2009)

3.7. Simulación y monitoreo de la convergencia numérica.

La simulación requiere del monitoreo de la convergencia del modelo, para garantizar un comportamiento estable y aceptable de la solución numérica obtenida en cada intervalo de tiempo. Normalmente es recomendable emplear lapsos o pasos de tiempo pequeños, teniendo en cuenta que la solución del problema está directamente relacionada con el tiempo, lo que implica un campo inicial adecuado para evitar la inestabilidad del modelo (ANSYS, 2017).

El criterio de convergencia para el modelo del sedimentador primario estudiado se basa en los valores residuales obtenidos de los resultados de resolución de las ecuaciones de continuidad, la velocidad en los tres componentes vectoriales, la energía cinética turbulenta, la tasa de

disipación de la energía cinética turbulenta y las ecuaciones para la descripción del flujo multifásico asociadas al modelo de mezcla. Estos valores residuales son aceptables cuando alcanzan una magnitud del orden de 10^{-6} a 10^{-4} , siendo este rango adecuado para que el esquema numérico genere convergencia en la solución obtenida (ANSYS, 2017).

Para poder garantizar un mejor resultado en el proceso de monitoreo de la convergencia, se comienza con un paso de tiempo pequeño como lo recomienda en su guía teórica ANSYS (2017), que es incrementado después de realizar algunos pasos con la función de lograr una mejor aproximación de los resultados al campo de presión, todo teniendo en cuenta que los métodos de discretización definidos son de orden superior.

Mediante el monitoreo y ejecución del modelo bajo los pasos descritos con anterioridad, además de la secuencia presentada en la figura (Figura 24), se efectúa el monitoreo y seguimiento de la convergencia numérica durante la simulación del sedimentador primario estudiado.

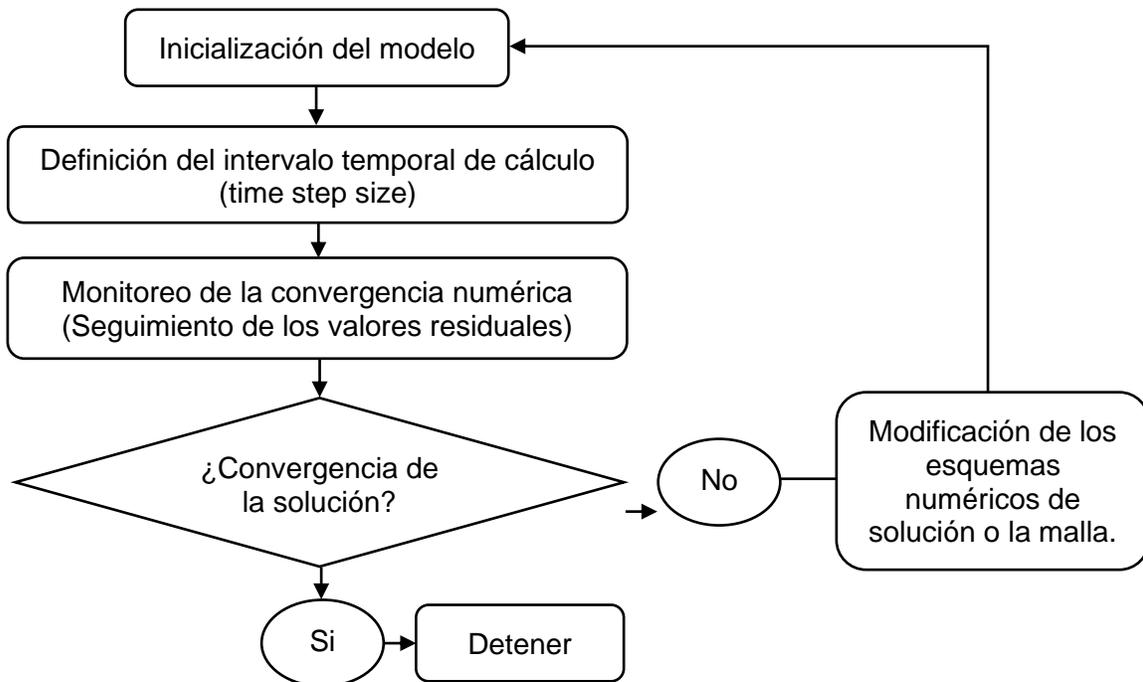


Figura 24. Pasos para el monitoreo de la convergencia numérica.

Fuente: Adaptado de Sánchez (2014).

3.8. Verificación de los resultados de la simulación y análisis

Una vez obtenida la condición de convergencia de la simulación elaborada, es necesario desarrollar un análisis de los resultados obtenidos de tal manera que se evalúen una serie de parámetros y patrones, los cuales son presentados en la (Figura 25).

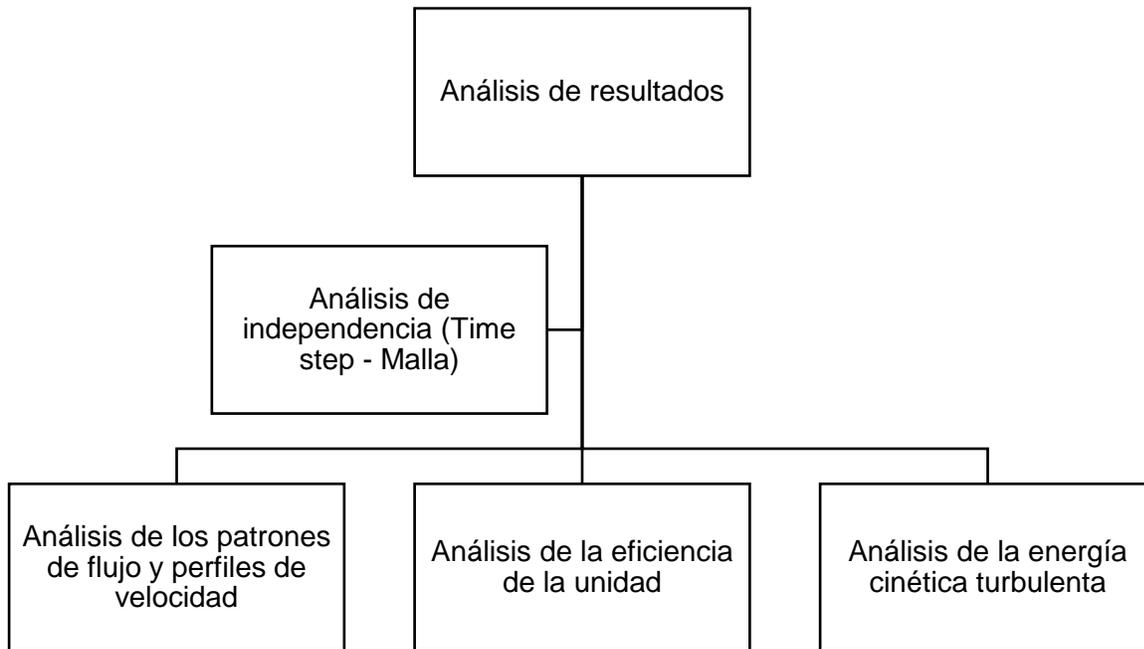


Figura 25. Parámetros y elementos de análisis del modelo elaborado.
Fuente: Adoptado de (De Clercq, 2003; Baraya, 2017; Enriquez, 2019).

3.9. Validación del modelo elaborado

Para efectuar la validación del modelo del sedimentador primario estudiado, es necesario tomar el registro de datos de una unidad a escala real con características similares al proyectado, (geometría, configuración y tipo de agua residual a tratar).

Con el registro de concentraciones en el outlet o salida de una unidad a escala real, se efectúa la comparación de los valores con respecto a los modelados. Para comprobar el grado de ajuste del modelo se estima las eficiencias de acuerdo con los datos modelados y los reales, para de esta manera determinar el porcentaje de error con respecto a los datos esperados. Para efectuar este proceso se emplean los pasos mostrados en la (Figura 26).

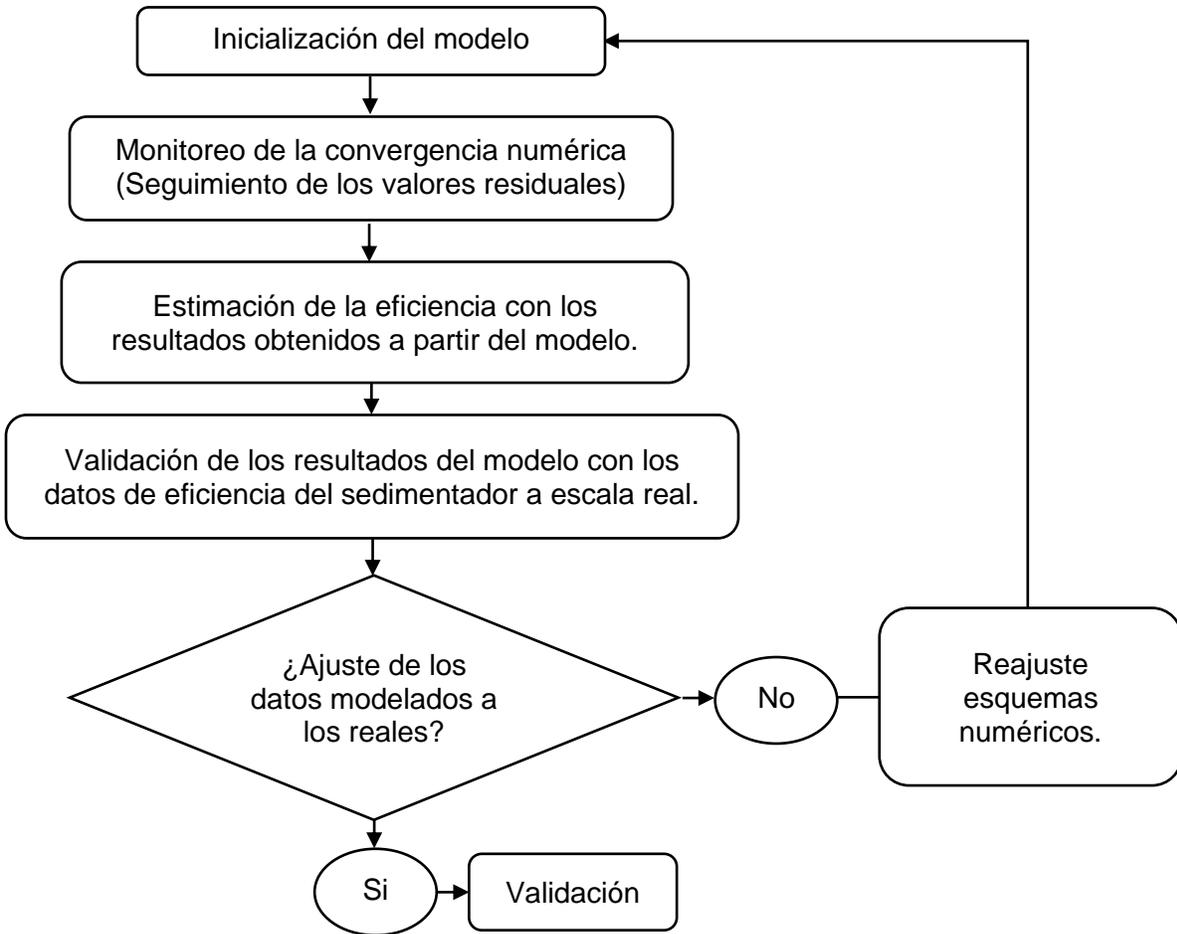


Figura 26. Pasos para la validación del modelo.

Fuente: Adaptado de (De Clercq, 2003; ANSYS, 2009; Enriquez, 2019).

Para el modelo se toma como ajuste un criterio de error porcentual máximo del 30%, de los datos modelados respecto a los datos simulados, tomando las eficiencias como los datos de cálculo del error porcentual. Para la estimación del error se emplea la expresión presentada a continuación.

$$Desviación = \frac{e_r - e_m}{e_r} \cdot 100$$

Ecuación 41

Donde e_r es la eficiencia de la unidad de sedimentación a escala real y e_m es la eficiencia obtenida con base en el modelo elaborado.

Capítulo 4. Planteamiento del modelo del sedimentador primario

El sedimentador primario empleado para la modelación mediante dinámica de fluidos computacional es un sistema en prospección o diseño, el cual será simulado mediante el programa ANSYS FLUENT. Para la modelación del sedimentador primario, se considera una unidad de tratamiento de geometría circular con alimentación en el eje central de la estructura como la mostrada en la sección [2.2.2. Teoría de la sedimentación](#).

Los criterios hidráulicos empleados para el diseño del sedimentador primario están basados en las referencias teóricas de autores como Romero R. J. (1999), Metcalf and Eddy, Inc. (2003), la Comisión Nacional del Agua - CONAGUA (2008) y El Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2017) y su estimación es detallada en el presente capítulo.

Para obtener una respuesta del modelo desarrollado con respecto a los datos de una estructura a escala real y evaluar su grado de validez de forma aproximada, se tomarán los valores de concentración de una unidad a escala real y se ejecutara el modelo generado para la unidad diseñada. Con estos valores se verificará el grado de proximidad a la realidad del modelo desarrollado.

Es importante resaltar que el presente modelo es netamente académico y busca poner en práctica la modelación con CFD para estudiar las eficiencias de remoción de sólidos en la unidad de sedimentación primaria diseñada, por lo que la unidad de referencia solo será empleada para comparar los resultados obtenidos mediante el modelo con las eficiencias obtenidas de una estructura a escala real.

4.1. Dimensionamiento del sedimentador primario de estudio

Para el dimensionamiento del sedimentador primario de estudio se toman los datos de una proyección de población extraída de un municipio del departamento del Tolima, con la cual se efectúa el diseño de la estructura a estudiar.

4.1.1. Población y caudales de estudio

La población de estudio es característica de una zona municipal típica de la región central del departamento del Tolima la cual corresponde a una muestra de la región, tomada como condición inicial para analizar una estructura de sedimentación empleada en el tratamiento de las aguas residuales. En la (Tabla 16), se presentan los caudales estimados.

Tabla 16. Población y caudales empleados para el dimensionamiento del sedimentador primario.

AÑO	Población de Diseño	Dotación Neta l/hab día	Coeficiente de Retorno	Caudal Domestico l/s	Caudal Industrial l/s	Caudal Institucional l/s	Caudal Comercial l/s	Caudal Medio Diario l/s	Qinfiltración l/s	SELECCIÓN DE FACTORES PICO			Caudal Medio para el Sistema (l/s)	Caudal Máximo Horario para el Sistema (l/s)	Caudal Máximo Diario para el Sistema (l/s)	Caudal Máximo Mensual para el Sistema (l/s)
										Factor Máximo Horario	Factor Máximo Diario	Factor Máximo Mensual				
2020	3533	130	0.85	4.52	0.000	0.910	0.390	5.819	2.00	4.00	3.00	1.70	7.81	31.26	23.44	13.29
2021	3594	130	0.85	4.60	0.00	0.91	0.39	5.90	2.00	4.00	3.00	1.70	7.89	31.57	23.68	13.42
2022	3655	130	0.85	4.67	0.000	0.910	0.390	5.974	2.00	4.00	3.00	1.70	7.97	31.88	23.91	13.55
2023	3717	130	0.85	4.75	0.000	0.910	0.390	6.054	2.00	4.00	3.00	1.70	8.05	32.20	24.15	13.68
2024	3781	130	0.85	4.84	0.00	0.91	0.39	6.14	2.00	4.00	3.00	1.70	8.13	32.52	24.39	13.82
2025	3845	130	0.85	4.92	0.000	0.910	0.390	6.218	2.00	4.00	3.00	1.70	8.21	32.85	24.64	13.96
2026	3911	130	0.85	5.00	0.000	0.910	0.390	6.301	2.00	4.00	3.00	1.70	8.30	33.19	24.89	14.11
2027	3977	130	0.85	5.09	0.000	0.910	0.390	6.387	2.00	4.00	3.00	1.70	8.38	33.53	25.15	14.25
2028	4523	130	0.85	5.78	0.000	0.910	0.390	7.085	2.00	4.00	3.00	1.70	9.08	36.32	27.24	15.44
2029	4592	130	0.85	5.87	0.000	0.910	0.390	7.173	2.00	4.00	3.00	1.70	9.17	36.67	27.51	15.59
2030	4662	130	0.85	5.96	0.000	0.910	0.390	7.263	2.00	4.00	3.00	1.70	9.26	37.03	27.78	15.74
2031	4733	130	0.85	6.05	0.000	0.910	0.390	7.354	2.00	4.00	3.00	1.70	9.35	37.40	28.05	15.89
2032	4806	130	0.85	6.15	0.000	0.910	0.390	7.447	2.00	4.00	3.00	1.70	9.44	37.77	28.33	16.05
2033	4880	130	0.85	6.24	0.000	0.910	0.390	7.541	2.00	4.00	3.00	1.70	9.54	38.15	28.61	16.21

AÑO	Población de Diseño	Dotación Neta l/hab día	Coeficiente de Retorno	Caudal Domestico l/s	Caudal Industrial l/s	Caudal Institucional l/s	Caudal Comercial l/s	Caudal Medio Diario l/s	Qinfiltración l/s	SELECCIÓN DE FACTORES PICO			Caudal Medio para el Sistema (l/s)	Caudal Máximo Horario para el Sistema (l/s)	Caudal Máximo Diario para el Sistema (l/s)	Caudal Máximo Mensual para el Sistema (l/s)
										Factor Máximo Horario	Factor Máximo Diario	Factor Máximo Mensual				
2034	4955	130	0.85	6.34	0.000	0.910	0.390	7.637	2.00	4.00	3.00	1.70	9.63	38.53	28.90	16.38
2035	5031	130	0.85	6.43	0.000	0.910	0.390	7.735	2.00	4.00	3.00	1.70	9.73	38.92	29.19	16.54
2036	5109	130	0.85	6.53	0.000	0.910	0.390	7.834	2.00	4.00	3.00	1.70	9.83	39.32	29.49	16.71
2037	5188	130	0.85	6.63	0.000	0.910	0.390	7.935	2.00	4.00	3.00	1.70	9.93	39.72	29.79	16.88
2038	5268	130	0.85	6.74	0.000	0.910	0.390	8.038	2.00	4.00	3.00	1.70	10.03	40.13	30.09	17.06
2039	5350	130	0.85	6.84	0.000	0.910	0.390	8.142	2.00	4.00	3.00	1.70	10.14	40.53	30.39	17.23
2040	5433	130	0.85	6.95	0.000	0.910	0.390	8.248	2.00	4.00	3.00	1.70	10.24	40.94	30.70	17.41
2041	5517	130	0.85	7.06	0.000	0.910	0.390	8.356	2.00	3.99	3.00	1.70	10.35	41.36	31.01	17.59
2042	5603	130	0.85	7.17	0.000	0.910	0.390	8.466	2.00	3.99	2.99	1.70	10.46	41.78	31.33	17.77
2043	5691	130	0.85	7.28	0.000	0.910	0.390	8.578	2.00	3.99	2.99	1.70	10.57	42.21	31.65	17.96
2044	5780	130	0.85	7.39	0.00	0.91	0.39	8.69	2.00	3.99	2.99	1.70	10.69	42.65	31.98	18.15
2045	5869	130	0.85	7.51	0.000	0.910	0.390	8.806	2.00	3.99	2.99	1.70	10.80	43.08	32.30	18.34
2046	5959	130	0.85	7.62	0.000	0.910	0.390	8.922	2.00	3.99	2.99	1.70	10.92	43.53	32.64	18.53
2047	6051	130	0.85	7.74	0.00	0.91	0.39	9.04	2.00	3.99	2.99	1.70	11.04	43.98	32.97	18.73

Fuente: Adaptado de (Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE, 2022)

De acuerdo con los valores anteriores se efectuó el dimensionamiento del sedimentador primario, de tal manera que se tienen en consideración todos los elementos determinados por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2017). De acuerdo con los lineamientos de diseño técnicos, se deben satisfacer una serie de parámetros los cuales para este estudio se toman de acuerdo con el sistema de tratamiento de aguas residuales propuesto. El sistema propuesto mostrado en la (Figura 27), cuenta con un tratamiento primario en el cual se proyecta un sedimentador el cual es objeto del presente estudio.

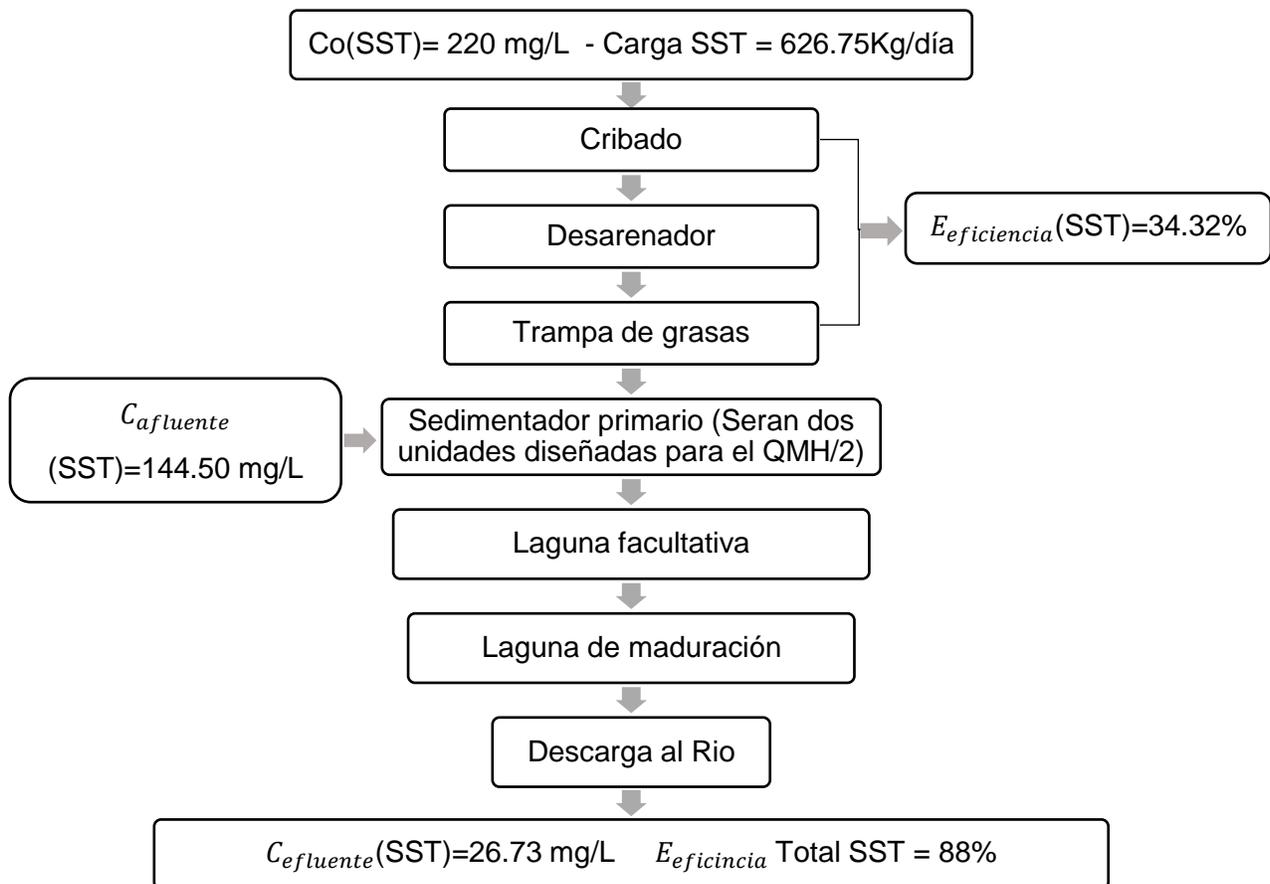


Figura 27. Diagrama de flujo del tratamiento que cuenta con la unidad de sedimentación primaria estudiada.

Fuente: Autor.

El esquema tomado corresponde a un sistema de tratamiento empleado con gran frecuencia en Colombia para la depuración de las aguas residuales municipales como lo menciona en su publicación Romero Rojas (2000). Para la unidad de sedimentación estudiada se espera que la eficiencia de remoción este entre un rango del 40% al 65% como lo establecen diferentes

referencias como, Metcalf and Eddy, Inc. (2003), Comisión Nacional del Agua - CONAGUA (2008) y Romero R. J. (2013).

Para el dimensionamiento de la unidad se efectuó un análisis de concentraciones con la caracterización de referencia y de acuerdo con los parámetros establecidos por la resolución 0330 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2017) y autores como Metcalf and Eddy, Inc. (2003) y Romero R. J. (2013). Una vez efectuado el análisis descrito, se obtuvieron los parámetros presentados en la (Tabla 17) para el diseño y planteamiento del modelo.

Tabla 17. Análisis de concentraciones obtenidas con base en los monitoreos del agua residual cruda.

Paramero	Concentraciones balance	Concentraciones teóricas	Criterio artículo 169 Parágrafo 2° (Resolución 0330)		Valor tomado
			Aporte per cápita para aguas residuales domésticas	Concentración de referencia	
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	163.4	500.00	72 g/hab/día	458 mg/L	500
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	121.8	220.00	36 g/hab/día	229 mg/L	220
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	68	220.00	36 g/hab/día	229 mg/L	220
Grasas y aceites	27	100	-	-	100
S. Sed (ml/L)	1.9	10	-	-	10
Coliformes fecales (NMP/mL)	1.1.E+10	3.E+10	-	-	1.08E+10

Fuente: Autor

En la (Tabla 18) se presentan las concentraciones de entrada y salida para las unidades de tratamiento preliminar y el sedimentador primario.

Tabla 18. Eficiencias de tratamiento de las unidades del sistema

Unidad de Tratamiento	Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L)		Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)		Demanda Química de Oxígeno (mg/L)		Sólidos Sedimentables (ml/L)	
	Efic.	V. salida	Efic.	V. salida	Efic.	V. salida	Efic.	V. salida
Valor Inicial		220		220		500.00		10
Rejillas	5%	209	17%	182.79	5%	475	5%	9.5
Desarenador	5%	198.55	7%	170	5%	451.25	N/A	9.5
Trampa de Grasas	5%	188.62	15%	144.50	3%	437.71	50%	5.0
Sedimentador primaria	30%	132.04	50%	72.25	30%	306.40	75%	1.3

Fuente: Autor

4.1.2. Lineamientos técnicos y normativos

El diseño de las unidades de sedimentación primaria se desarrolló de acuerdo con los criterios establecidos en la resolución 0330 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2017), de acuerdo con lo descrito en el artículo 189, además de los parámetros presentados en la (Tabla 8) por autores como Romero Rojas (2000).

Requisitos mínimos de diseño para sedimentadores primarios:

- Para caudales mayores de 6 L/s es necesario proyectar la construcción de sistemas barrelados auxiliares para facilitar la extracción de los lodos. Deben tener pendiente de fondo entre 5 a 10% para sedimentadores circulares, y 1% para sedimentadores rectangulares.
- Se pueden emplear tanques sedimentadores sin barredor de lodos y con pendientes de entre 45° a 65°, para caudales de diseño menores a 6 L/s.
- Se debe tener en cuenta la construcción de más de un sedimentador para caudales iguales o superiores a 250 l/s.

- Se deben cumplir los siguientes parámetros de diseño presentados en la (Tabla 19):

Tabla 19. Criterios de diseño para sistemas de sedimentación primaria.

Parámetro	Valor	Unidades
Tiempo de retención	1,5 – 2,5	h
Carga hidráulica Superficial caudal máximo horario	60 – 120	m ³ /m ² día
Carga hidráulica Superficial caudal medio diario	24 – 48	m ³ /m ² día
Pendiente de fondo	5 – 10	%
Diámetro	3 – 45	m
Profundidad	3 – 5	m

Fuente: Adoptado Romero Rojas (2000) y del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2017)

4.1.3. Diseño del sedimentador primario

Con base en los parámetros establecidos en los lineamientos normativos y técnicos se elabora el dimensionamiento de la unidad. Teniendo en cuenta que el sistema contara con dos unidades iguales de sedimentación primaria, con capacidad de tratar el caudal máximo horario para el horizonte de diseño (presentado en la Tabla 16) dividido entre dos. En la (Tabla 20) se presentan los valores empleados para el dimensionamiento de las unidades que contarán con la misma configuración y dimensiones.

Tabla 20. Parámetros de diseño sedimentador.

Parámetro	Valor	Unidades
Caudal máximo horario unitario	21.99	L/s
Caudal medio diario	11.04	L/s
Caudal medio diario unitario	5.52	L/s
Número de tanques sedimentadores	2	No
Tipo de vertederos de salida	Triangulares	-
Angulo vertederos de salida	90	Grados
Tiempo de retención unitario	1.3	horas

Fuente: Consultoría

La estructura del sedimentador cuenta con un equipo mecánico instalado en el barrelodos que induce el giro radial del brazo a una velocidad baja, evitando de esta manera la resuspensión de los sólidos sedimentados. La sección de salida del canal perimetral está prevista con una tubería de 8" para conducir el efluente hasta el tratamiento secundario.

El flujo del agua hasta el tanque es en dirección ascendente por la sección central de la estructura.

4.1.3.1. Área superficial

El área superficial de las unidades de sedimentación primaria se calcula con el caudal y la carga hidráulica superficial de diseño establecida de acuerdo con el rango establecido en la (Tabla 19). Teniendo en cuenta lo anterior se estima el área para el caudal máximo horario y para el caudal medio diario. Para la estimación se emplea la ([Ecuación 1](#)).

Carga hidráulica superficial QMH: $60 \frac{m^3}{m^2 d}$ - $120 \frac{m^3}{m^2 d}$

$$A = \frac{Q}{CH} = \frac{21,99 \frac{L}{s} \times \left(\frac{86400 s}{d} \cdot \frac{1 m^3}{1000 L} \right)}{60 \frac{m^3}{m^2 d}} = 31,66 \cong 32 m^2$$

$$A = \frac{Q}{CH} = \frac{21,99 \frac{L}{s} \times \left(\frac{86400 s}{d} \cdot \frac{1 m^3}{1000 L} \right)}{120 \frac{m^3}{m^2 d}} = 15,83 m^2 \cong 16 m^2$$

Se calcula el área también para el caudal medio diario de acuerdo con los rangos establecidos en la resolución 0330 de 2017:

Carga hidráulica superficial Qmd: $24 \frac{m^3}{m^2 d}$ - $48 \frac{m^3}{m^2 d}$

$$A = \frac{Q}{CH} = \frac{5,52 \frac{L}{s} \times \left(\frac{86400 s}{d} \cdot \frac{1 m^3}{1000 L} \right)}{24 \frac{m^3}{m^2 d}} = 19,87 m^2 \cong 20 m^2$$

$$A = \frac{Q}{CH} = \frac{5,52 \frac{L}{s} \times \left(\frac{86400 s}{d} \cdot \frac{1 m^3}{1000 L} \right)}{48 \frac{m^3}{m^2 d}} = 9,93 m^2 \cong 10 m^2$$

Donde:

Q : caudal de diseño unitario $\left(\frac{m^3}{d} \right)$

CH : carga hidráulica superficial $\left(\frac{m^3}{m^2 d} \right)$

En la (Tabla 21) se presenta la relación de áreas en función de las cargas hidráulicas.

Tabla 21. Parámetros de operación.

Parámetro	Caudal diseño	Carga hidráulica	Área
	L/s	m ³ /m ² día	m ²
Caudal máximo horario proyectado	21,99	60	32
		120	16

Parámetro	Caudal diseño	Carga hidráulica	Área
	L/s	m ³ /m ² día	m ²
Caudal medio diario proyectado	5,52	24	20
		48	10

Fuente: Autor.

Con base en lo anterior se evalúa el funcionamiento de un área entre un rango de 10 a 32 m², y se obtiene un área ideal de 30 m², con la cual se cumplen la mayoría de las tasas de desbordamiento para caudales máximos y mínimos evaluados entre el horizonte inicial y final. En la (Tabla 22) se presentan los valores estimados para los distintos caudales estudiados.

Tabla 22. Cargas hidráulicas para caudales máximos y mínimos en el sistema.

Caudal (L/s)	Área unitaria (m ²)	Diámetro (m)	Tasa de desbordamiento superficial (m ³ /m ² d)	Res 0330 - Tasa de desbordamiento superficial (m ³ /m ² d)	Cumplimiento de la Tasa de desbordamiento superficial
21.99	30	6	64	60 - 120	ok
11.04	30	6	33	24 - 48	ok
16.43	30	6	48	60 - 120	no
8.21	30	6	24	24 - 48	ok
16.26	30	6	48	60 - 120	no
8.13	30	6	24	24 - 48	ok

Fuente: Autor.

4.1.3.2. Diámetro del tanque

El diámetro se estima empleando la ([Ecuación 2](#)). En la (Figura 28) se presenta la configuración en planta, mostrando el diámetro interior estimado para el sedimentador primario. Todas las dimensiones de la (Figura 28) están dadas en metros.

$$\phi = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 30 \text{ m}^2}{\pi}} = 6 \text{ m}$$

Donde:

∅: Diámetro del sedimentador primario (m)

A: Área superficial del sedimentador primario (m²)

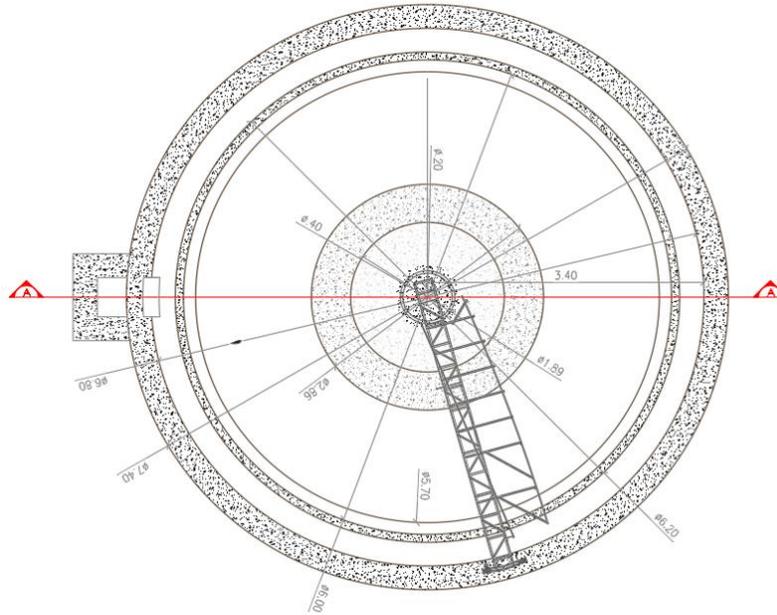


Figura 28. Diámetro efectivo del tanque sedimentador.
Fuente: Autor

4.1.3.1. Volumen del tanque sedimentador

El volumen útil de la estructura se calcula de acuerdo con los valores de la (Tabla 20) y mediante la ([Ecuación 3](#)).

$$V_{Uni} = Q \times TRH = 21,99 \frac{L}{s} \cdot \left(\frac{3600 s}{h} \right) \cdot \left(\frac{1 m^3}{1000 L} \right) \times 1,3 h = 103 m^3$$

Donde:

Q : caudal máximo horario $\left(\frac{m^3}{d} \right)$

TRH : Tiempo de retención hidráulico (horas)

4.1.3.2. Altura útil

La altura útil se estima empleando la ([Ecuación 4](#)). Todas las dimensiones de la (Figura 29) están dadas en metros.

$$h = \frac{V}{A} = \frac{21,99 \frac{L}{s} \times 3,6 \times 1,3 h}{30 m^2} = 3,5 m$$

$$h = \frac{V}{A} = \frac{11,04 \frac{L}{s} \times 3,6 \times 2,6 h}{30 m^2} = 3,5 m$$

Donde:

V : volumen del tanque (m^3)

A : área del tanque (m^2)

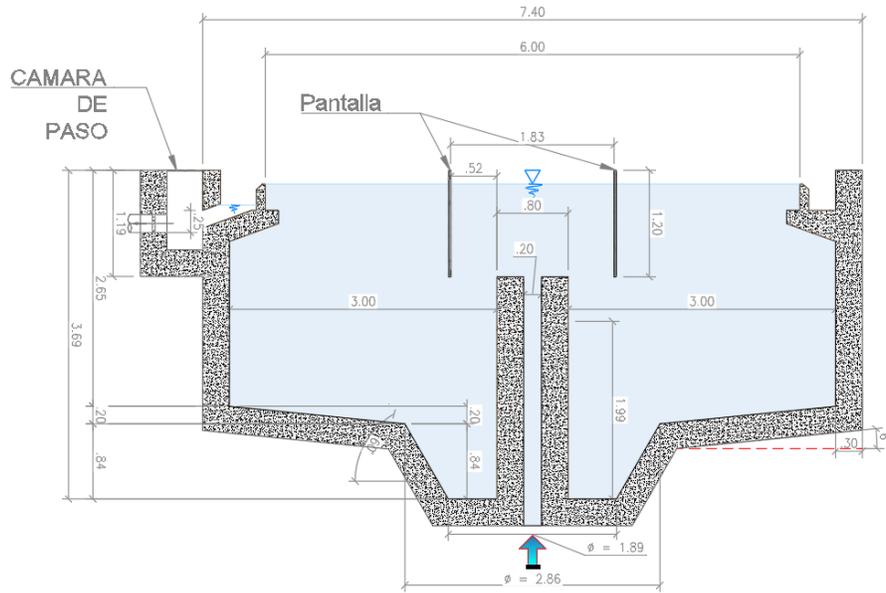


Figura 29. Altura útil y efectiva del sedimentador primario
Fuente: Autor

4.1.3.3. Carga de rebose sobre el vertedero

La carga hidráulica sobre el vertedero se estima mediante la ([Ecuación 5](#)).

$$CV = \frac{Q}{\pi \phi} = \frac{21,99 \frac{L}{s} \times \left(\frac{86400 s}{d} \cdot \frac{1 m^3}{1000 L} \right)}{3,1416 \times 6 m} = 100,8 \frac{m^3}{m d}$$

Donde:

ϕ : diámetro del tanque (m)

Q : caudal máximo horario ($\frac{m^3}{d}$)

El rango de la carga sobre el vertedero puede estar entre 48 a 240 $m^3/m d$, de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua CONAGUA (2008).

4.1.3.4. Longitud del vertedero

La longitud del vertedero se calcula mediante la ([Ecuación 6](#)).

$$LV = \frac{Q}{CV} = \frac{21,99 \frac{L}{s} \times \left(\frac{86400 s}{d} \cdot \frac{1 m^3}{1000 L} \right)}{100,8 \frac{m^3}{m d}} = 18,85 m$$

Donde:

CV : carga de rebose sobre el vertedero $\left(\frac{m^3}{m \cdot d}\right)$

Q : caudal máximo horario $\left(\frac{m^3}{d}\right)$

4.1.3.5. Perímetro

El perímetro del sedimentador se estima de acuerdo con la ([Ecuación 7](#)).

$$P_{Sed} = \pi \phi = 3,1416 \times 6 \text{ m} = 18,85 \text{ m}$$

Donde:

ϕ : Diámetro del sedimentador primario (m)

π : constante adimensional

4.1.3.6. Diámetro tubería de acceso al sedimentador

El diámetro de la tubería de acceso al tanque sedimentador se estima de acuerdo con la ([Ecuación 8](#)).

$$D_{in} = \sqrt{\frac{Q \times 4}{\pi \times v}} = \sqrt{\frac{21,99 \frac{L}{s} \cdot \frac{m^3}{1000 L} \times 4}{\pi \times 0,7 \frac{m}{s}}} = 0,20 \text{ m} \cong 8''$$

Donde:

D_{in} : diámetro tubería ingreso al tanque (m)

v : velocidad en la sección (m/s)

Q : caudal máximo horario $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

4.1.3.7. Dimensionamiento vertederos de salida

Los vertederos de salida son de tipo triangular con apertura de 90°. Los parámetros para el dimensionamiento se presentan en la (Tabla 23).

Tabla 23. Parámetros de diseño vertederos de descarga.

Parámetro	Valor	Unidades
Caudal máximo horario unitario	21.99	L/s
Caudal medio diario unitario	5.52	L/s
Tipo de vertederos	Triangulares	-
Angulo vertederos de salida	90	Grados

Parámetro	Valor	Unidades
Tv (espaciamiento entre vértices)	0,3	m
Altura sección vertedero	0,3	m
Base canal	0,3	m

Fuente: Autor

Los vertederos de descarga se ubican a lo largo de la sección perimetral del tanque de sedimentador, garantizando una descarga homogénea a lo largo de toda la sección.

El sedimentador descarga el agua por el canal perimetral ubicado en la sección interna del tanque como se observa en la figura a continuación, esta estructura evita el escape de los sólidos suspendidos del sedimentador.

Los vertederos se acoplan a la pestaña en concreto ubicada en la parte interior del canal de evacuación del sedimentador. En la (Figura 30) se muestra el punto donde van acoplados los vertederos triangulares y en el detalle C se muestra.

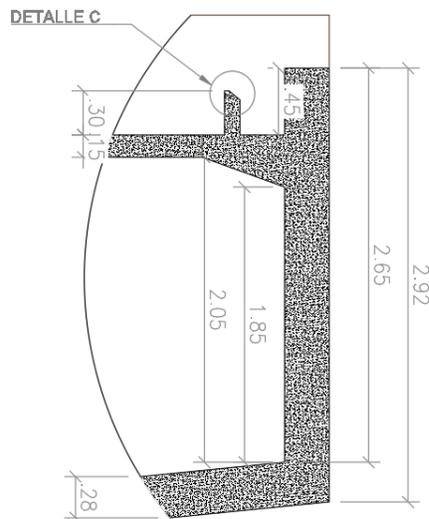


Figura 30. Ubicación del vertedero perimetral del sedimentador primario

Fuente: Autor

La separación entre los vertederos es de 0,3 m y la altura total del vertedero es de 5 cm. La lámina de agua para el caudal máximo horario debe ser inferior a los 5 cm.

En la (Figura 31) se presenta las dimensiones geométricas en metros para los vertederos triangulares.

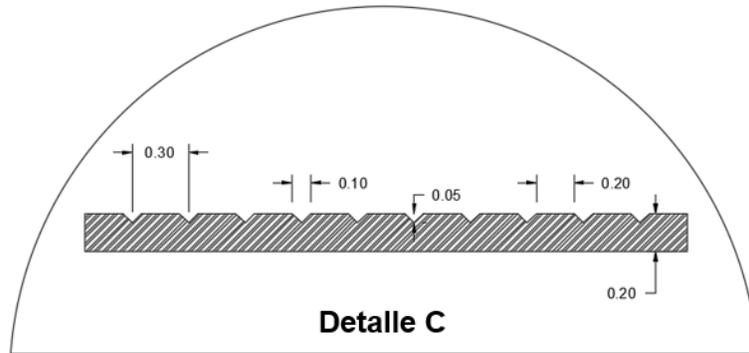


Figura 31. Dimensiones de la sección del vertedero.
Fuente: Autor

4.1.3.8. Numero de vertederos

El número de vertederos se estima de acuerdo con el espaciamiento entre los vértices de los vertederos, y el perímetro del tanque.

$$NV = \frac{P_{Sed}}{TV} = \frac{18,85 \text{ m}}{0,3 \text{ m}} = 63 \text{ vertederos}$$

Donde:

P_{Sed} : perímetro del tanque (m)

TV : distancia entre vértices (m)

4.1.3.9. Tirante en el vertedero triangular

La lámina de agua en la sección del vertedero se estima de la [Ecuación 9](#).

$$H = \left(\frac{Q}{\frac{NV}{1,343}} \right)^{\frac{1}{2,47}} = \left(\frac{21,99 \frac{L}{s} \times \frac{1}{1000}}{\frac{63}{1,343}} \right)^{\frac{1}{2,47}} = 0,0354 \text{ m} = 3,5 \text{ cm}$$

Donde:

Q : caudal máximo horario $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

NV : numero de vertederos

4.1.3.10. Velocidad a través de la sección de los vertederos

La velocidad de flujo a través del área compuesta por los vertederos se estima mediante la [\(Ecuación 10\)](#).

$$v_{SV} = \frac{Q}{A_{SV}} = \frac{21,99 \frac{L}{s} \times \frac{1 m^3}{1000 L}}{\left(\frac{0,035 m \times 0,1 m}{2}\right) \times 63} = 0,20 \frac{m}{s}$$

Donde:

Q : caudal máximo horario $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

A_{SV} : área total sección del vertedero (m^2)

4.1.3.11. Canal de salida

Tomando un ancho de 0,3 metros para la solera y mediante las [\(Ecuaciones 11, 12 y 13\)](#), se calcula el tirante en el canal.

Caudal específico:

$$q_v = \frac{Q}{B} = \frac{21,99 \frac{L}{s} \times \frac{1 m^3}{1000 L}}{0,3 m} = 0,073 \frac{m^3}{s m}$$

Donde:

Q : caudal máximo horario $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

B : ancho solera del canal (m)

Profundidad crítica

$$Y_c = \left(\frac{(q)^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{\left(0,072 \frac{m^3}{s m}\right)^2}{9,81 \frac{m}{s^2}}\right)^{\frac{1}{3}} = 0,081 m$$

Donde:

q : caudal máximo horario $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

B : ancho del canal (m)

g : aceleración gravitacional $\left(\frac{m}{s^2}\right)$

Lámina de agua en el canal

$$HQ = \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{(B \cdot H)^{\frac{5}{3}}}{(B + 2H)^{\frac{2}{3}}} \right) \cdot s^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{0,013} \cdot \left(\frac{(0,3 \cdot H)^{\frac{5}{3}}}{(0,3 + 2H)^{\frac{2}{3}}} \right) \cdot (0,001)^{\frac{1}{2}} = 0,164 \text{ m} \cong 0,2 \text{ m}$$

Donde:

n : número de Manning

B : ancho solera del canal (m)

H : lámina de agua en el canal (m)

s : pendiente del canal (m/m)

Q : caudal máximo horario $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$

Tomando en cuenta la sección del canal se decide dejar un borde libre de 0,10 m para una altura total de 0,30 m.

4.1.3.12. Dimensionamiento tolva de acumulación de lodos

El dimensionamiento de la tolva se efectúa mediante las ([Ecuaciones 14, 15, 16 y 17](#)). Complementario a lo anterior es necesario conocer el diámetro de la tubería de acceso a la unidad, el espesor de los muros la pendiente de la tolva y el ángulo de fondo del depósito de los sólidos sedimentados.

Diámetro menor

$$D_{in} = 0,2 \text{ m}$$

$$e_{in} = 0,3 \text{ m}$$

$$\phi_{min} = 2b + (D_{in} + e_{in}) = 2(0,54) + (0,2 + 0,3 * 2) = 1,89 \text{ m}$$

Donde:

D_{in} : diámetro tubería de entrada (m)

e_{in} : espesor de recubrimiento de la tubería de entrada (m)

b : ancho del fondo de la tolva

Diámetro mayor

$$\text{Pendiente} = 10\% = 5,71^\circ$$

$$\text{Angulo de la tolva} = 60^\circ$$

$$\phi_{mayor} = \left(\frac{H}{\tan(\alpha)} \times 2 \right) + \phi_{min} = \left(\frac{0,84 \text{ m}}{\tan(60)} \times 2 \right) + 1,89 \text{ m} = 2,86 \text{ m}$$

Donde:

H : altura de la tolva de lodos (m)

α : ángulo de la tolva de lodos (m)

ϕ_{min} : diámetro mínimo de la tolva de lodos (m)

El diámetro mayor de la tolva tendrá una inclinación de 60 grados y la sección inclinada desde el perímetro del tanque hasta el diámetro mayor de la tolva una inclinación de 5,71 grados, como se presenta en la (Figura 32).

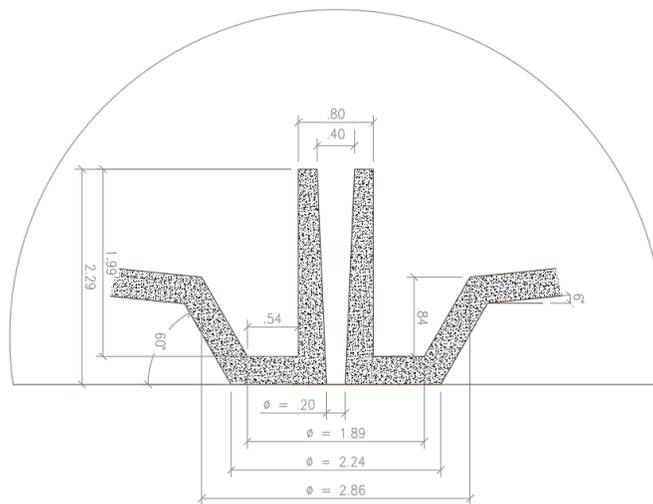


Figura 32. Dimensiones de la sección de la tolva de lodos

Fuente: Autor

Profundidad recta del fondo

Mediante la (Ecuación 16) se efectúa la estimación.

$$P_f = \tan(\beta) \times \left(\frac{\phi - \phi_{mayor}}{2} \right) = \tan(5,71^\circ) \times \left(\frac{6,8 \text{ m} - 2,86 \text{ m}}{2} \right) = 0,20 \text{ m}$$

Donde:

ϕ : diámetro del tanque sedimentador (m)

β : ángulo del fondo del tanque (m)

ϕ_{max} : diámetro máximo de la tolva de lodos (m)

En la (Figura 33) se presenta la configuración geométrica de la tolva de fondo y el depósito para acumulación de los sólidos sedimentados.

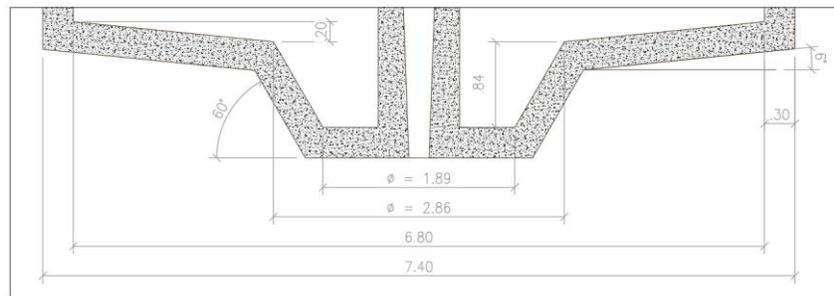


Figura 33. Dimensiones de la sección de fondo del tanque
Fuente: Autor

Volumen de la tolva

El volumen de la tolva de lodos se estima con base en la (Ecuación 17). Para la sección de fondo se toma una altura definida en 0,84 m.

$$V_{Tolva} = \left(\frac{\pi H}{3} \left(\frac{\phi_{mayor}^2}{2} + \frac{\phi_{mayor}}{2} \times \frac{\phi_{min}}{2} + \frac{\phi_{min}^2}{2} \right) \right) - \left(\frac{D_{in} + e_{in}}{2} \right)^2 (\pi H)$$

$$V_{Tolva} = \left(\frac{(\pi) 0,84 \text{ m}}{3} \cdot \left(\frac{(2,86 \text{ m})^2}{2} + \frac{2,86 \text{ m}}{2} \times \frac{1,89 \text{ m}}{2} + \left(\frac{1,89 \text{ m}}{2} \right)^2 \right) - \left(\frac{(0,2 \text{ m} + (0,3 \text{ m})(2))}{2} \right)^2 (\pi) 0,84 \text{ m} \right)$$

$$V_{Tolva} = 3,35 \text{ m}^3$$

Donde:

ϕ_{min} : diámetro mínimo de la tolva de lodos (m)

H : altura de la tolva de lodos (m)

ϕ_{max} : diámetro máximo de la tolva de lodos (m)

D_{in} : diámetro tubería de entrada (m)

e_{in} : espesor de recubrimiento de la tubería de entrada (m)

Para garantizar la correcta operación del sistema de tratamiento se dispondrá de dos tanques con las mismas características de tal manera que el sistema de tratamiento pueda operar con un tiempo de retención adecuado para el caudal máximo, poder entrar en mantenimiento con cualquiera de las dos unidades de sedimentación, u operar bajo cualquier condición crítica que se presente. Para la modelación de la unidad se considera el análisis

4.2. Modelación de la geometría del sedimentador primario

Para la elaboración de la geometría se empleó el modelado preliminar efectuado en AutoCAD, basado en el dimensionamiento presentado en la sección [4.1.3. Diseño del sedimentador primario](#). En la (Figura 34) se muestra la estructura del sedimentador primario (muros, canal de salida y conducto de acceso) y en la (Figura 35) se presenta la sección interior de flujo en el sedimentador primario.



Figura 34. Estructura sedimentador primario



Figura 35. Región interior de flujo

En la (Figura 36) se presentan las dimensiones empleadas para el desarrollo de la geometría en el programa ANSYS FLUENT.

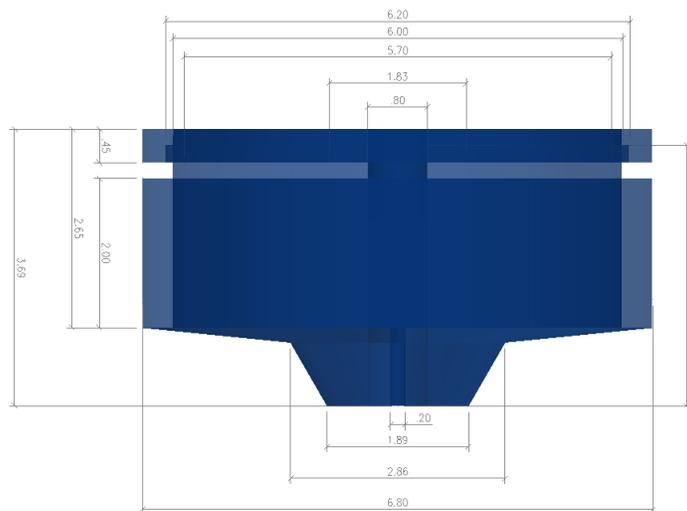


Figura 36. Dimensiones región interior de flujo del sedimentador primario

A partir del modelado preliminar efectuado en AutoCAD y el dimensionamiento del sedimentador primario se empleó el programa DesignModeler, incluido en el software ANSYS FLUENT, como herramienta para elaborar la geometría en 3D de la estructura de interés. Con el objetivo de reducir la complejidad del modelo y el tiempo computacional se decidió simplificar la estructura de ingreso del agua, y en la salida se decide eliminar los vertederos triangulares típicos empleados en la construcción de las unidades de sedimentación primaria. Sin embargo, se incluyeron en la geometría otros componentes relevantes para el funcionamiento de la unidad como son las pantallas deflectoras. En la (Figura 37) se presenta la geometría interior en 3D del sedimentador primario y sus partes constituyentes.

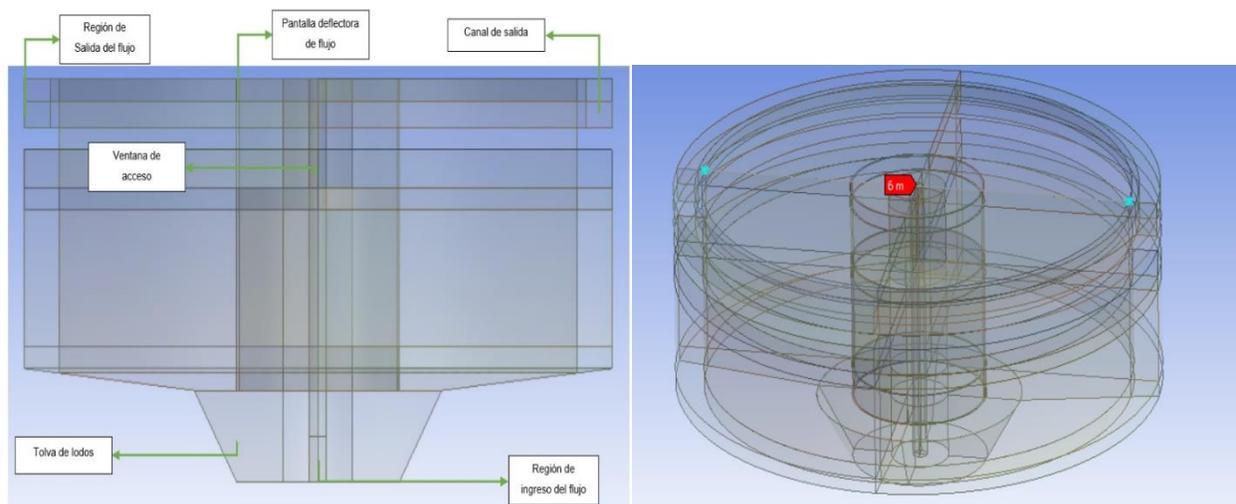


Figura 37. Geometría desarrollada en DesignModeler del interior del sedimentador

Como se presenta en la (Figura 37), la geometría desarrollada presenta un grado de complejidad alto, por lo que los volúmenes de control que por defecto conformarían la malla serían tetraédricos. Considerando lo anterior, la malla generada estaría caracterizada por tener un bajo grado de calidad, provocando inestabilidad numérica en el desarrollo de la simulación.

Con el objetivo de evitar un comportamiento inestable en el modelo, se decidió buscar que la malla generada fuese simétrica y conformada principalmente por volúmenes hexaédricos, que permitieran generar un mayor grado de estabilidad durante la simulación.

Para generar volúmenes hexaédricos en la geometría desarrollada se optó por reducir la complejidad geométrica del sedimentador primario, mediante la división de la región de flujo en elementos de geometría regular. Por ejemplo, la región denominada como tolva de lodos se

dividió en diferentes elementos de geometría más regular como; cilindros, anillos, conos truncados y elementos que permiten crear volúmenes de control hexaédricos.

Para la región de la pantalla deflectora del flujo, la tolva, la ventana de acceso y la tubería de acceso se efectuaron divisiones que extienden los sólidos de forma simétrica a lo largo de la región de flujo de tal forma que el contacto entre los sólidos de geometría sencilla que componen el sólido tengan un contacto continuo a lo largo del dominio computacional.

La elaboración de la división y configuración de la geometría de la manera descrita permite que los vértices de los elementos de control coincidan entre si constituyendo una malla estructurada como lo describe en su investigación Enriquez (2019). Mediante una malla estructurada se obtiene la convergencia de la simulación en un intervalo de tiempo menor, en comparación con el tiempo requerido para una malla no estructurada (Enriquez, 2019).

En las (Figuras 38, 39 y 40) se identifican las partes en las que fue dividida la geometría.

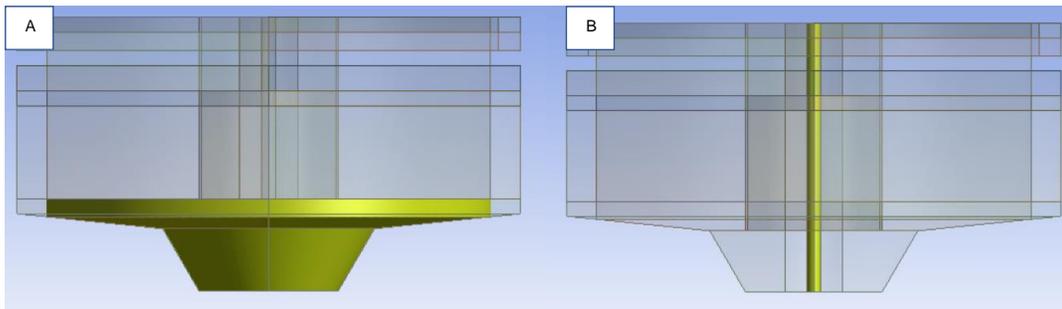


Figura 38. Partes A y B de la geometría.

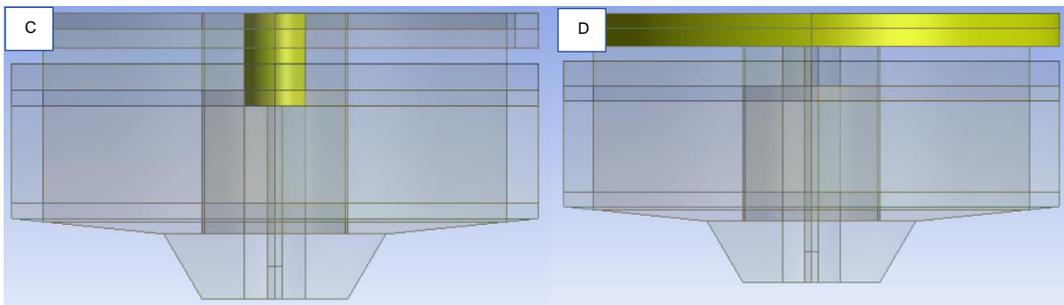


Figura 39. Partes C y D de la geometría.

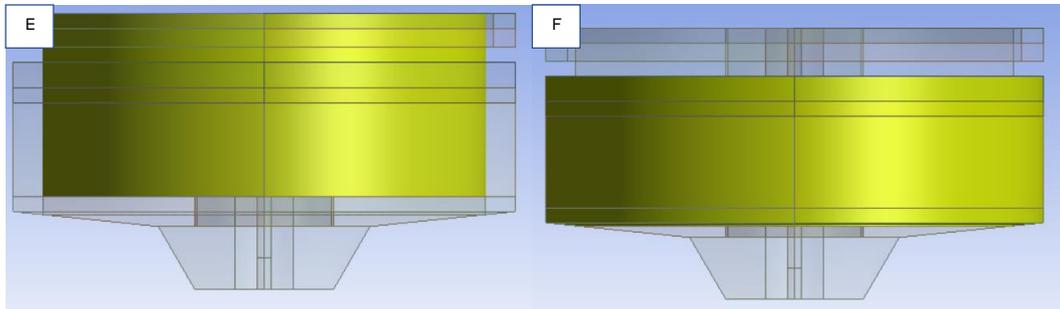


Figura 40. Partes E y F de la geometría.

La geometría presentada se subdividió en seis partes identificadas de la siguiente manera:

- A- Tolva
- B- Tubería de acceso
- C- Ventana de carga
- D- Región de salida
- E- Interior de flujo
- F- Exterior de flujo

Las zonas subdivididas fueron configuradas por sólidos más pequeños y en resumen se presenta el número total de cuerpos con el que cuenta cada una de las partes de la geometría.

- A- Tolva – 16 cuerpos
- B- Tubería de acceso – 16 cuerpos
- C- Ventana de carga – 12 cuerpos
- D- Región de salida – 12 cuerpos
- E- Interior de flujo – 40 cuerpos
- F- Exterior de flujo – 16 cuerpos

Con base en el número de cuerpos creados para la discretización de la geometría, se optimiza el proceso de generación de los volúmenes finitos en el proceso de mallado. Para la geometría en total se generaron 112 sólidos los cuales permiten garantizar una calidad ortogonal y una simetría adecuadas para el desarrollo del modelo computacional.

4.3. Discretización de la geometría (Mallado)

Para la discretización de la malla del modelo elaborado se emplea el método por defecto generado por el módulo de Meshing de ANSYS FLUENT. El nivel de detalle de la malla y su calidad afectan de manera directa la convergencia del modelo, por lo que en el estudio se efectúa el análisis de independencia de la malla desarrollando tres diferentes discretizaciones y comparando el resultado obtenido en la simulación del sistema.

También es de suma importancia considerar, que el número de elementos que la malla contenga definirá si el tiempo de cálculo computacional para dar solución al modelo es mayor o si por el contrario es menor.

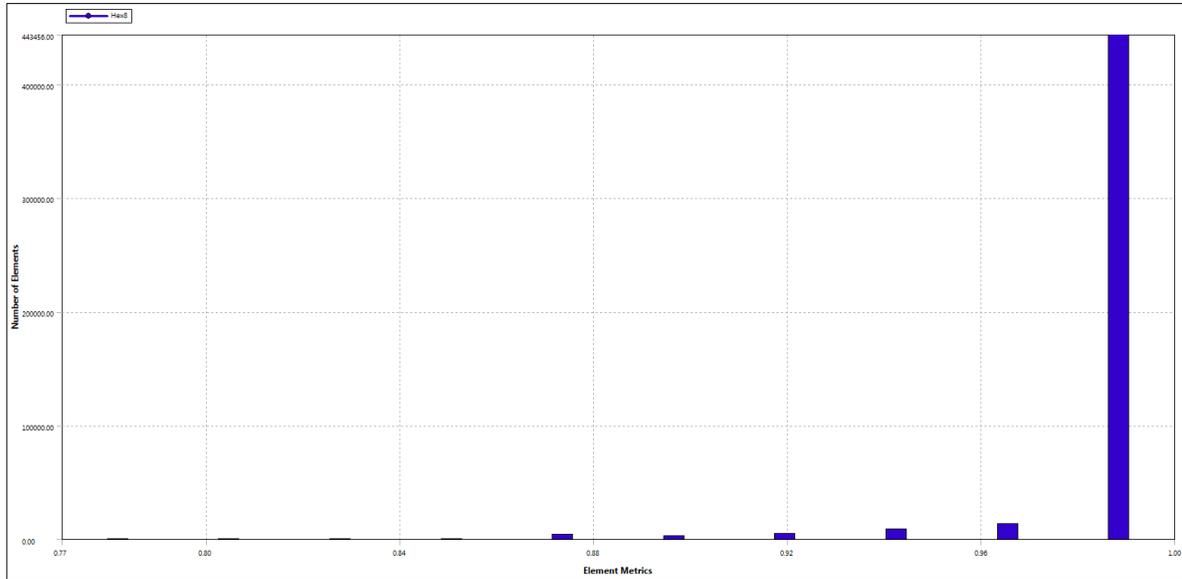
La malla inicial generada por defecto por el por el módulo de Meshing de ANSYS FLUENT, está compuesta por elementos geométricos hexaédricos de buena calidad ortogonal, sin embargo, en la región de transición entre las paredes del tanque y la tolva se generan algunos elementos gruesos de baja densidad, en regiones circulares o esféricas con una distorsión baja de la geometría y una reducción en la calidad de la malla para la simulación.

Para mejorar la calidad ortogonal de la malla en la región inferior de la tolva, las regiones circundantes al perímetro del vertedero de descarga y la tubería de acceso a la estructura, se desarrollaron discretizaciones de la geometría con un mayor número de elementos, obteniendo volúmenes hexaédricos con mayor simetría. Las malla generadas se clasificaron de acuerdo con el número de elementos que las conforman, sus principales características se presentan en la (Tabla 24).

Tabla 24. Características mallas generadas.

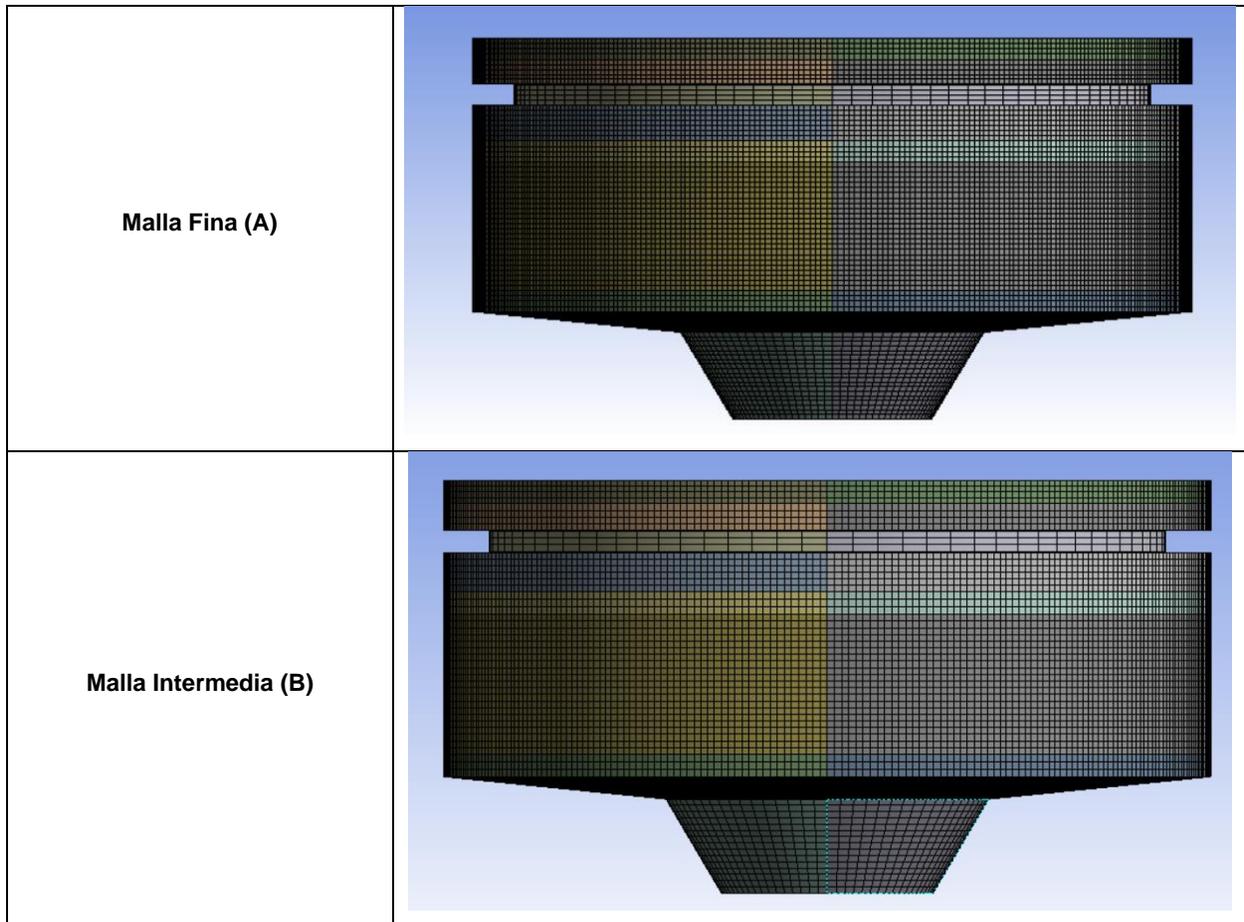
OBSERVACIÓN	MALLA FINA	MALLA INTERMEDIA	MALLA GRUESA
Calidad Ortogonal Mínima	0.7701	0.7701	0.76968
Clasificación de la malla según la calidad ortogonal	Muy buena	Muy buena	Buena
Asimetría (Skewness) Máxima	0.41436	0.41436	0.41469
Clasificación de la malla según la asimetría de los elementos	Muy buena	Muy buena	Muy buena
Tipo de elementos	Hexaedros	Hexaedros	Hexaedros
Cantidad total de elementos	474864	282976	143364

En la (Gráfica 1), se presenta la calidad ortogonal para la malla fina.



Gráfica 1. Fracción de volumen partículas de 80 µm

En la (Figura 41) se muestran las tres mallas generadas para la elaboración del modelo.



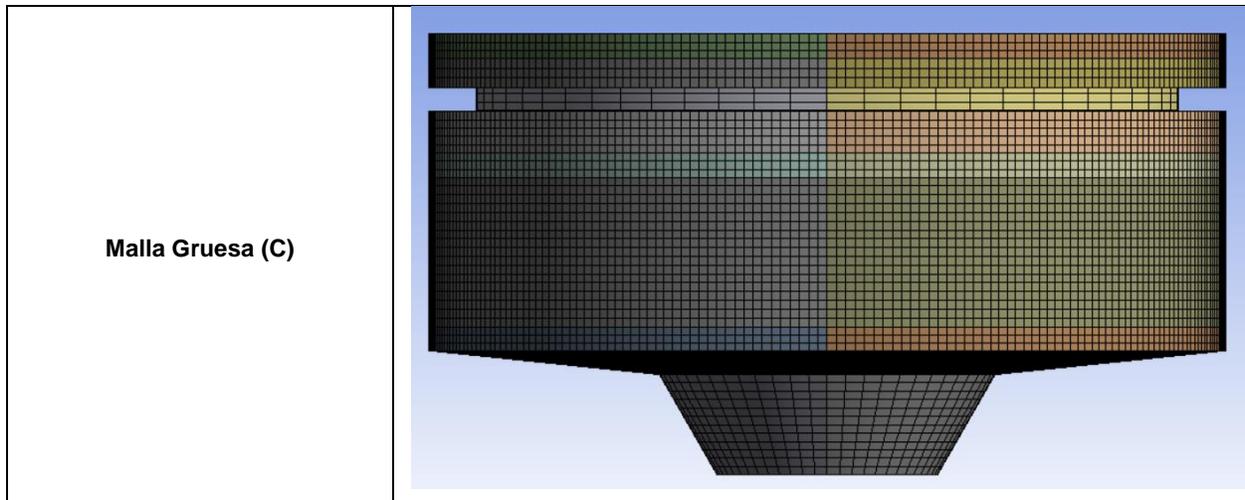


Figura 41. Mallas generadas para la modelación (A. Malla Fina, B. Malla intermedia y C. Malla gruesa).

De acuerdo con los estudios desarrollados por autores como Enriquez (2019), con valores de calidad ortogonal superiores a 0.7, se obtienen discretizaciones geométricas de buena calidad. Otro parámetro empleado por el programa para medir la calidad de la malla es el grado de asimetría, el cual presenta valores inferiores a 0.5 para las tres mallas generadas.

En lo que hace referencia al número de elementos se toman los rangos presentados, teniendo en cuenta que una vez evaluado un número superior de elementos es decir superior a los 500.000 elementos no se evidencian variaciones representativas en los resultados. Este tipo de análisis fueron efectuados para estructuras de sedimentación por investigadores como Karpinska & Bridgeman (2015).

Posterior a la generación de las mallas para el análisis del modelo, se efectuó la definición de las condiciones de frontera, teniendo en consideración las regiones de entrada y salida del flujo, además del límite superior del sedimentador.

AnsysFluent permite definir cuáles son las condiciones de frontera y simetrías. Para el caso puntual del presente modelo se definió una región de entrada o inlet, una región de salida u outlet y una región de simetría o Symmetry. En la (Figura 42) se muestran las regiones definidas en la geometría.

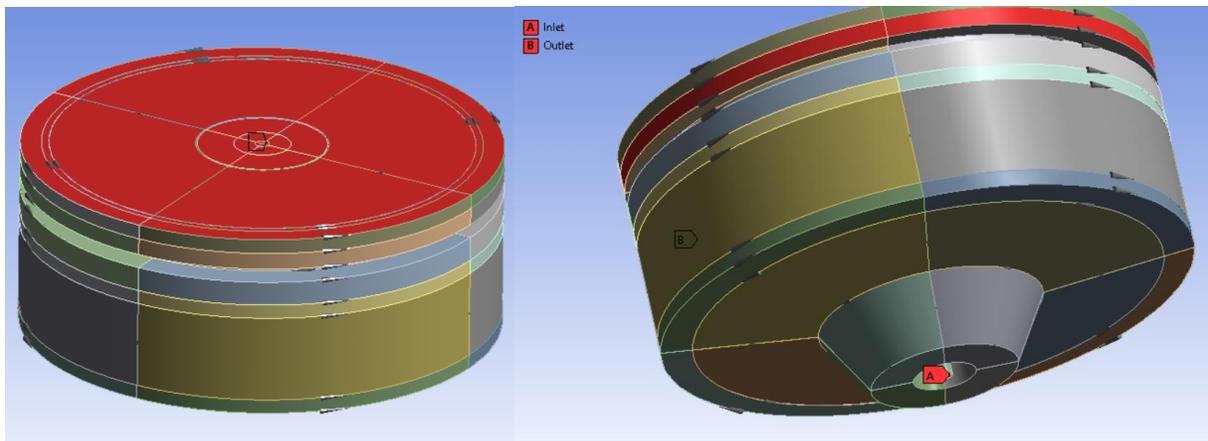


Figura 42. Regiones de frontera para el modelo.

Para el modelo se definieron tres condiciones de frontera, la primera es la región de ingreso del agua a la estructura de sedimentación, denominada como inlet o entrada, la segunda región es definida como outlet o salida, y es la región por donde el flujo sale en dirección radial del tanque sedimentador. Por último, está la región superior que se define como una superficie de simetría o Symmetry, mediante la cual el modelo asume que la velocidad tiene un máximo y su derivada toma un valor de cero, por lo que la región es interpretada por el modelo como el límite de la región de flujo.

4.4. Configuración del modelo CFD del sedimentador primario

Mediante la geometría diseñada y modelada, las mallas generadas para el análisis de independencia y las condiciones de frontera definidas, se procede a configurar el modelo CFD. Como tal, para el desarrollo del modelo se emplea el sistema de análisis de ANSYS FLUENT, denominado como Fluid Flow (Fluent), en su versión 21.2.

Para la configuración del modelo se selecciona el análisis de una geometría en tres dimensiones en la interfase de inicialización, con un factor de doble precisión para el cálculo de la solución.

Se empleó el módulo de Check para revisar que la malla se precargara correctamente en el Fluid Flow, además de verificar que las dimensiones leídas por el software fueran las correctas. El programa precarga las unidades métricas definidas por el usuario, de tal manera que la modelación genere resultados correctos.

En la (Figura 43) se presenta la configuración, geometría y malla cargada por el sistema de análisis Fluid Flow.

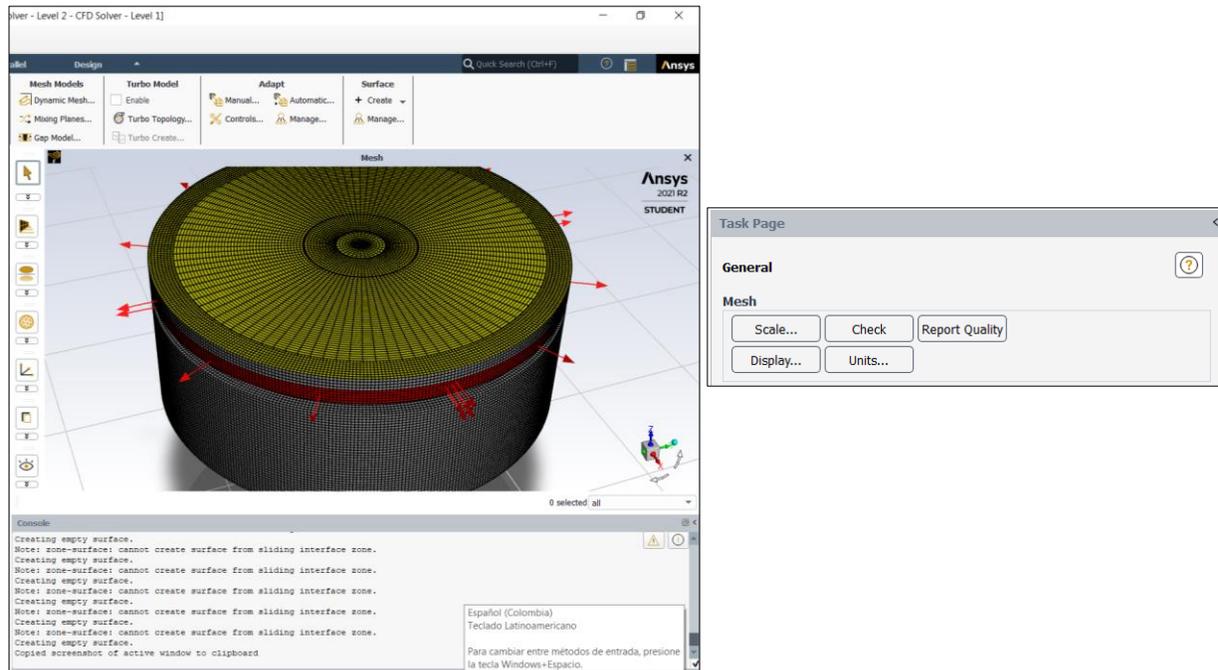


Figura 43. Geometría y malla cargadas cargada por el sistema de análisis Fluid Flow.

4.4.1. Configuración del módulo Solver

Para la correcta ejecución del modelo es determinante definir la configuración del solver, para establecer si el modelo se desarrollará en estado permanente o no permanente, si la formulación de la velocidad es absoluta o relativa y el esquema del modelo, si es basado en la presión o en la densidad del fluido.

El software, permite seleccionar el tipo de esquema que mejor se ajusta al problema en función del tipo de fluido a modelar. Una característica de gran importancia al momento de seleccionar el modelo es definir si se trabaja con un fluido compresible o incompresible. Se han realizado estudios que han permitido establecer que en los sedimentadores y en general de estructuras de tratamiento del agua el flujo se considera incompresible pues la densidad del fluido permanece aproximadamente constante en todo el dominio del flujo.

De acuerdo con los estudios realizados en fluidos incompresibles, el esquema Pressure-Based, es el apropiado, mientras que el Density-Based, fue desarrollado para flujos compresibles, donde la densidad del fluido varía lo largo de la región de flujo (ANSYS, 2017).

Para la investigación desarrollada, se tomó como esquema basado en la presión (Pressure-Based), teniendo en cuenta que el agua residual doméstica es un fluido incompresible, además de considerar de acuerdo con lo descrito por Enriquez (2019) en su investigación que el esquema basado en la densidad (Density-Based) no es compatible con los modelos multifásicos de mezcla y euleriano, los cuales han sido empleados para la modelación de las fases que intervienen en el proceso de sedimentación en aguas residuales municipales.

El solver basado en la presión está configurado de tal manera que permite emplear dos métodos o algoritmos de cálculo para resolver el conjunto de ecuaciones que definen el sistema objeto del presente estudio. Considerando lo anterior el modelo cuenta con los esquemas segregado y acoplado los cuales fueron descritos en el numeral [2.2.5.7. Método de solución basado en la presión o Pressure-Based](#).

Como en el numeral se describe, estos esquemas se diferencian en el procedimiento de resolución de las ecuaciones de momento y de continuidad que es secuencial en el caso del segregado y de forma simultánea para el acoplado (ANSYS, 2017). El esquema acoplado permite obtener una convergencia más rápida, sin embargo, requiere de herramientas computacionales de mayor capacidad para que el tiempo de resolución del problema sea bajo. Considerando lo anterior el modelo se desarrolló mediante el esquema segregado.

En lo que respecta las opciones dadas para la modelación de la velocidad de desplazamiento del fluido a lo largo del dominio o región de estudio en la estructura del clarificador, el software ofrece dos opciones, la primera se denomina absoluta, la cual permite modelar el fluido cuando no existe una mezcla o movimiento de alto grado en el fluido, la segunda permite describir el escenario opuesto donde se presentan movimientos fuertes o gradientes de mezcla representativos en el comportamiento del fluido en la región de interés del modelo (ANSYS, 2017).

Para el modelo desarrollado se aplica la formulación de velocidad absoluta, teniendo en cuenta que en el sedimentador las velocidades son bajas y no se genera mezcla o movimientos bruscos con el objetivo de aumentar la eficiencia en el proceso de sedimentación de las partículas.

Se toma la gravedad como variable de vital importancia debido a la física del proceso de sedimentación y se toma el modelo en estado no permanente teniendo en cuenta que la concentración de las partículas en las fases varía en función del tiempo, al igual que los parámetros hidrodinámicos.

En la (Figura 45) se presenta en resumen la configuración seleccionada para el modelo.

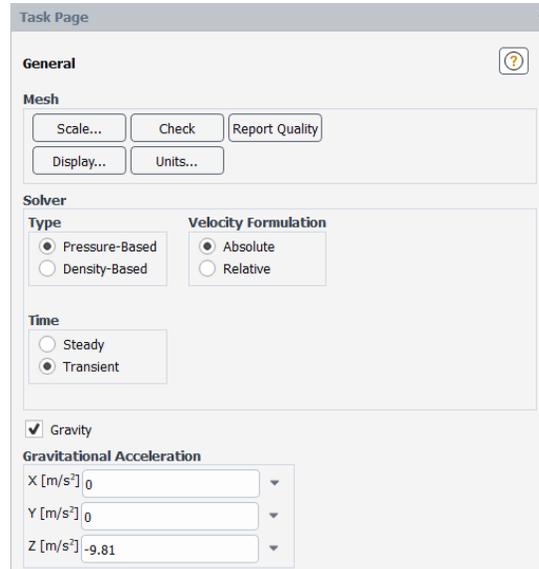


Figura 44. Configuración general del modelo

4.4.2. Selección y configuración de modelos

El programa cuenta con una pestaña de modelos disponibles para determinar la distribución de partículas mediante un modelo de fases euleriano, donde en espacios determinados fijos del dominio se estudia la fracción de volumen de cada una de las partículas que componen la fase de sólidos en el agua residual.

Para el estudio de la hidrodinámico y turbulencia del fluido en la región de dominio, el software ofrece diferentes modelos para la turbulencia entre ellos el k-epsilon, k-omega, Laminar, Transition SST, Spalart-Allmaras, Reynolds Stress, entre otros, los cuales varían de acuerdo con el número de ecuaciones adicionales que emplean para resolver el comportamiento del fluido.

4.4.2.1. Modelo de interacción de fases

Para el análisis de la interacción de las fases del fluido, existen distintos modelos numéricos integrados en el software que permiten describir su comportamiento. Para evaluar el comportamiento de las partículas en la unidad de sedimentación primaria se empleó el modelo de mezcla, el cual permite introducir varias fases eulerianas las cuales pueden ser continuas o discretas.

En el modelo desarrollado la fase continua se estableció como la fracción de la mezcla que se considera agua sin sólidos, es decir el agua en su estado molecular y tres fases discretas que son las partículas contenidas en la mezcla que representan los diferentes diámetros de sólidos.

Para el caso puntual del modelo se tomó como referencia el estudio granulométrico efectuado por Enriquez (2019), mediante el cual se establecen los diámetros de las partículas presentes en el agua residual doméstica. De acuerdo con la investigación de Enriquez (2019), los diámetros de partículas predominantes se encuentran en un rango de entre 10 a 100 μm y posteriormente en el rango superior a los 100 μm . En la (Tabla 25) se muestran los resultados obtenidos del estudio elaborado.

Tabla 25. Distribución granulométrica en el agua residual doméstica afluyente a un sedimentador primario.

CLASIFICACIÓN-PROPORCIÓN % Vol.					
Rango	Disueltos < 0,08 μm	Coloidales 0,08-1,0 μm	Supracoloidales 1,0-10 μm	Supracoloidales 10-100 μm	Sedimentables \geq 100 μm
Mínimo	0	1,31	13,48	51,12	25,45
Máximo	0	1,55	16,90	56,10	39,09
Promedio	0	1,45	15,76	54,06	29,73

Fuente: Adoptado de Enriquez (2019).

De acuerdo con el estudio granulométrico, se determinó que los diámetros más representativos para el desarrollo del modelo se encuentran en el rango de 10 a 100 μm , por lo que se considera que para la modelación se tomarán tres diámetros de partículas los cuales serán 10 μm , 50 μm y 80 μm tomando como base el estudio desarrollado por Enriquez (2019)- La concentración de sólidos suspendidos totales (SST) a la entrada de la unidad de sedimentación es de 144,50 mg/L, de acuerdo con las eficiencias de remoción de las unidades de tratamiento preliminar como se muestra en la [Figura 27. Diagrama de flujo del tratamiento que cuenta con la unidad de sedimentación primaria estudiada.](#)

Para la creación de las fases discretas se tomaron tres diámetros de partículas característicos, Suprame, corresponde a las partículas con diámetros de 10 μm , Suprama corresponde a los

diámetros de partículas de 50 μm y finalmente los sólidos considerados como sedimentables, que son partículas con diámetros de 80 μm . De acuerdo con el estudio de Enriquez (2019), las partículas en este rango toman valores de densidad muy cercanos a los 1396.534 kg/m^3 , por lo que para las tres fases discretas se toma esta densidad como referencia para la estimación de la fracción del volumen.

Tomando este valor como referencia se estimó la fracción de volumen correspondiente para cada una de las tres fases discretas de la mezcla como se muestra en la (Tabla 26).

Tabla 26. Fracciones de volumen de las fases discretas

Fracciones de volumen Modelo Base				
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	144.50			
Nombre partículas	Diámetros tomados	Porcentaje en la fracción	Fracción de volumen	Densidad partículas
Suprame	10 μm	17.71%	0.0000183250	1396.534 kg/m^3
Suprama	50 μm	54.95%	0.0000568571	1396.534 kg/m^3
Sedimentables	80 μm	27.34%	0.0000282880	1396.534 kg/m^3

En la (Figura 45) a continuación se presenta el modelo de mezcla seleccionado en el software.

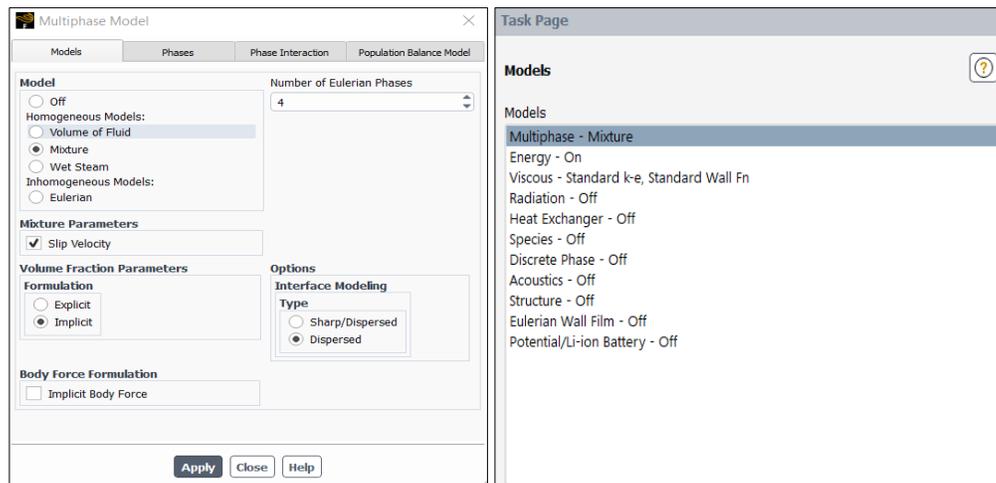


Figura 45. Configuración del modelo de interacción de partículas.

4.4.2.2. Modelo de turbulencia

Para el modelo de turbulencia se implementó el sistema de ecuaciones compuesto por el método k-epsilon estándar, el cual permite describir de manera adecuada el comportamiento hidrodinámico en estructuras de sedimentación convencional. Como los describe Berrío (2015),

el comportamiento hidrodinámico de las partículas durante el proceso de sedimentación se ajusta adecuadamente a los parámetros y características del modelo de turbulencia k-epsilon estándar.

Para la configuración propia del modelo se emplea la función estándar de pared o standard wall function, la cual estima los valores de velocidad, la tasa de disipación turbulenta y la energía cinética turbulenta, a partir de los valores más próximos a esta región. Esta función ha sido empleada por investigadores como Stamou, Theodoridis, & Xanthopoulos (2009).

En la (Figura 46), se muestra la configuración dada al modelo desde el módulo de Setup.

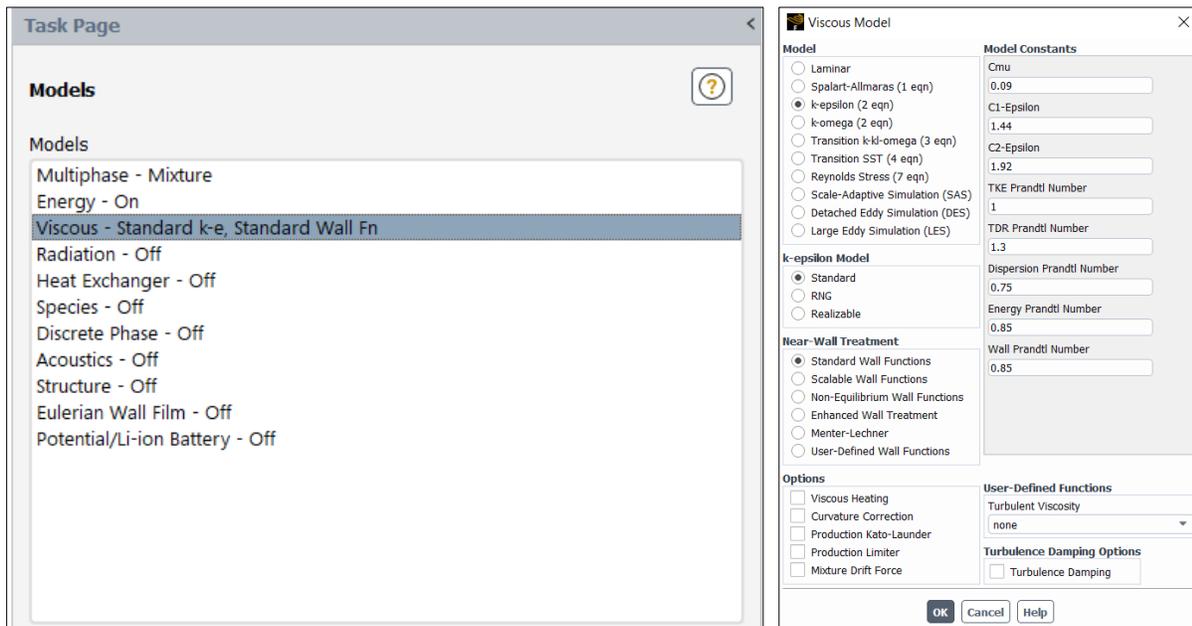


Figura 46. Configuración del modelo de turbulencia

4.4.2.3. Modelo de energía

Para el modelo de energía se considera emplear la ecuación de energía integrada en el software, la cual permite evaluar el efecto de la variación de la temperatura en el proceso de sedimentación de las partículas en la unidad de tratamiento.

La configuración para definir el modelo de energía en el módulo Setup se presenta en la (Figura 47).

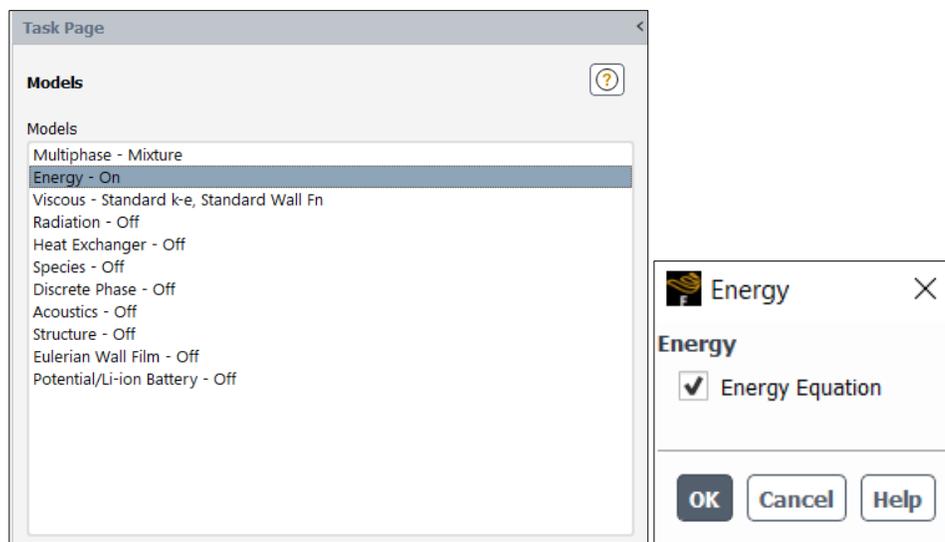


Figura 47. Configuración del modelo de energía.

4.4.3. Definición y configuración de las fases de la mezcla

Una vez configurados los submodelos a emplear en la simulación del flujo en la unidad, es necesario especificar las características de cada una de las fases que componen la mezcla. Como se describe en la sección [4.4.2.1. Modelo de interacción de fases](#), se asignaron los diferentes diámetros de partículas como una fase discreta o particulada, la cual tiene para cada material que la compone una densidad específica. Por otro lado, está la fase continua asignada como agua, la cual representa la fracción líquida de la mezcla.

Para el modelo de mezcla es relevante definir la densidad del fluido de acuerdo con el concepto de Boussinesq, considerando que es necesario evaluar el proceso de convección natural generado en el fluido cuando se dan variaciones en la temperatura a lo largo de la región de flujo. Para el modelo se debe definir la temperatura de la fase continua para este caso el agua, de acuerdo con la información recopilada para el agua residual de un municipio en la zona de desarrollo de la investigación, la temperatura se encuentra en un rango de entre 20 a 25°C, por lo que para el desarrollo del modelo del presente estudio se decidió tomar un valor intermedio de 23 °C. Para la fase continua las variables adicionales se dejan programadas por defecto de acuerdo con la base de datos del programa.

En lo que respecta a las propiedades de los materiales agregados como fases discretas, se tomó un valor de densidad de acuerdo con el estudio realizado por Enriquez (2019) y el rango indicado por la Water Environmental Federation - WEF (2005), de entre 1 y 1,6.

En las (Figuras 48 y 49) se muestra la configuración de las fases discretas y la fase continua en el modelo.

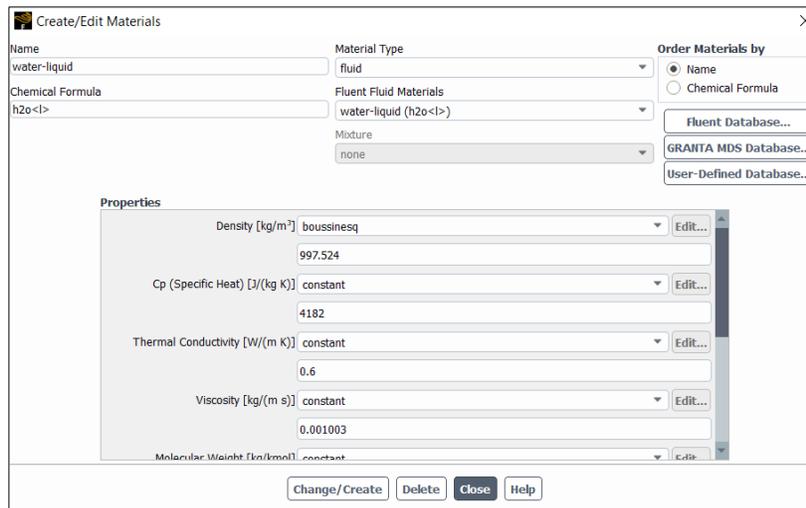


Figura 48. Configuración de los materiales del modelo (fase continua)

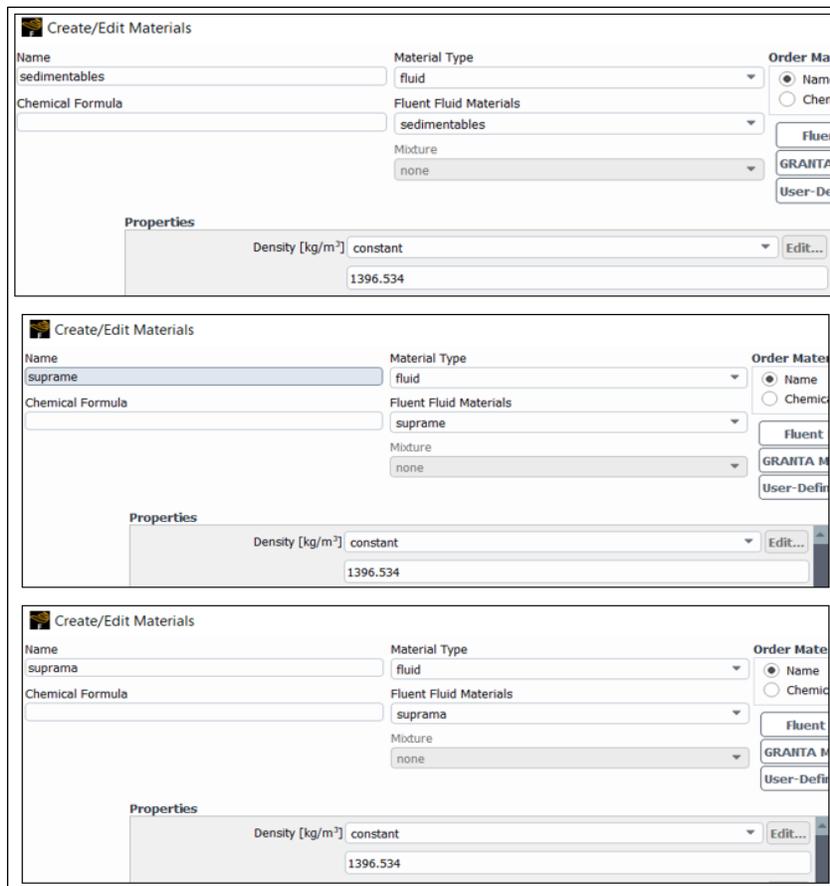


Figura 49. Configuración de los materiales del modelo (fases discretas)

Las fases de mezcla están establecidas de acuerdo con el modelo de interacción de los materiales definidos. Para los materiales de las fases discretas el modelo se configuró con el componente de composición granular, el cual permite evaluar y analizar sistemas que están compuestos por fases particuladas y considerar la compactación o proceso de compresión del lodo que sucede en el proceso operativo de las unidades de sedimentación, como lo describe Enriquez (2019), en su investigación.

En las (Figuras 51, 52, 53 y 54) se muestra la configuración de las fases en el Setup del FLUENT, para el modelo de mezcla.

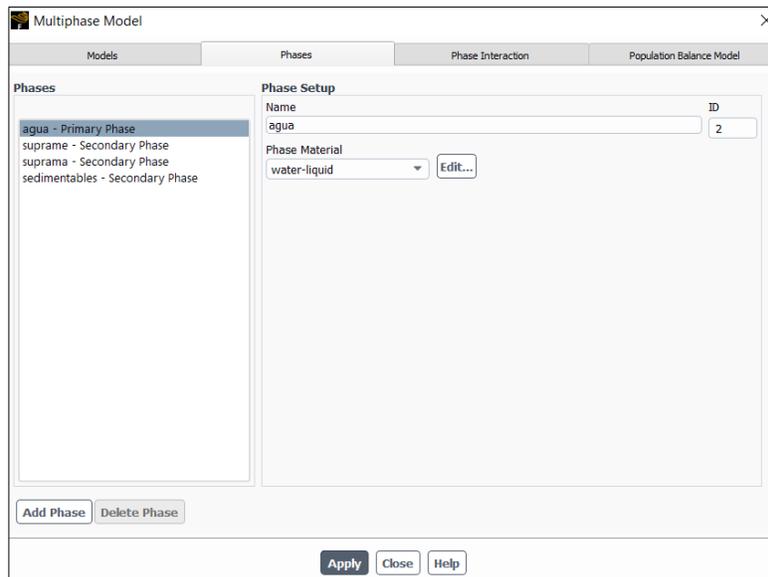


Figura 50. Configuración de la fase primaria.

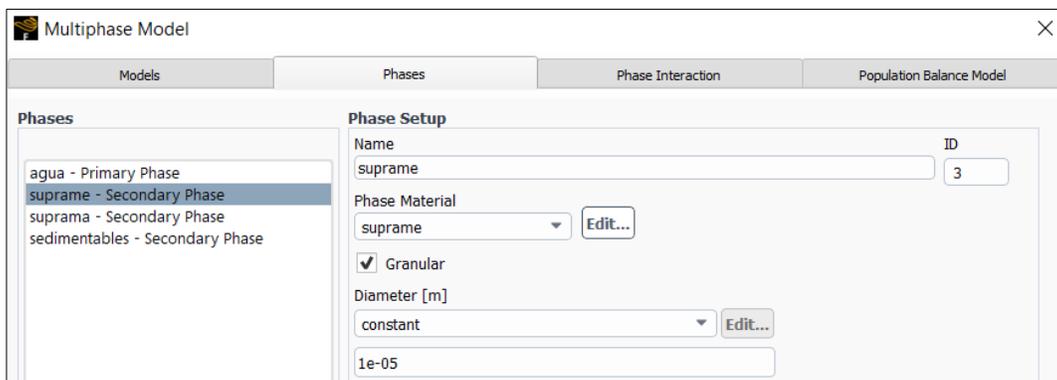


Figura 51. Configuración de la fase secundaria (Suprame).

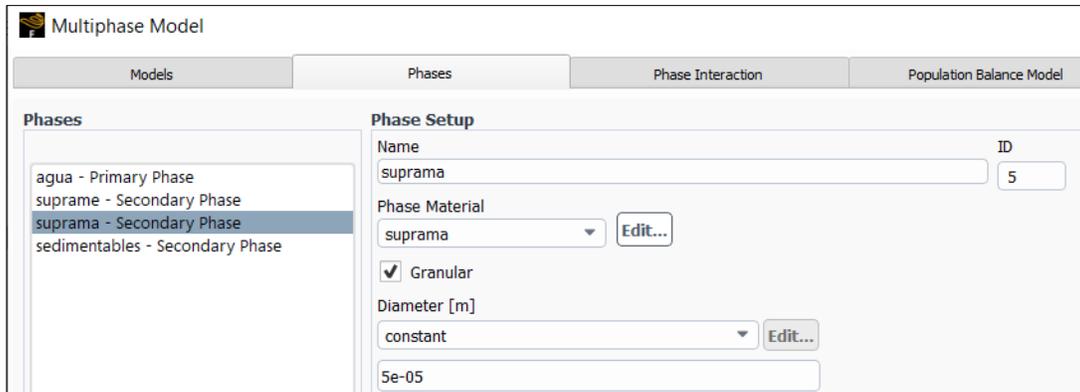


Figura 52. Configuración de la fase secundaria (Suprama).

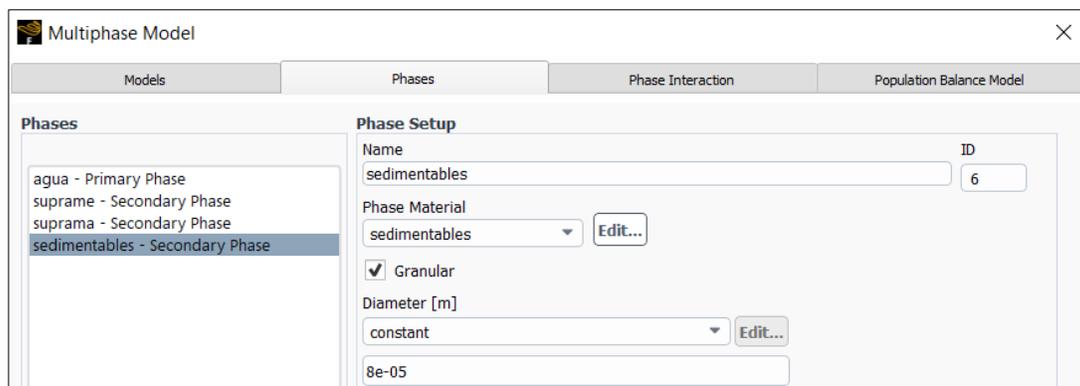


Figura 53. Configuración de la fase secundaria (Sedimentables).

4.4.4. Condiciones de frontera del modelo

Como parte fundamental del modelo es necesario configurar las regiones que parametrizan las condiciones iniciales y de frontera para el desarrollo de la simulación del proceso de sedimentación. La asignación de las características de las regiones de frontera permite obtener un modelo con las condiciones matemáticas requeridas. Es necesario especificar los valores de las variables tales como la velocidad en la entrada de la estructura, su magnitud y dirección, los coeficientes del modelo de turbulencia y las fracciones de volumen.

Con el objetivo de agilizar el proceso de resolución y garantizar la estabilidad del modelo, se tomó información disponible de investigaciones previas en las cuales se identificaron las condiciones de frontera adecuadas .

De acuerdo con lo anterior, para la región de entrada o inlet, se tomó la opción de “*velocity inlet*” y para la región de salida u outlet se decidió tomar la condición de “*outflow*”, considerando que de acuerdo con el estudio efectuado por Enriquez (2019).

Para otras regiones como el límite superior del tanque, las paredes y demás fronteras también se definieron una serie de condiciones las cuales se presentan en la (Tabla 27).

Tabla 27. Condiciones de frontera seleccionadas para el modelo.

Región de frontera	Condición de frontera	Descripción
Inlet (Entrada)	velocity inlet	La condición de entrada definida mediante el método de velocity inlet permite al modelo estimar el flujo másico inicial considerando el área de la sección de flujo. Los valores requeridos para su aplicación son la velocidad y la dirección.
Outlet (Salida)	outflow	Para la región definida como la salida del agua de la estructura, se designó la condición de outflow, la cual permite indicarle al modelo la fracción del flujo que sale del tanque sedimentador. El modelo de outflow permite analizar de forma adecuada la fracción de volumen y velocidad de los sólidos, con un criterio en términos del balance de masa en la estructura.

Región de frontera	Condición de frontera	Descripción
Walls (Paredes)	Walls (no-slip)	<p>Para las regiones de contacto con las paredes del tanque se toma la condición de no deslizamiento, donde el modelo considera que una vez el fluido entra en contacto con la pared, el fluido se desplazara a la misma velocidad que la pared .</p> <p>De ser una región estática, el fluido no considerara movimiento asociado a la pared.</p>
Symmetry (Simetría superior)	Symmetry	<p>La región superior donde termina la estructura del tanque sedimentador, se asignó para el modelo por medio de la condición de simetría. Esto permite al modelo inferir que a partir de esta región superior las derivadas de las velocidades tangenciales son cero. De forma complementaria el modelo permite por medio de esta condición de borde omitir el efecto de las corrientes de aire en los patrones de flujo de la mezcla, lo cual permite simplificar el modelo y simular con las condiciones dadas sin asignar una condición de superficie libre en la estructura.</p>

Región de frontera	Condición de frontera	Descripción
Método definición turbulencia	Turbulent dissipation rate (ϵ) Kinetic turbulence energy (k)	Para la modelación de la turbulencia, se seleccionó emplear el método k – ϵ . Los valores en la frontera se estiman de acuerdo con las propiedades del fluido y la velocidad de este.

En las (Figuras 54, 55, 56, 57, 58, 59 y 60) se presenta la configuración empleada para el modelo en las condiciones de frontera descritas. En el anexo dos y el anexo uno se presentan las memorias de cálculo de la estructura, así como las variables k y ϵ , fracción de volumen y demás parámetros para la alimentación del modelo.

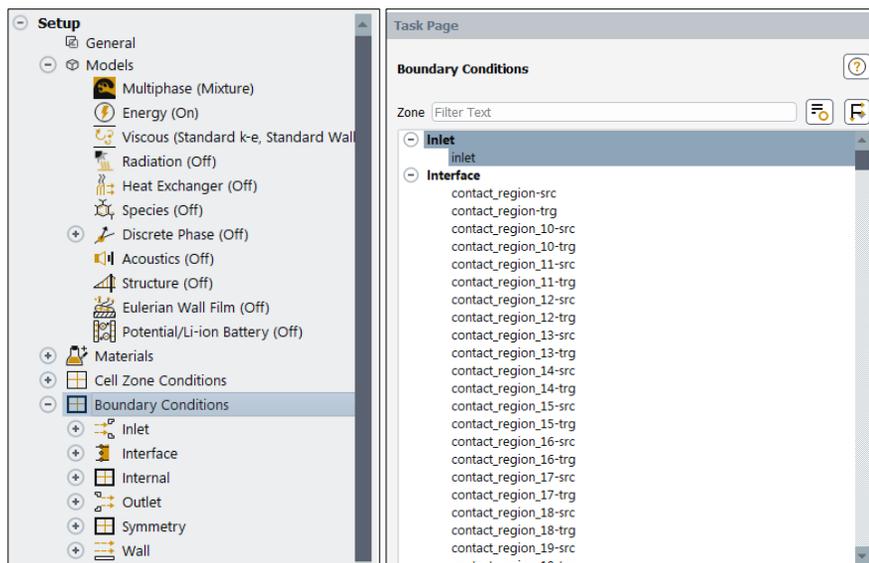


Figura 54. Configuración de las condiciones de frontera del modelo

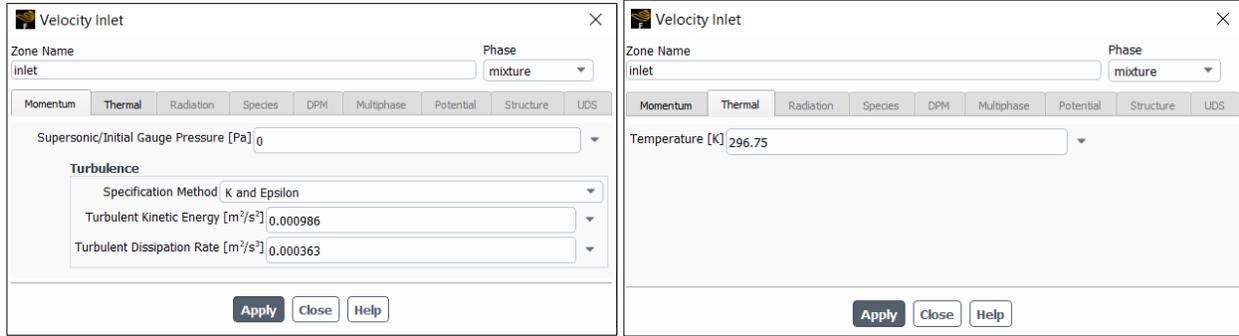


Figura 55. Asignación de la tasa de disipación de la energía y la energía cinética turbulenta.

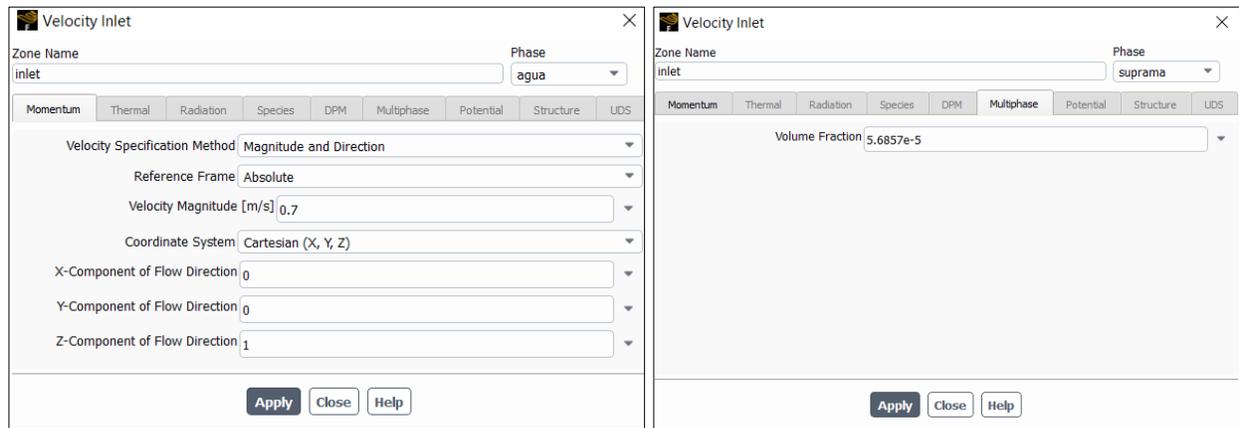


Figura 56. Configuración de la velocidad y su componente vectorial.

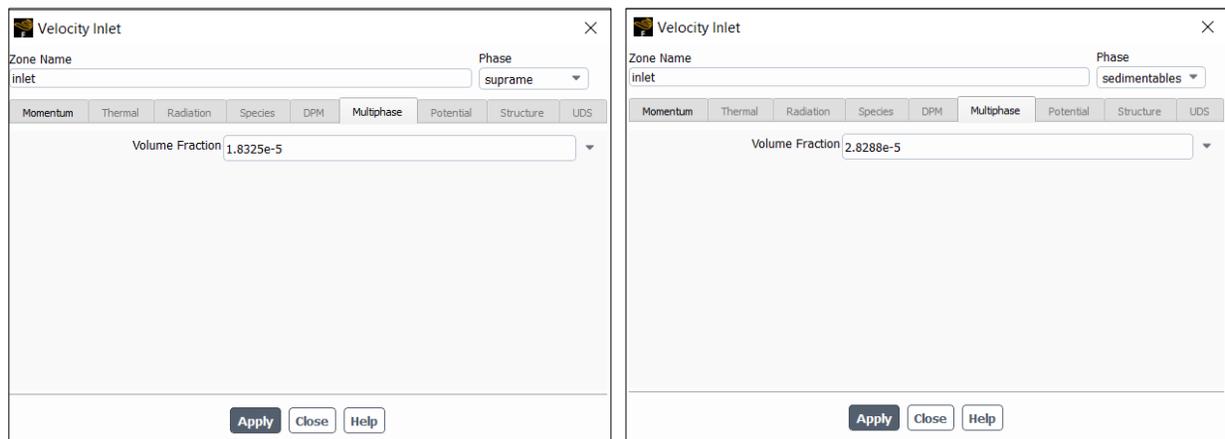


Figura 57. Asignación de las fracciones de volumen en el inlet.



Figura 58. Configuración del Outlet o salida.



Figura 59. Configuración de la simetría superior

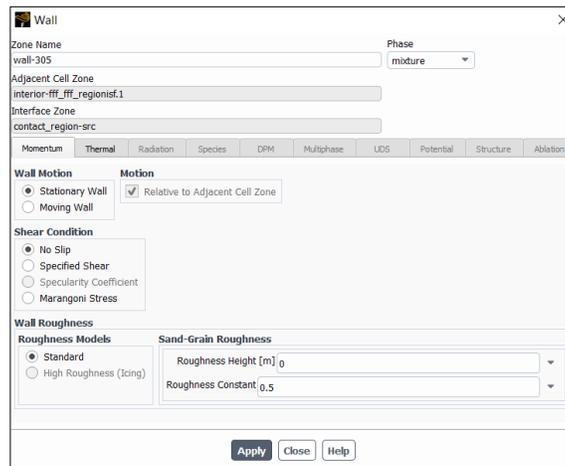


Figura 60. Configuración de las paredes.

Las condiciones de frontera seleccionadas para el modelo fueron tomadas teniendo en cuenta las aplicadas en otros proyectos de investigación que buscaban al igual que el presente estudio, proyectar el comportamiento de una unidad de sedimentación mediante la dinámica de fluidos computacional. Algunos de los autores relacionados como referencia son (Anastasios, Georgios, & Konstantinos, 2009; Betancourt, Bürger, Diehl, & Faràs, 2014; Enriquez, 2019; Berrío, 2015; (Stamou, Theodoridis, & Xanthopoulos, 2009).

4.4.5. Selección de los métodos de solución

Para los métodos de solución, se efectuó un reconocimiento de los esquemas numéricos existentes con los cuales trabaja el modelo, considerando para cada elemento de resolución puntual los métodos más empleados en el desarrollo de este tipo de modelos por otros investigadores.

Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario aclarar que la selección de los métodos de solución fue clave para que el modelo se desarrollara de forma estable y precisa durante el proceso de simulación.

Para la adecuada solución del modelo, se efectuó la combinación de diferentes métodos empezando por los esquemas de primer orden preestablecidos por el software, para garantizar que el método seleccionado responda de forma rápida al problema. Posteriormente se emplearon esquemas numéricos de segundo orden, mediante los cuales se obtuvieron resultados estables en la solución del modelo.

Durante la ejecución de la simulación se evaluaron los valores de los residuales, como parámetro de control de la estabilidad y consistencia del modelo de acuerdo con lo descrito en la sección [3.7. Simulación y monitoreo de la convergencia numérica](#). Cuando se identificó inconsistencia en el modelo se ajustó el valor numérico para los coeficientes de sub relajación del momentum, la fracción de volumen, la presión, las fuerzas de cuerpo y la enérgica cinética turbulenta, para ejecutar de nuevo el modelo.

El ejercicio descrito anteriormente se efectuó de forma iterativa para determinar cuáles coeficientes de sub relajación generan la solución más adecuada para obtener el estado de convergencia en el modelo.

Una vez alcanzada la configuración que permite obtener el grado de convergencia y estabilidad más rápido es posible determinar que el modelo se comporta de forma ideal para la estructura de sedimentación primaria.

En la (Figura 61) se muestran los métodos seleccionados para la resolución del gradiente, la presión, el momento, la fracción de volumen, la energía cinética turbulenta, la tasa de disipación turbulenta y la energía, una vez elaborado el proceso iterativo descrito.

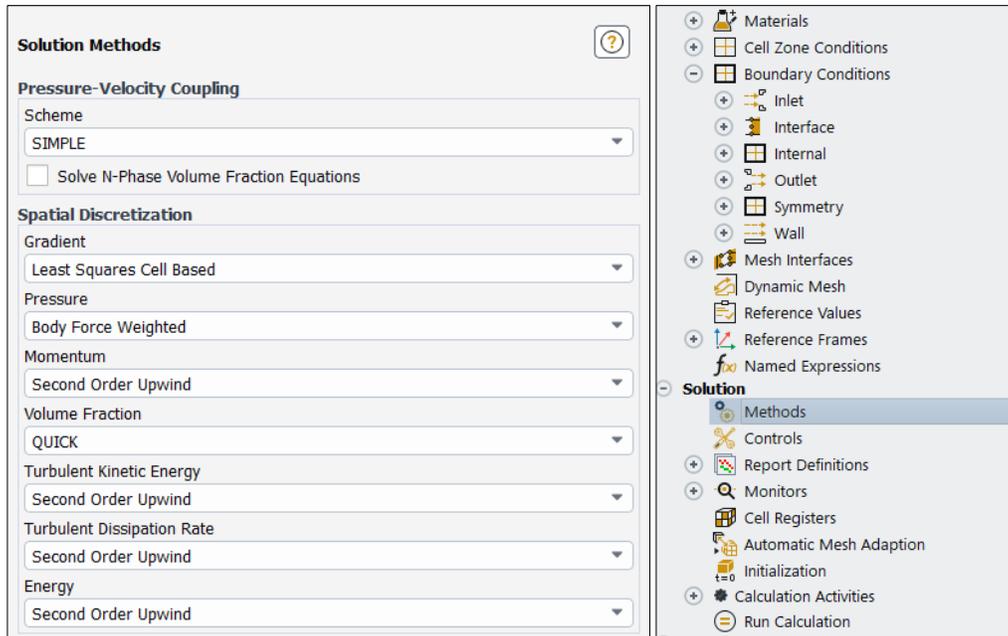


Figura 61. Configuración de los métodos de solución

También se evaluó el efecto generado sobre el modelo cuando los factores o coeficientes de relajación se ajustan aproximándolos a 1. De acuerdo con lo descrito en sus investigaciones por autores como Zhang (2014) y Enriquez (2019), estos coeficientes son una herramienta de control que brindan la posibilidad de monitorear y regular la diferencia que genera el modelo en los valores de las variables en el proceso iterativo de solución.

Mediante estos factores es posible ajustar el grado de inestabilidad producido durante la simulación, por lo que, ajustando los factores de presión, la energía cinética turbulenta o la tasa de disipación de energía cinética es posible reducir el grado de inestabilidad del modelo y permitir un desarrollo estable de la solución (ANSYS, 2017).

Para el estudio efectuado, se tomaron como valores de los coeficientes de relajación los presentados por defecto y se efectuó una corrida con los valores obtenidos de acuerdo con la investigación efectuada en sedimentadores por Enriquez (2019), con los cuales fue posible obtener un nivel de estabilidad aceptable para el modelo.

En la (Figura 62) se presentan los coeficientes de relajación tomados para el desarrollo del modelo, valores con los cuales se obtuvo una simulación con un grado de estabilidad adecuado.

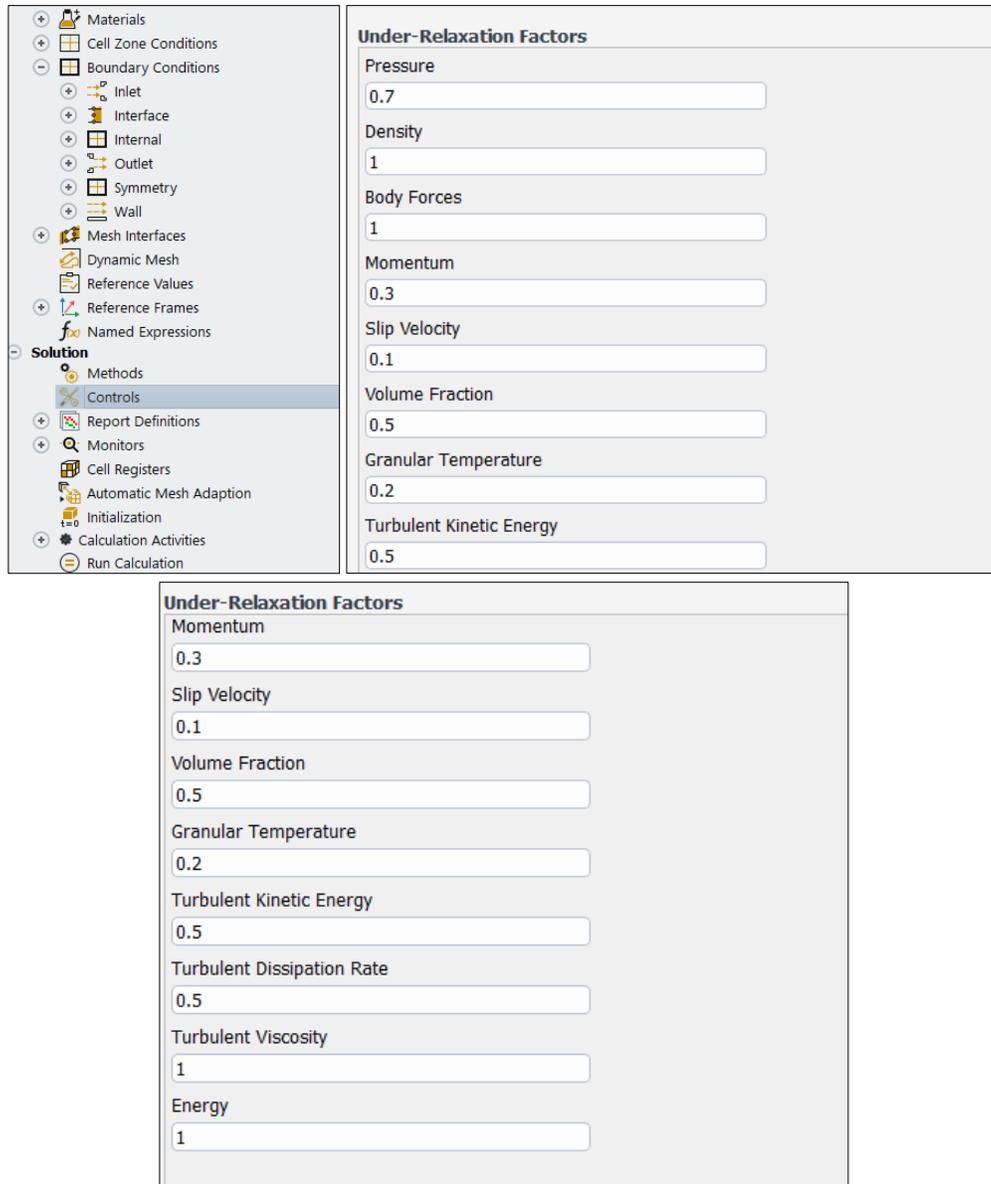


Figura 62. Configuración de los coeficientes de relajación

Para el modelo se evaluaron distintos intervalos de tiempo con el objetivo de obtener un resultado estable y detallado en función del tiempo computacional necesario.

Se tomaron como referencia intervalos de tiempo de 2, 3, y 4 para determinar el rango computacional ideal para el modelo, teniendo en cuenta las herramientas computacionales disponibles y el alcance de la proyecto desarrollado.

4.4.6. Configuración de los parámetros de inicialización

Para la inicialización del modelo se evaluaron todas las variables desde el inlet o región de entrada, desde la cual el programa considera los valores asignados de velocidad con su componente vectorial, fracciones de volumen, la energía cinética turbulenta y la tasa de disipación de energía cinética como condiciones iniciales. Desde este punto el modelo empieza a ejecutar el cálculo y a estimar los valores de cada una de las variables en función del tiempo de cálculo.

En la (Figura 63) se presenta la configuración empleada para la inicialización del modelo elaborado para la unidad de sedimentación primaria diseñada.

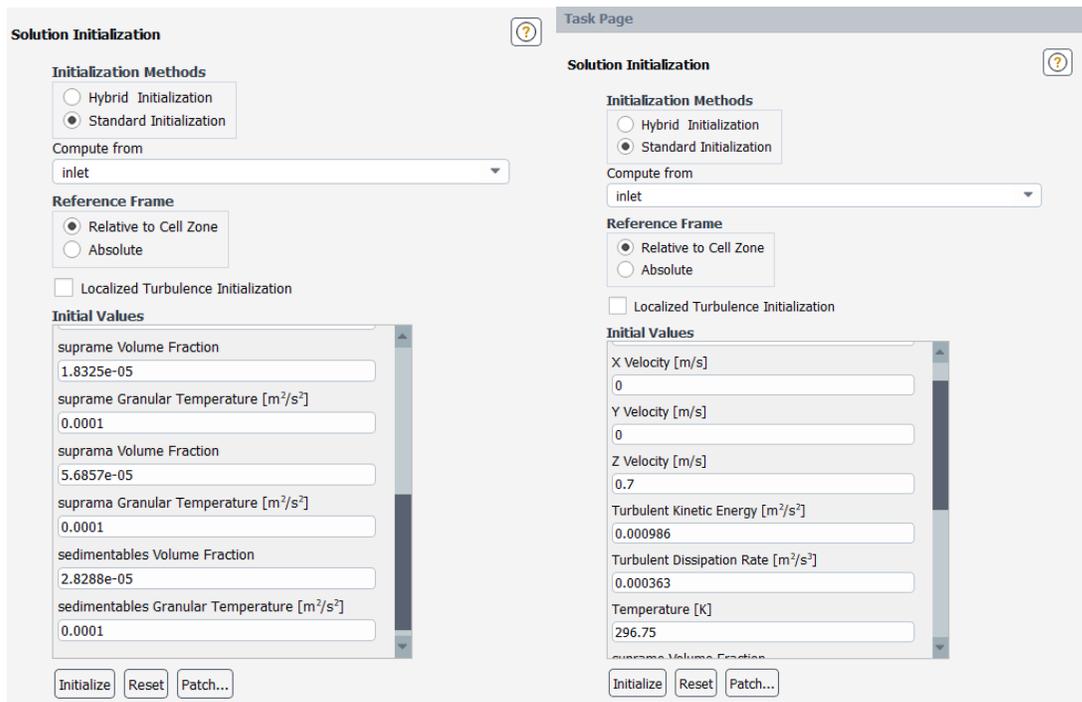


Figura 63. Configuración de la inicialización de la solución.

Capítulo 5. Resultados

En este capítulo, se presentan los resultados de las simulaciones efectuadas para los diferentes refinamientos de la malla y pasos de tiempo. Se presenta el análisis del comportamiento hidrodinámico del tanque sedimentador, la temperatura y la fracción de volumen.

Se evalúan las eficiencias de tratamiento del proceso con respecto a los valores esperados de acuerdo con las guías teóricas de referencia y la estructura de referencia, un sedimentador primario existente de una planta de tratamiento de aguas residuales ubicada en el departamento del Tolima.

El presente aparte del documento aborda el análisis de independencia de la malla, el intervalo de tiempo, los patrones de velocidad y flujo, la energía cinética turbulenta, la eficiencia en el proceso de sedimentación y se aproxima a una validación el modelo, con los datos disponibles.

5.1. Análisis de independencia

5.1.1. Análisis Malla

Para evaluar el comportamiento de la estructura de sedimentación primaria proyectada como se presentó en el capítulo 4, se analizaron tres discretizaciones de la geometría con diferente número de elementos.

En función del número de elementos, el modelo produce unos resultados más precisos o ajustados al comportamiento físico real de la estructura. De acuerdo con lo anterior es necesario encontrar un equilibrio entre el número de elementos de la malla y la precisión de los resultados obtenidos, por lo que es necesario efectuar la simulación con la misma configuración del modelo, evaluando mallas diferentes, con diferente densidad o cantidad de elementos. Dicho análisis es conocido como “evaluación de la independencia de la malla” (Enriquez, 2019).

Como se presenta en el numeral [4.3. Discretización de la geometría \(Mallado\)](#), se evaluaron tres mallas, con las cuales se modeló el sedimentador para un tiempo de 4680 segundos o 78 minutos, tiempo de retención tomado para el análisis de la estructura. En cuanto al paso del tiempo se empleó un valor de 2 segundos, con el cual se busca obtener un modelo convergente.

Para el análisis de los resultados de cada una de las mallas, se tuvo en cuenta la velocidad y la fracción de volumen, como fue realizado por investigadores como Enriquez (2019) y Betancourt, Bürger, Diehl, & Farås (2014).

Para elaborar el monitoreo de la convergencia del modelo, se evaluó la magnitud de los residuales, obteniendo valores de entre 1×10^{-6} y 1×10^{-4} . El modelo se elaboró con un computador portátil de 4 núcleos y 16 GB de memoria RAM. Los tiempos obtenidos para cada una de las simulaciones, el tipo de elementos y la cantidad total de elementos de cada malla se presentan en la (Tabla 28).

Tabla 28 . Tiempos de computo del modelo en función de la malla.

c	MALLA FINA	MALLA INTERMEDIA	MALLA GRUESA
Tipo de elementos	Hexaedros	Hexaedros	Hexaedros
Cantidad total de elementos	474864	282976	143364
Tiempo de computo	14 horas	10 horas	6 horas

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos a partir de la simulación elaborada se presenta en las (Figuras 64 y 65) las velocidades obtenidas para las tres simulaciones y las fracciones de volumen obtenidas.

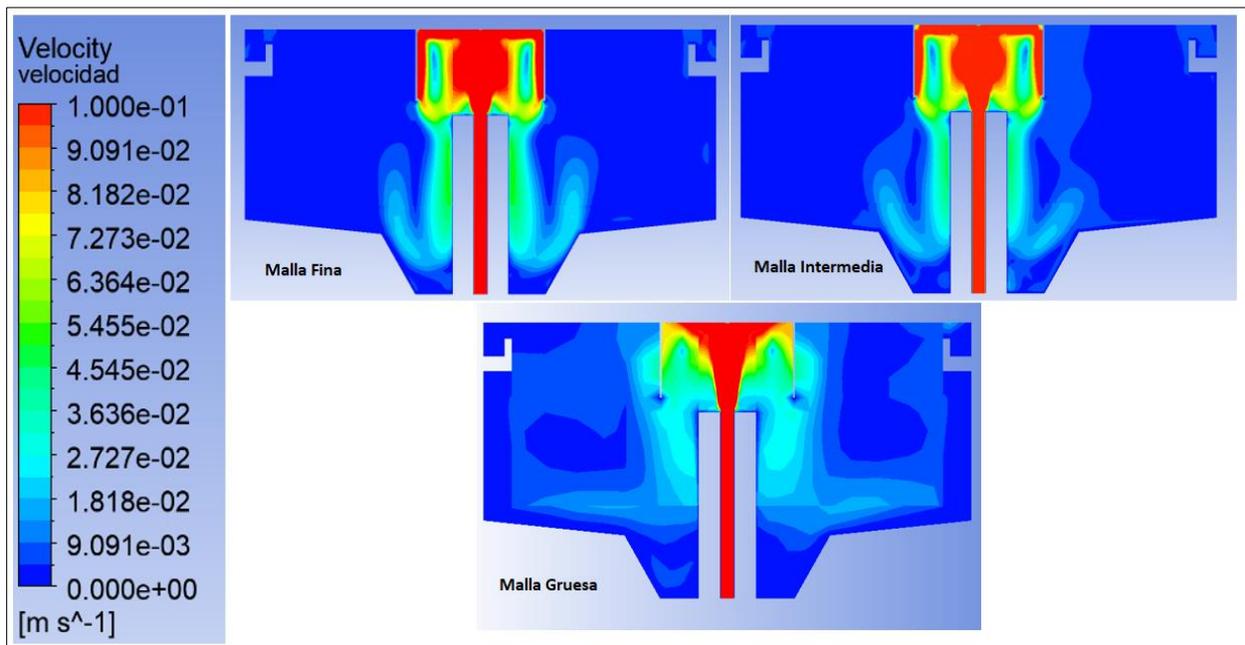


Figura 64. Perfil de velocidades en el rango ajustado

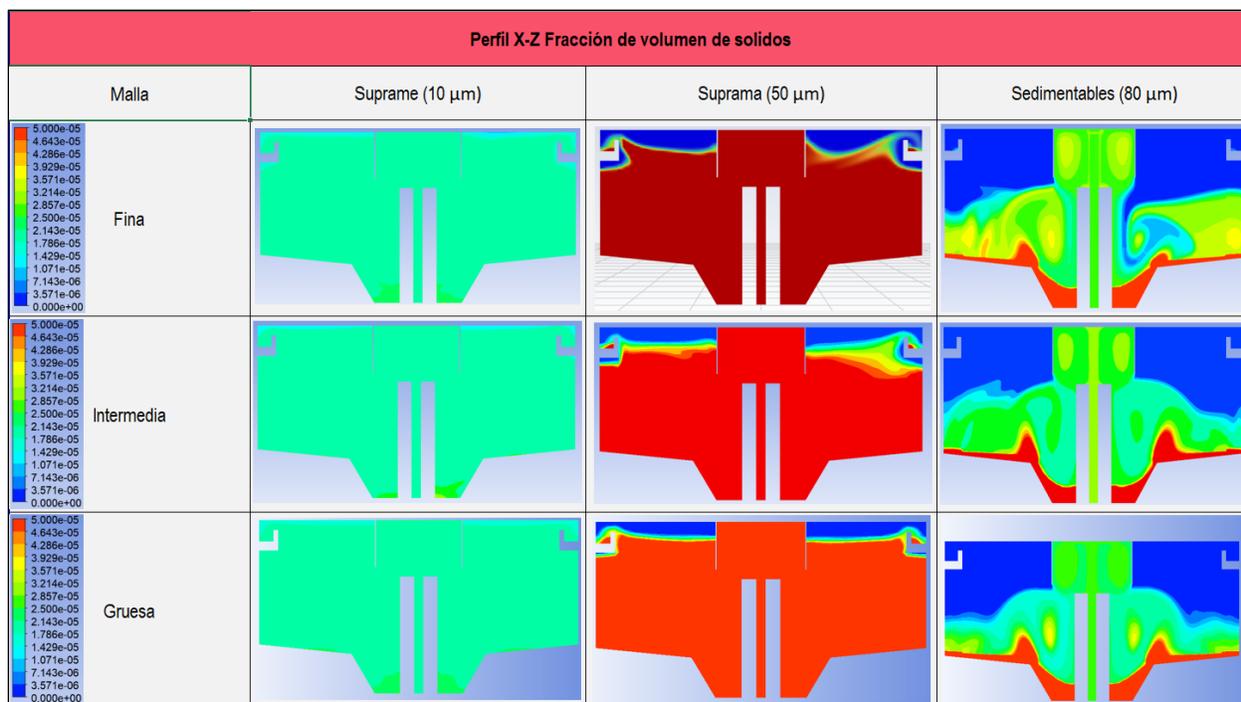


Figura 65. Fracción de volumen corte ZX, rango ajustado

Como se presenta en las (Figuras 64 y 65) las tres mallas empleadas a pesar de tener una cantidad de elementos diferentes presentan patrones de flujo similares, diferenciándose en el grado de detalle. La malla más gruesa no resuelve adecuadamente la distribución de velocidades en la proximidad del baffle en la entrada del sedimentador, por lo que no describe de forma apropiada el comportamiento hidrodinámico de la unidad. En regiones como la anteriormente descrita, y las secciones en las cercanías del fondo de la estructura, el tamaño de los elementos es mayor en comparación con el de las otras dos mallas, por lo que el grado de difusión numérica es mayor y por ende el comportamiento hidrodinámico del tanque no se describe adecuadamente.

Para la malla más fina y la intermedia, se considera que el modelo presenta una difusión numérica mucho más baja, puesto que se pueden observar patrones de flujo muy similares en las regiones presentadas en el perfil ZX.

En lo que respecta a la fracción de volumen, se puede observar que para la correspondiente a 10 μm , los perfiles son similares, sin embargo, para 50 μm y 80 μm se nota la variación en el comportamiento de las partículas en la región de salida y las zonas recirculación para los sólidos sedimentables.

En términos generales se puede observar la similitud entre la malla intermedia y gruesa en lo que respecta al componente hidrodinámico y las fracciones de volumen.

Para verificar cuantitativamente la diferencia entre los resultados obtenidos para cada una de las mallas se extrajo los valores de flujo másico de los tres sistemas modelados y se presentan en la (Figura 66).

mixture Mass Flow Rate [kg/s]		mixture Mass Flow Rate [kg/s]		mixture Mass Flow Rate [kg/s]	
inlet	21.57847	inlet	21.57847	inlet	21.593091
outlet	-21.577829	outlet	-21.577842	outlet	-21.592461
Malla Intermedia		Malla Fina		Malla Gruesa	

Figura 66. Flujo másico para las mallas evaluadas.

Los datos obtenidos permiten mostrar la aproximación de los resultados en relación con el flujo masico que entra y sale para las tres simulaciones efectuadas. Tanto para la malla gruesa como para la fina se observa que el valor del Inlet e muy aproximado al del Outlet, sin embargo, se logra visualizar una pequeña diferencia numérica entre los flujos másicos a la entrada calculados por el modelo para las mallas intermedia y fina en comparación con la gruesa. Lo anterior permite determinar que las dos mallas más densas permiten aproximarse más al resultado esperado.

Para evaluar el comportamiento en la estructura se estimó la desviación generada tomando como referencia la malla más fina, todo con la finalidad determinar qué efecto tiene la reducción de elementos en la malla sobre el resultado final en la modelación. En la (Tabla 29) se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 29. Análisis de los resultados obtenidos para las mallas empleadas mediante error porcentual.

Condición de Frontera	Flujo Masico	Desviación	
	Malla Fina	Malla intermedia	Malla Gruesa
Inlet	21.58 kg/s	0.000	0.001
Outlet	21.58 kg/s	0.000	0.001

Fuente: Autor.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se puede determinar que el grado de aproximación entre la malla fina y la malla intermedia es muy similar, por lo que para el presente estudio se

decide tomar la malla denominada como malla intermedia, con el objetivo de garantizar un adecuado grado de estabilidad y convergencia en un tiempo computacional aceptable.

En lo que respecta a la concentración saliente de sólidos en la simulación, se decidió analizar el comportamiento para el mismo tiempo de 78 minutos en las tres discretizaciones, obtenido un resultado más aproximado a la eficiencia esperada en el sedimentador primario, empleando la malla intermedia. En la (Tabla 30) se presenta el resultado y la desviación de la malla fina y gruesa respecto a la malla intermedia.

Tabla 30. Análisis de los resultados obtenidos para las mallas empleadas mediante error porcentual (Desviación malla fina y gruesa respecto a la intermedia).

Condición de frontera	Concentración de SST mg/L			Desviación porcentual	
	Malla Fina	Malla Intermedia	Malla Gruesa	Malla Fina	Malla Gruesa
Inlet	144.50	144.50	144.50	0.0	0.0
Outlet	80.03	65.41	59.28	0.22	0.09

Fuente: Autor.

5.1.2. Análisis pasos de tiempo

De forma complementaria al análisis de la malla, se efectuó el análisis del intervalo del tiempo para la ejecución del modelo. Para dicho análisis se seleccionó un tiempo de corrida de 78 minutos y 120 minutos con diferentes pasos de tiempo los cuales fueron seleccionados teniendo en cuenta que el tiempo computacional del modelo fuese razonable.

Para el presente estudio se emplearon valores de 2, 3 y 4 segundos, el tiempo computacional de las simulaciones fue de 14, 10 y 6 horas, respectivamente. Para el análisis de independencia de la malla se empleó un ordenador con un procesador de 4 núcleos y una memoria RAM de 16 GB. Las modelaciones se desarrollaron mediante el esquema segregado.

En las (Figuras 67 y 68) se presentan los resultados obtenidos mediante la simulación para la velocidad y las fracciones de volumen en cada uno de los pasos de tiempo evaluados.

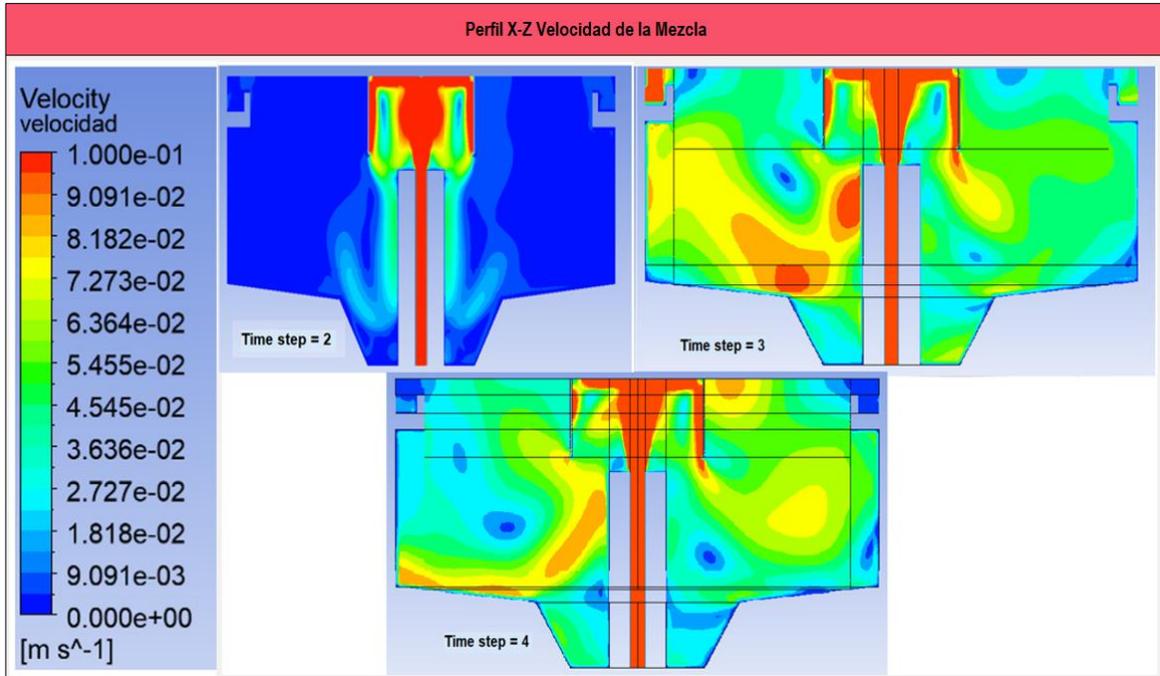


Figura 67. Perfil de velocidades para time step de 2, 3 y 4 segundos en el rango ajustado

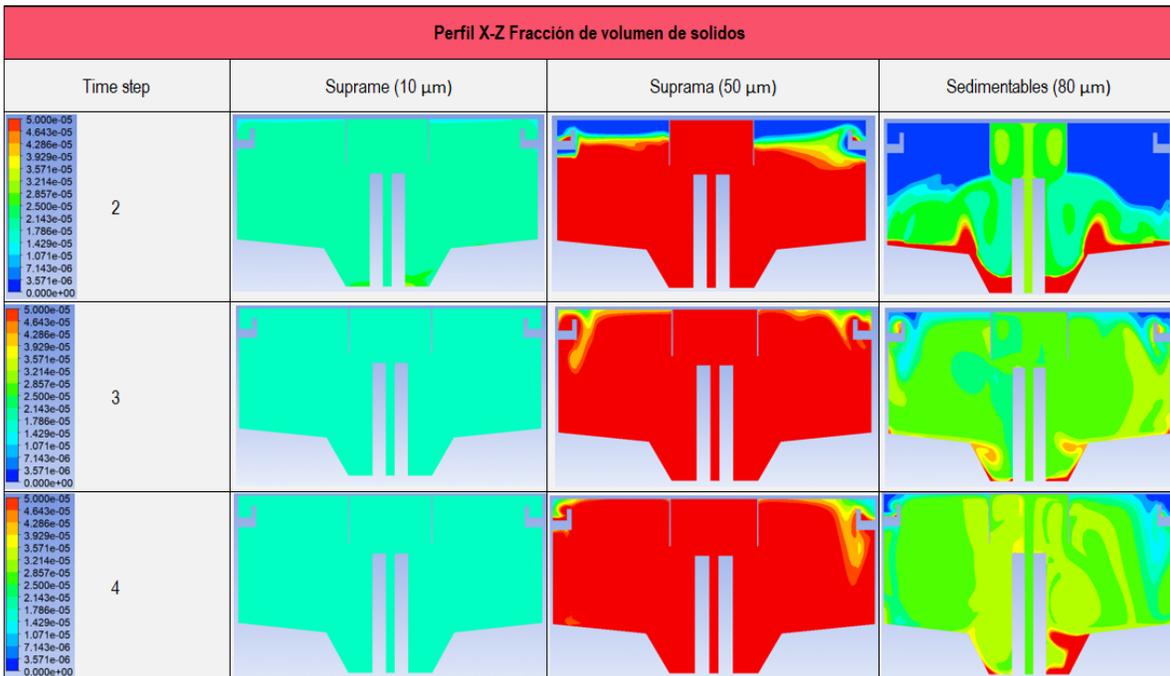


Figura 68. Fracción de volumen corte ZX, rango ajustado para los pasos de tiempo de 2,3 y 4 segundos.

Como se presenta en las (Figuras 67 y 68), cuando el valor del paso de tiempo se incrementa los resultados obtenidos tienen una mayor desviación con respecto al paso de tiempo de dos segundos. De igual forma, la convergencia del modelo empieza a hacerse menos eficiente y en varios lapsos iterativos el modelo diverge para el paso de tiempo de 4s, generando valores de fracción de volumen superiores en la salida, en comparación con los de la entrada, incrementando de esta manera la concentración de sólidos. De acuerdo con lo anterior el modelo presenta valores en los residuales por fuera del rango aceptado (entre 1×10^{-6} y 1×10^{-4}) para la condición de convergencia, lo cual permite determinar que para el paso de tiempo de 4 segundos el modelo es divergente.

Para el paso de tiempo de 3s se obtiene una concentración de sólidos con una desviación aceptable respecto a los resultados obtenidos para el valor de 2 segundos, sin embargo, se genera una desviación del 22% respecto a los resultados obtenidos con un paso de tiempo de 2 segundos.

Para el paso de tiempo de 4 segundos se puede observar en la (Figura 68) como las partículas de $80 \mu\text{m}$ y $50 \mu\text{m}$ no se comportan de forma precisa en su fracción de volumen mostrando una diferencia muy amplia con respecto al paso de tiempo de 2s.

Al incrementar el paso de tiempo el modelo genera una dispersión numérica muy elevada lo cual provoca una tendencia distinta en los resultados obtenidos para la fracción de volumen.

En lo que respecta al comportamiento hidrodinámico del modelo para los diferentes pasos de tiempo estudiados (Figura 67), se observa que las velocidades en los segmentos intermedios en el sedimentador primario son diferentes al incrementar el valor de 2 a 3 segundos, mostrando que para valores mayores o iguales a 3 segundos los resultados no son representativos de una unidad de sedimentación real.

Para los pasos de tiempo de 3 y 4 segundos se obtienen resultados similares en el comportamiento hidrodinámico, sin embargo, los valores de velocidad tienen magnitudes superiores sobre la región de salida en la simulación efectuada con un paso de tiempo 3 segundos.

Para efectuar un análisis cuantitativo de la desviación de los resultados para cada uno de los tres pasos de tiempos evaluados, se tomó la concentración a la entrada y salida del tanque sedimentador, valor con el cual es posibles estudiar de forma precisa el grado de aproximación a la solución de 2s de los valores evaluados.

En la (Tabla 24) se presenta la desviación obtenida en los resultados para los pasos de tiempo de 3 y 4 segundos respecto a los datos obtenidos para un paso de tiempo de 2 segundos.

Tabla 31 . Análisis de los resultados obtenidos para los pasos de tiempo empleados mediante la desviación porcentual.

Condición de frontera	Concentración de SST			Desviación	
	Time step 2s	Time step 3s	Time step 4s	Time step 3s	Time step 4s
Inlet	144.50	144.50	144.50	0.000	0.000
Outlet	65.41	79.62	163.38	0.22	1.49
Rango residuales	1×10^{-6} - 1×10^{-4}	1×10^{-4} - 1×10^{-2}	1×10^{-4} - 1×10^{-1}		

De acuerdo con los resultados obtenidos con la configuración para el paso de tiempo de 2, 3 y 4 segundos, es posible determinar que el grado de desviación incrementa de forma considerable cuando el paso de tiempo es mayor de 3 segundos. De acuerdo con lo anterior no es adecuado seleccionar los valores de 3 y 4 segundos para el desarrollo del modelo definitivo.

Para efectos de la presente modelación, es importante tener en cuenta que los resultados buscan describir de la forma más adecuada y aproximada el comportamiento real de una estructura de sedimentación primaria, con el objetivo de determinar el desempeño de la unidad diseñada.

Una vez evaluados y analizados los resultados obtenidos, es posible afirmar que el modelo presenta una mejor aproximación numérica mediante un paso de tiempo de 2 segundos, puesto que la solución permite obtener una condición de convergencia y estabilidad, de este modo se decide emplear un paso de tiempo de 2 segundos para el modelo.

5.2. Resultados del modelo del sedimentador secundario

Una vez seleccionados los criterios mediante el análisis de independencia del modelo, se estudió el escenario con un paso de tiempo de 2 segundos y la malla intermedia. Lo anterior busca estudiar el comportamiento del sedimentador o clarificador con el escenario óptimo desde el punto de vista temporal, computacional y matemático de acuerdo con los resultados esperados. En este numeral se estudia, el comportamiento de la unidad de acuerdo con los resultados obtenidos mediante la modelación en FLUENT, con un equipo computacional de 4 núcleos y 16 GB de memoria RAM. El tiempo computacional de cálculo en las simulaciones fue de 10 horas para un tiempo total de modelación de 4680 segundos.

Para el análisis se presentan los resultados hidrodinámicos y el comportamiento de las partículas en la unidad, mediante perfiles de velocidad y patrones de flujo, eficiencia de sedimentación, flujo másico, fracciones de volumen y la energía cinética turbulenta.

5.2.1. Patrones de flujo y perfiles de velocidad

Para el estudio de los patrones de flujo, se empleó el módulo de resultados de FLUENT, el cual permite revisar las líneas de corriente, trayectorias y los perfiles de velocidad dentro de la región considerada para la modelación del sedimentador.

Para el análisis hidrodinámico se consideró como las regiones de principal interés a estudiar las comprendidas en la estructura de sedimentación, teniendo en cuenta la entrada, la ventana de acceso al tanque, la sección de encuentro con la pantalla, la tolva, la región de flujo horizontal y la región de salida sobre el vertedero perimetral.

En cada una de estas secciones se efectuó el respectivo análisis del patrón de flujo de acuerdo con lo obtenido a partir del modelo.

En la (Figura 69) a continuación se presenta el comportamiento del fluido sobre la región de ingreso, donde se observan las magnitudes más grandes para la velocidad una vez a transcurrido el tiempo de retención en la unidad de sedimentación primaria. La (Figura 69) presenta una escala ajustada de 0 a 0.1 m/s.

En la sección superior donde finaliza la tubería de ingreso la velocidad se reduce producto del cambio en el área de flujo, permitiendo facilitar el proceso de sedimentación de las partículas.

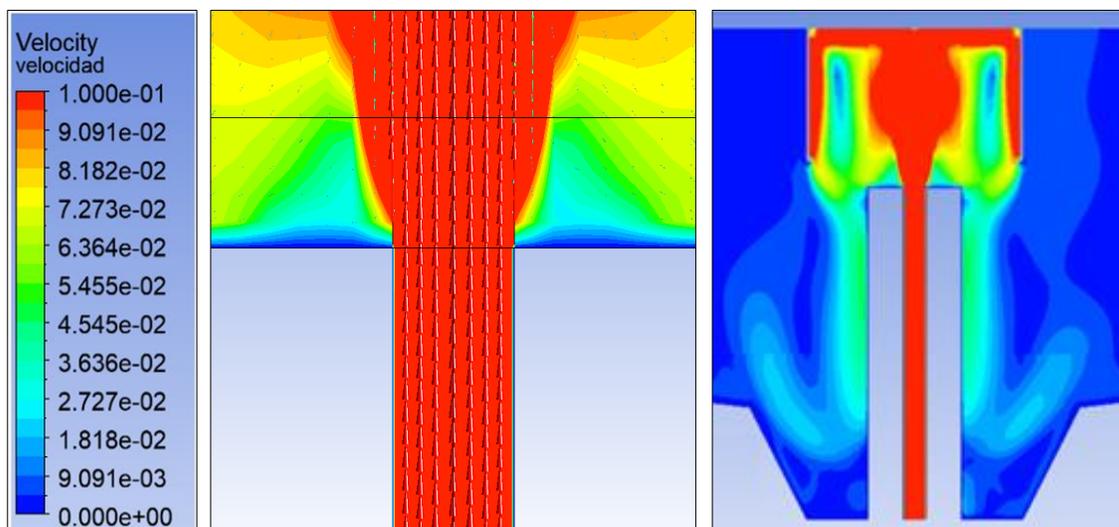


Figura 69. Perfil de flujo región de entrada.

Sobre la región de la ventana de acceso o transición se identifica como el flujo inmediatamente empieza a reducir la velocidad inicial y las líneas de corriente generan un movimiento ascensional del fluido hasta la región superior de la estructura.

En este punto la trayectoria de flujo pierde velocidad hasta encontrarse con la región delimitada por el baffle o pantalla deflectora del sedimentador. En esta zona se puede observar la recirculación del flujo y la conformación de zonas donde la aglomeración de partículas se genera permitiendo incrementar su diámetro y aumentar la velocidad con la cual se decantan.

Como tal en esta región se puede observar un elemento particular, el cual es la bifurcación y disipación de la velocidad de flujo a lo largo de la región de desplazamiento del fluido. En las regiones más próximas a la pantalla deflectora del flujo se presentan velocidades inferiores a 0.2 m/s, aumentando la eficiencia del proceso de sedimentación. En la (Figura 70) se presentan los perfiles de flujo en la región de entrada para el campo de velocidades.

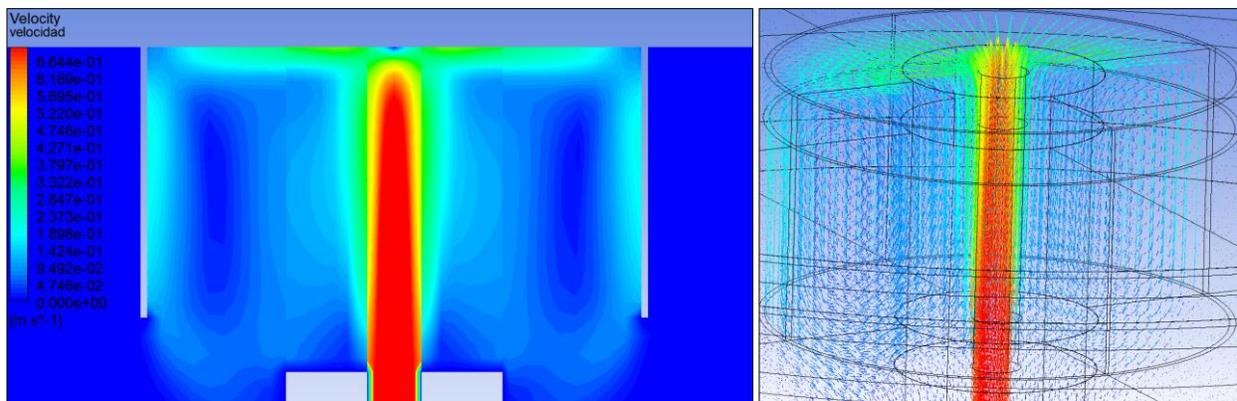


Figura 70. Perfil de flujo región de entrada.

La pantalla deflectora del flujo cumple su función de quitarle velocidad a las partículas obligándolas a recorrer una trayectoria en dirección a la tolva como se muestra en la (Figura 71).

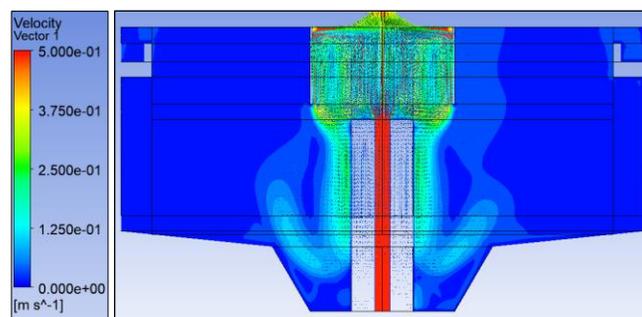
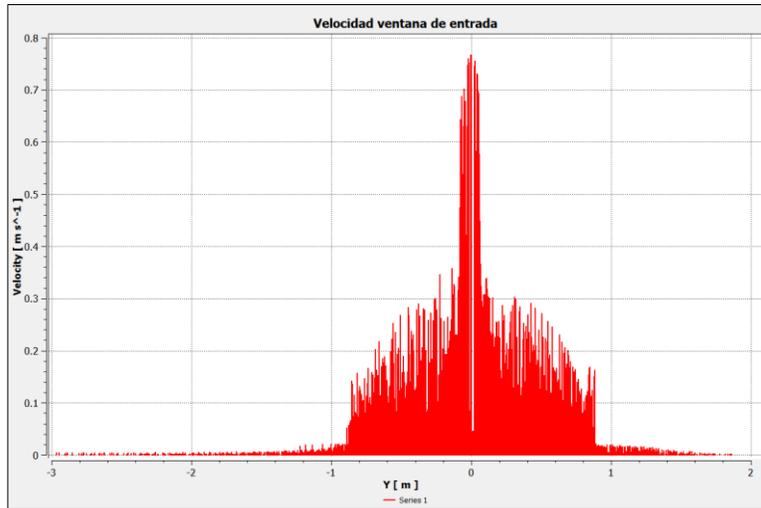


Figura 71. Patrón de flujo sección pantalla.

En la (Gráfica 2) se presenta los valores de la velocidad en la región de la pantalla deflectora del flujo sobre el plano Y para el sedimentador primario.



Gráfica 2. Velocidad sobre el plano Y en la ventana de ingreso

Es importante hacer énfasis en el comportamiento de la velocidad de flujo en la región de la tolva, donde las velocidades son cercanas a 0.02 m/s, lo cual representa una reducción de la velocidad en la estructura cercana al 97% y permite que el proceso de sedimentación no se vea afectado por el efecto de resuspensión de las partículas con diámetros superiores a 50 μm en esta zona, sin embargo, se presenta la resuspensión de las partículas más finas, con diámetros iguales o menores a 10 μm .

La eficiencia en la remoción de partículas más finas se puede ver afectada directamente por los patrones de recirculación del flujo sobre la región de la tolva, los cuales causan problemas cuando las partículas no tiene la densidad y el peso suficiente para sedimentarse bajo las condiciones hidrodinámicas de la estructura. En la (Figura 72) se presenta los patrones y velocidades de flujo en la región de la tolva.

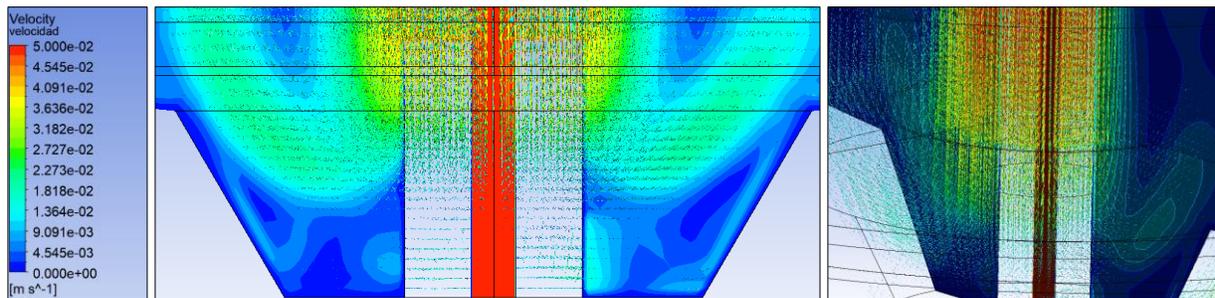


Figura 72. Perfil de flujo en la tolva.

Para la parte intermedia o región horizontal de flujo en la estructura de sedimentación primaria, el flujo se comporta de tal manera que las velocidades son muy próximas a cero y las partículas más pesadas mayores a $50 \mu\text{m}$, tienen a mantenerse decantadas y su resuspensión es casi mínima. En la (Figura 73) se presenta en detalle el comportamiento de las zonas cercanas a las paredes laterales del tanque.

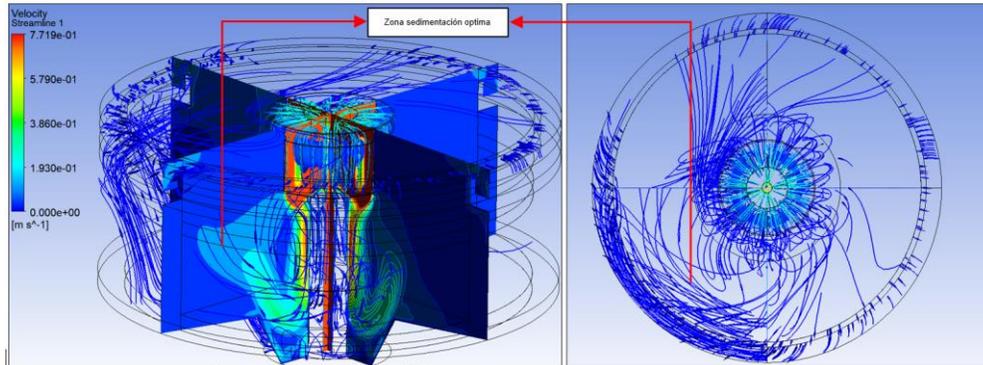


Figura 73. Líneas de corriente en las regiones extremas del tanque.

Sobre la sección del vertedero de salida, se puede observar un rango de velocidades menores a 0.1 m/s . Como se puede observar en la (Figura 74) las tendencias de flujo sobre la región de salida son determinadas por los esfuerzos cortantes generados sobre las paredes del canal perimetral, donde las velocidades son muy próximas a cero.

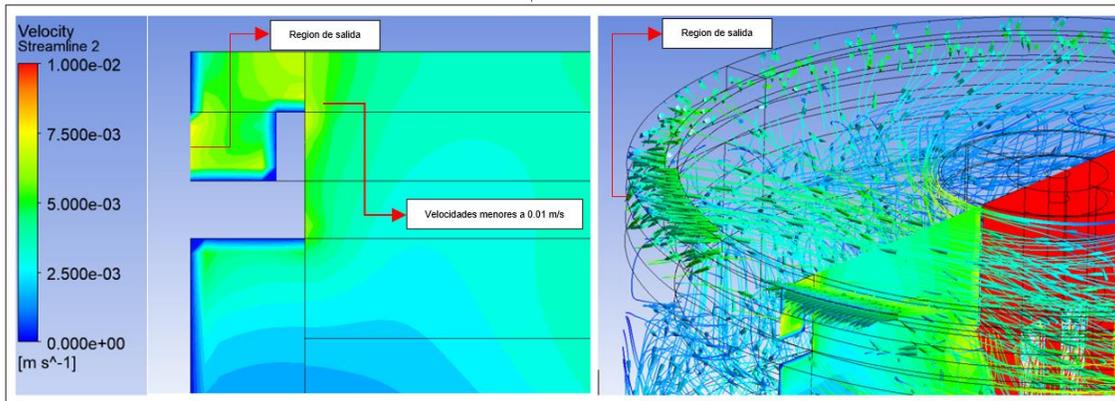


Figura 74. Líneas de corriente en la región de salida.

Sobre las regiones intermedias del canal de salida, se presentan velocidades inferiores a los 0.01 m/s , permitiendo reducir el arrastre de partículas de diámetros superiores a $80 \mu\text{m}$ en el efluente y transportan un bajo porcentajes de partículas superiores a los $50 \mu\text{m}$.

En general las regiones de flujo analizadas en la estructura de sedimentación primaria permiten determinar que a lo largo de la unidad la velocidad de flujo se ve reducida gracias a los elementos de disipación de energía, los giros y patrones de corriente que toma el flujo gracias a la geometría de la unidad, lo cual permite determinar que desde el punto de vista hidrodinámico las partículas reducirán su velocidad, elemento que permitirá que el sedimentador opere adecuadamente. En la (Figura 75) se presentan todos los patrones de flujo a lo largo de todo el dominio computacional considerado para la modelación del sedimentador primario.

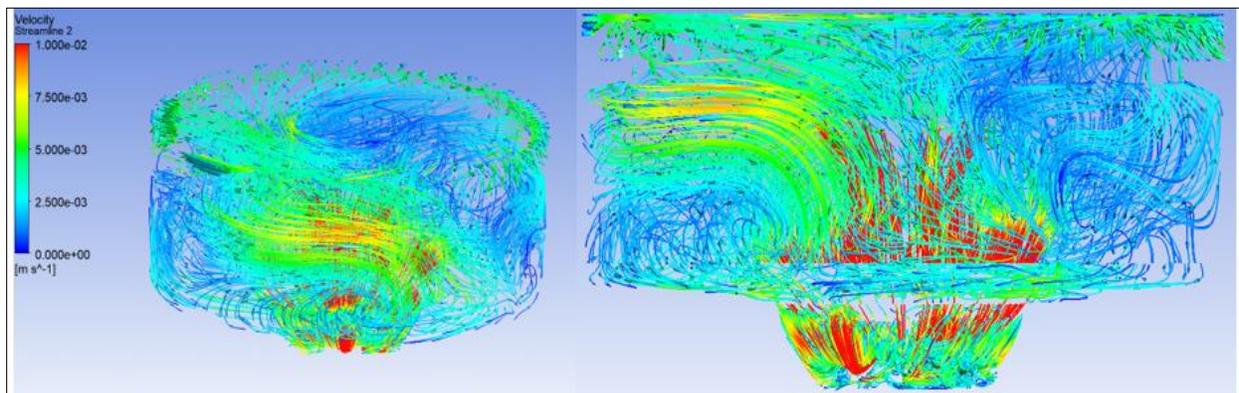


Figura 75. Patrones generales de flujo.

5.2.2. Eficiencia de sedimentación

Para evaluar la eficiencia de sedimentación de las partículas en la estructura de acuerdo con los valores obtenidos mediante el modelo se analizó el flujo másico entrante y saliente de la estructura, además de la fracción de volumen y las concentraciones.

Para el análisis de la sedimentabilidad en el tanque se consideran tres diámetros de partículas (10 μm , 50 μm y 80 μm) los cuales permiten determinar el rango de eficiencia de remoción de partículas de diferentes tamaños en la estructura.

Para el análisis se presenta la (Figura 76) la cual permite observar que sucede con la fracción de cada uno de los rangos de partículas evaluados.

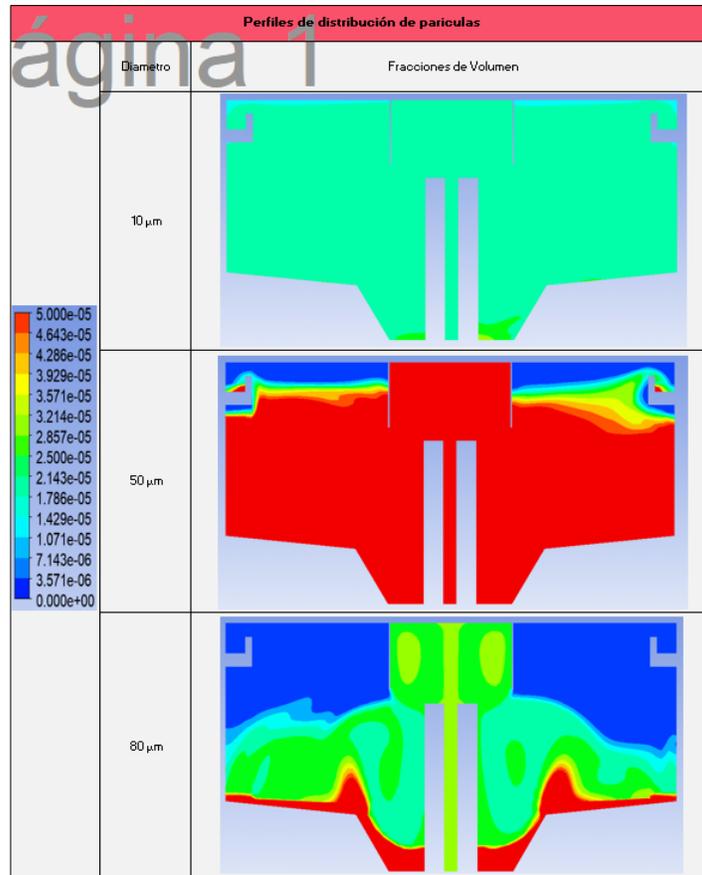


Figura 76. Patrones de fracción de cada uno de los rangos de partículas evaluados.

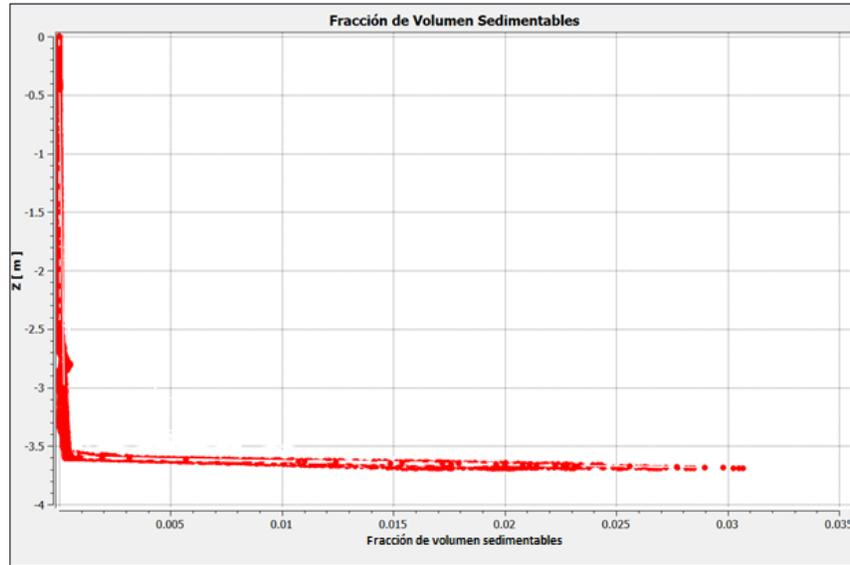
Como se visualiza en la figura (Figura 76) la distribución de partículas a lo largo del dominio de la estructura de sedimentación varía en función del diámetro de las partículas, definiendo un claro patrón de sedimentación muy eficiente para las partículas mayores a 80 μm , reduciéndose para las de 50 μm y finalmente las partículas de menor diámetro a 10 μm las cuales en su gran mayoría no son retenidas en la estructura de sedimentación dimensionada.

Tabla 32. Fracciones de volumen para los diferentes diámetros analizados de partículas

Fracciones de volumen outlet			
Sólidos Suspending Totales (SST) mg/L	<u>65.41</u>		
Nombre partículas	Diámetros tomados	Fracción de volumen	Densidad partículas
Suprame	10 μm	0.0000179079	1396.534 kg/m ³
Suprama	50 μm	0.0000284939	1396.534 kg/m ³
Sedimentables	80 μm	0.0000004332	1396.534 kg/m ³

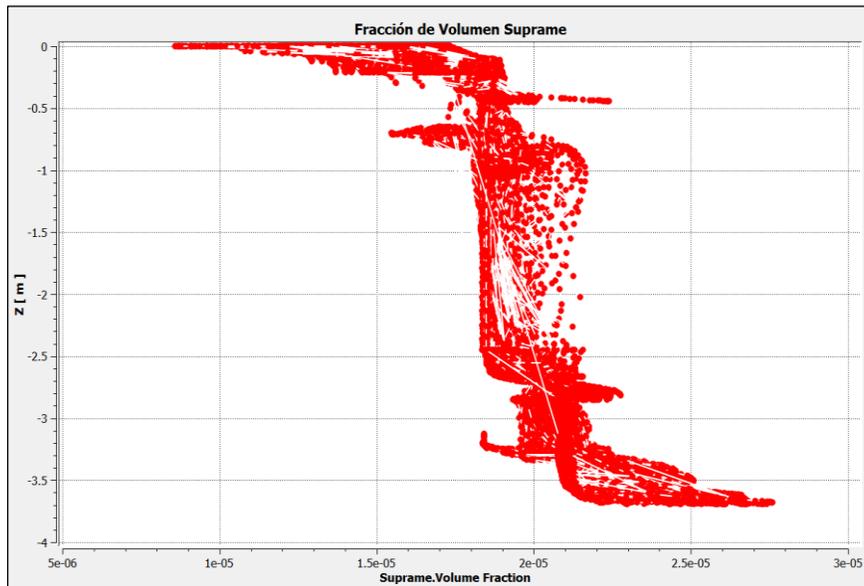
Fuente: Autor.

De acuerdo con la (Gráfica 3), se puede determinar que las partículas denominadas como sedimentables ($80\ \mu\text{m}$), tienen una velocidad de sedimentación aceptable debido que en el efluente la concentración es un 98.47% inferior a la concentración del afluente. La mayor parte de la fracción de volumen se encuentran depositas sobre la región de la tolva.



Gráfica 3. Fraccion de volumen particulas de $80\ \mu\text{m}$.

Para la fracción de solidos de $50\ \mu\text{m}$ la unidad de sedimentación primaria retiene alrededor de la mitad de las partículas en este rango, como se puede observar en la (Gráfica 4).



Gráfica 4. Fracción de volumen particulas de $10\ \mu\text{m}$.

Para evaluar las eficiencias obtenidas se emplean las fracciones de volumen correspondientes a cada uno de los diámetros analizados en el modelo, teniendo en cuenta el valor en el afluente y el efluente. Para estimar la eficiencia se emplea la (Ecuación 42) y se presentan los resultados en la (Tabla 26).

$$E = \frac{fv_{Inlet} - fv_{Outlet}}{fv_{Inlet}} \cdot 100\% \quad \text{Ecuación 42}$$

Donde:

fv_{Inlet} : fracción de volumen en la entrada

fv_{Outlet} : fracción de volumen en la salida

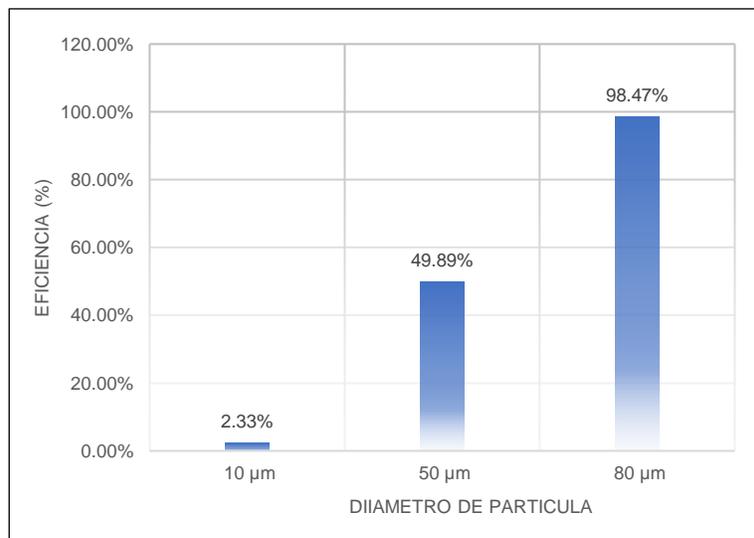
E : eficiencia de remoción (%)

Tabla 33. Eficiencia de remoción para las fases particulada.

Nombre partículas	Eficiencia	
	Diámetros tomados	Eficiencia de remoción
Suprame	10 µm	2.33%
Suprama	50 µm	49.89%
Sedimentables	80 µm	98.47%

Fuente: Autor.

Como se muestra en la (Tabla 33) la eficiencia de remoción para cada una de las fases evaluadas está dada en función de su diámetro, mostrando que a mayor diámetro mayor es la eficiencia de remoción en el sedimentador, por lo que el modelo obtenido es totalmente funcional y coherente con lo planteado para la teoría de sedimentación de acuerdo con Metcalf and Eddy Inc. (2003).



Gráfica 5. Eficiencia de remoción para los diámetros de partículas evaluados.

Para analizar el comportamiento en el fondo del tanque sedimentador se efectuaron gráficos de contorno de las fracciones de volumen en la tolva y en los planos ZX y ZY de la estructura, tomando un rango ajustado para poder comparar los resultados obtenidos para las tres fases. En la (Figura 77) se presentan los resultados obtenidos.

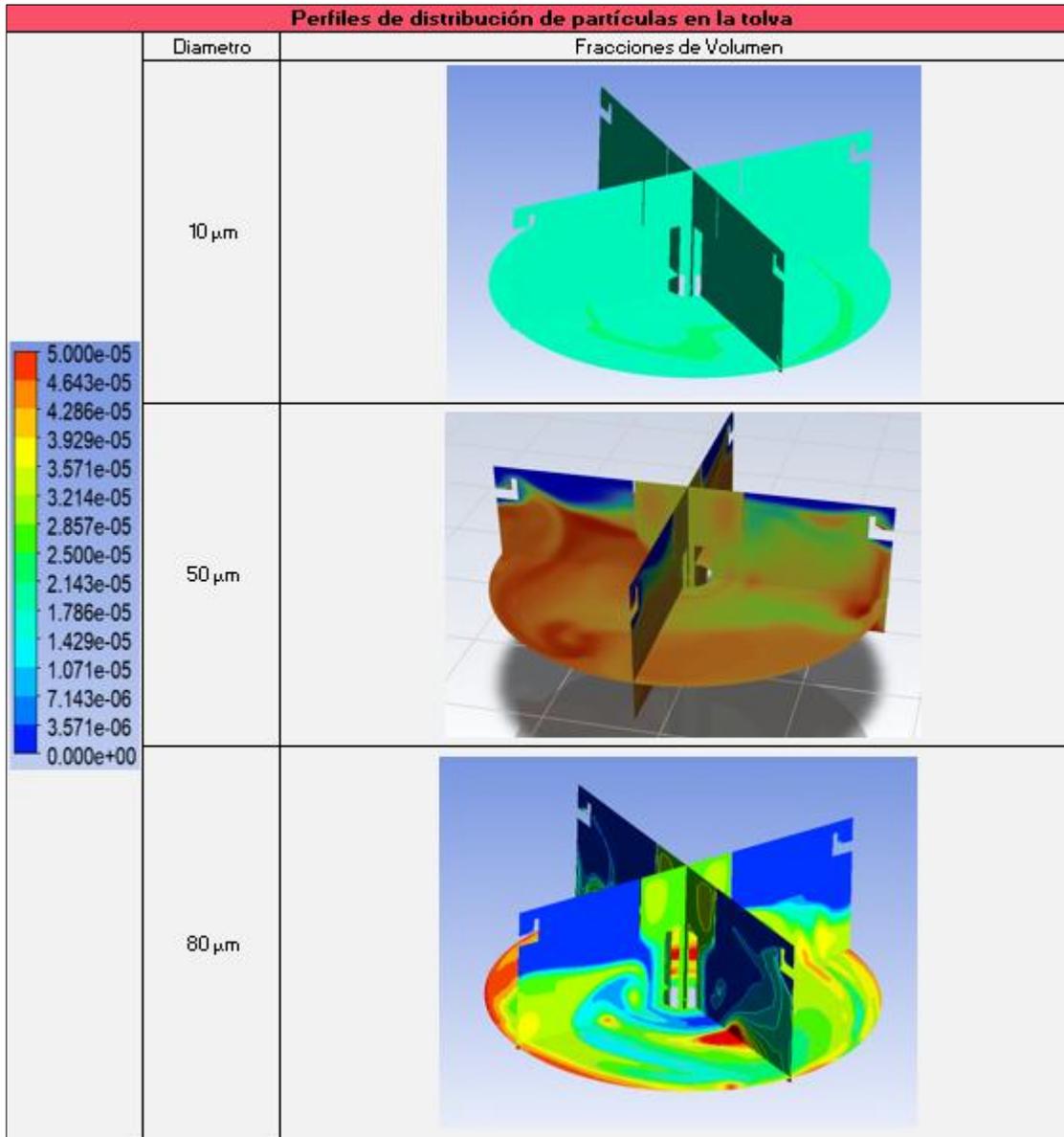


Figura 77. Patrones generales para las fracciones de volumen de 10, 50 y 80 μm .

5.2.3. Energía cinética turbulenta

Para el análisis de la energía cinética turbulenta, se tiene en cuenta la tasa de disipación de energía del modelo de turbulencia y la energía cinética turbulenta en el rango global y un rango ajustado.

Para las zonas cercanas a la pantalla deflector y la ventana de acceso a la estructura se pueden observar los valores más altos para la energía cinética turbulenta, generados por la variación en el área de la sección de flujo. Adicionalmente, en las regiones donde el fluido toma una trayectoria en dirección a la tolva del tanque se genera un valor considerable teniendo en cuenta que no se produce una disipación absoluta e instantánea de la energía cinética del fluido.

Cuando en las estructuras de sedimentación se presentan valores de energía cinética altos, superiores a $0.0025 \text{ m}^2/\text{s}^2$, se considera la generación de zonas de resuspensión de partículas, teniendo en cuenta que en la trayectoria el fluido cuenta con energía suficiente para desplazar las partículas más livianas en el tanque en sentido atencional o fuera del rango de sedimentación, como lo expone Enriquez (2019).

Para aumentar la eficiencia de remoción de las partículas más finas, con diámetros de $10 \mu\text{m}$ y menores, es necesario considerar la reducción de la energía cinética turbulenta que el fluido tiene durante el recorrido sobre la región de la pantalla disipadora, por lo que es posible considerar la modificación u optimización de los baffles que permiten reducir la energía que el fluido trae al momento de ingresar a la unidad.

Si bien es ideal garantizar velocidades en la tubería de acceso mayores a 0.6 m/s para evitar la decantación y colmatación de sólidos en las tuberías, es necesario analizar y considerar que a mayor velocidad menor eficiencia tiene la estructura de sedimentación.

Otra variable de directa relación con la tasa de disipación de energía y la energía cinética turbulenta, es la acumulación de lodos en el fondo de la unidad que con el tiempo incrementa, creando un escenario crítico donde se puede dar la resuspensión de las partículas y su escape por el vertedero de salida de la estructura.

Sobre las regiones del manto de lodo o fondo del tanque, es necesario considerar que la energía y la recirculación del flujo, promovido por una baja tasa de disipación de energía provocan problemas en la extracción de los lodos y en la homogeneidad de estos en la estructura. Lo

anterior considerando que, para garantizar una alta eficiencia y continuidad en la fase decantada, es necesario garantizar una energía cercana a cero o de cero en el fondo de la estructura.

En la (Figura 78) se muestran los resultados obtenidos para la energía cinética turbulenta en el rango global y en un rango ajustado, adicionalmente se muestra el comportamiento de la tasa de disipación de energía en el modelo estudiado.

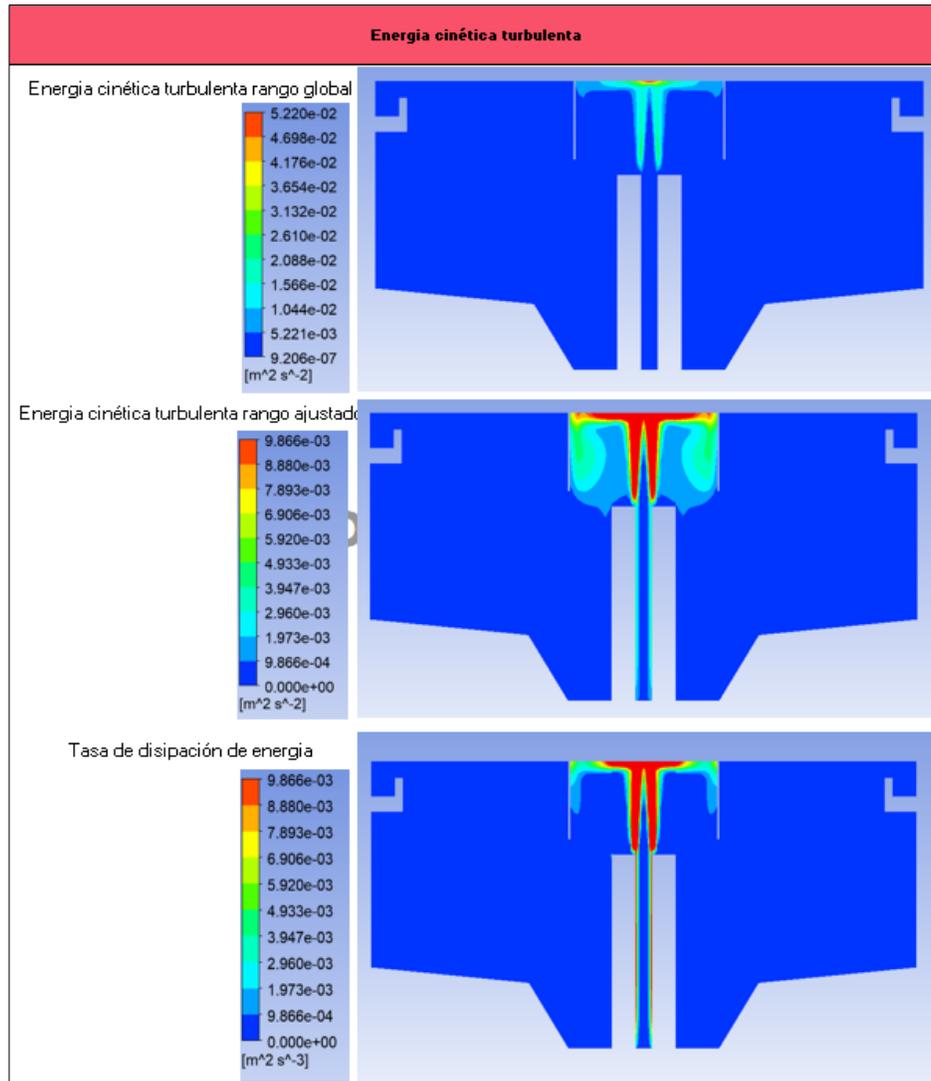


Figura 78. Energía cinética turbulenta y tasa de disipación de energía.

Como se muestra, la tasa de disipación de energía es alta en las regiones donde el flujo se encuentra con la pantalla deflectora del flujo, pero en las zonas donde la tendencia del flujo es totalmente horizontal y vertical sin elementos complementarios de disipación se presentan valores cercanos a cero, lo cual permite la resuspensión de los sólidos más livianos.

5.3. Validación del modelo

La presente sección se centra en efectuar una aproximación para validar el modelo, se tomó como unidad de comparación un sedimentador primario ubicado en la región del Tolima, Colombia, empleado para tratar las aguas residuales municipales y con una configuración aproximadamente similar a la del sedimentador diseñado.

Como referencia se tomó la concentración de los sólidos suspendidos totales afluentes al tanque sedimentador primario, estimando a partir de esta las fracciones de volumen que componen cada uno de los diámetros de partículas estudiados.

Si bien el ejercicio propuesto tiene como objetivo dar una aproximación a lo que sucederá con la unidad diseñada una vez sea puesta en marcha, es necesario identificar otros escenarios de análisis que puedan ayudar a incrementar la eficiencia de remoción de las partículas más livianas en la unidad de tratamiento.

En la (Tabla 34) se presentan los valores iniciales tomados para elaborar la modelación con los datos de la unidad existente.

Tabla 34. Concentración afluente sedimentador primario PTAR existente.

Agua cruda PTAR existente	
Parámetro	Valor
Concentración de SST en el afluente (mg/L)	163.65
Concentración de SST en el afluente al tanque de sedimentación primaria (mg/L)	107.49
Concentración de SST en el efluente al tanque de sedimentación primaria (mg/L)	54.00
Eficiencia remoción de sólidos suspendidos totales (Sedimentador) (%)	49.76%

Fuente: Adoptado de Cortolima (2012)

Tabla 35. Fracciones de volumen sedimentador diseñado y datos validación (Entrada).

Fracciones de volumen modelo validación				
Sólidos Suspendidos Totales afluente (SST)	107.49			
Nombre partículas	Diámetros tomados	Porcentaje en la fracción	Fracción de volumen	Densidad partículas
Suprame	10 µm	17.71%	0.0000136316	1396.534 kg/m3
Suprama	50 µm	54.95%	0.0000422949	1396.534 kg/m3
Sedimentables	80 µm	27.34%	0.0000210429	1396.534 kg/m3
Fracciones de volumen modelo diseño				
Sólidos Suspendidos Totales afluente (SST)	144.50			
Nombre partículas	Diámetros tomados	Porcentaje en la fracción	Fracción de volumen	Densidad partículas
Suprame	10 µm	17.71%	0.0000183250	1396.534 kg/m3
Suprama	50 µm	54.95%	0.0000568571	1396.534 kg/m3
Sedimentables	80 µm	27.34%	0.0000282880	1396.534 kg/m3

Fuente: Autor.

Con base en las fracciones de volumen estimadas y presentadas en la (Tabla 35), se efectúa la modelación para los datos del sedimentador tomado como unidad de referencia. Mediante la modelación se busca evaluar la eficiencia que se obtiene y comparar el resultado con la eficiencia obtenida mediante la modelación de la unidad diseñada y los datos de referencia obtenidos de la unidad existente.

En la (Tabla 36) se presentan los resultados obtenidos para el modelo efectuado con los datos de concentración de SST en el afluente al tanque de sedimentación primaria (mg/L) existente.

Tabla 36. Fracciones de volumen sedimentador diseñado y datos validación (Salida).

Fracciones de volumen efluente			
Sólidos Suspendidos Totales efluente (SST) mg/L	49.23		
Nombre partículas	Diámetros tomados	Fracción de volumen	Densidad partículas
Suprame	10 µm	0.00001337034	1396.534 kg/m3
Suprama	50 µm	0.00002163456	1396.534 kg/m3
Sedimentables	80 µm	0.00000024991	1396.534 kg/m3

Fracciones de volumen outlet			
Sólidos Suspendidos Totales efluente (SST) mg/L	<u>65.41</u>		
Nombre partículas	Diámetros tomados	Fracción de volumen	Densidad partículas
Suprame	10 µm	0.0000179079	1396.534 kg/m3
Suprama	50 µm	0.0000284939	1396.534 kg/m3
Sedimentables	80 µm	0.0000004332	1396.534 kg/m3

Fuente: Autor.

Con base en los datos presentados en la (Tabla 36) y la (Ecuación 42) se estiman las eficiencias de remoción para cada una de las fases discretas estudiadas. En la (Tabla 37) se presentan las eficiencias estimadas con base en los resultados obtenidos.

Tabla 37. Eficiencia de remoción para las fases particulada.

Eficiencia		
Nombre partículas	Diámetros tomados	Eficiencia
Suprame	10 µm	1.92%
Suprama	50 µm	48.85%
Sedimentables	80 µm	98.81%

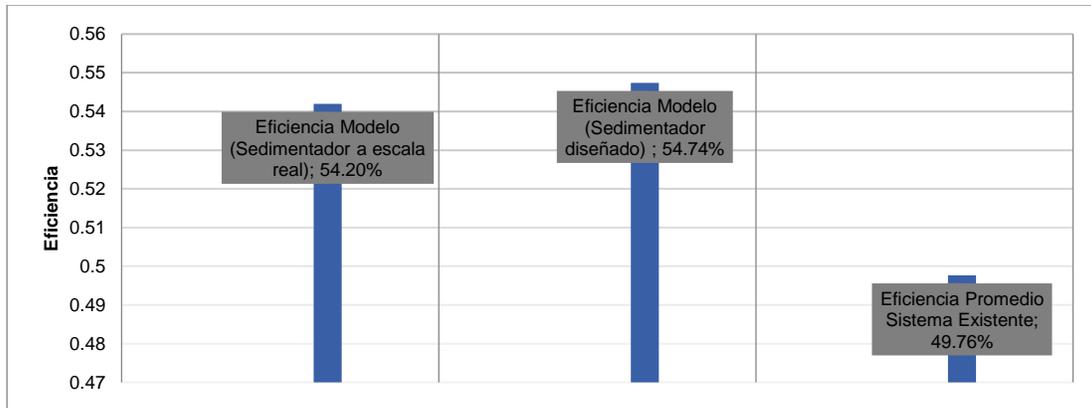
Fuente: Autor.

Tomando los resultados obtenidos y presentados en las (Tablas 32, 35 y 36), se estiman las eficiencias mediante la (Ecuación 42), para cada uno de los modelos efectuados.

$$E_{\text{Modelo sedimentador diseñado}} = \frac{144.50 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 65.41 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{144.50 \frac{\text{mg}}{\text{L}}} \cdot 100\% = 54.74\%$$

$$E_{\text{Modelo sedimentador existente}} = \frac{107.49 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 49.23 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{107.49 \frac{\text{mg}}{\text{L}}} \cdot 100\% = 54.20\%$$

De acuerdo con las eficiencias estimadas, se presenta en la (Grafica 6) en resumen los valores obtenidos.



Gráfica 6. Eficiencia de remoción para los sistemas analizados.

De acuerdo con los datos obtenidos mediante las simulaciones efectuadas, se puede afirmar que el modelo desarrollado para el sedimentador primario diseñado se aproxima al comportamiento de una estructura de sedimentación existente, considerando el grado de similitud que tiene en relación con los datos obtenidos de la estructura de sedimentación existente en la región del Tolima.

En la (Figura 79) se presentan las fracciones de volumen para los modelos elaborados.

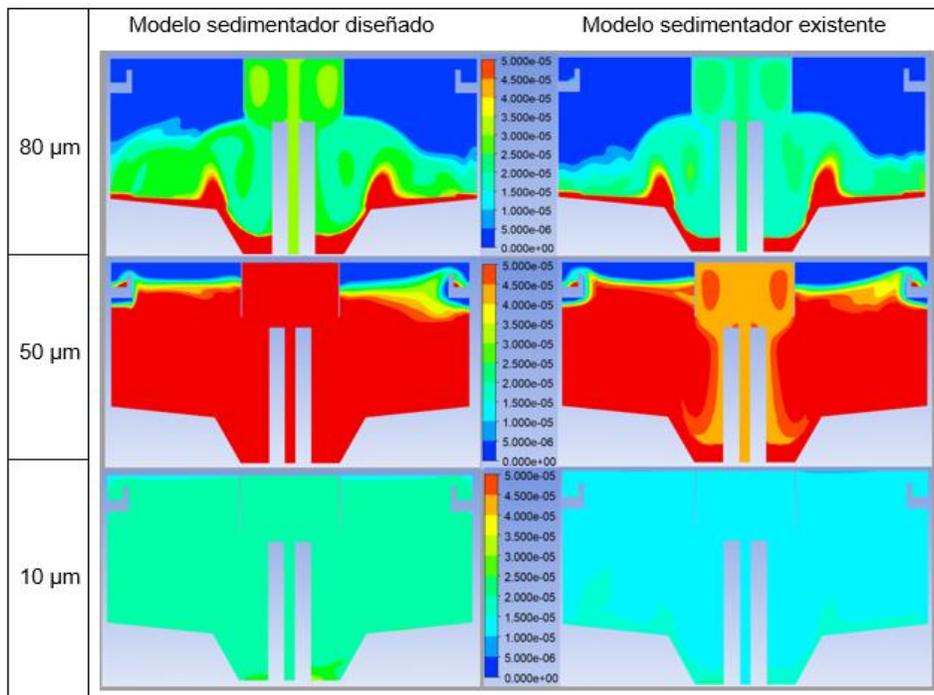


Figura 79. Fracciones de volumen para el modelo de validación y el modelo del sedimentador diseñado en rango ajustado.

Para evaluar de manera cuantitativa los resultados obtenidos en relación con la información operativa del sistema de tratamiento tomado como referencia para el estudio de la eficiencia de remoción, se cuantificaron los siguientes parámetros estadísticos, presentados en las (Tablas 38 y 39).

Tabla 38. Error porcentual del modelo de validación con respecto a los datos existentes.

Eficiencia Modelo	Eficiencia sistema existente	Error porcentual
54.20%	49.76%	8.91%

Fuente: Autor.

Tabla 39. Error porcentual del valor modelado con respecto al modelo de validación.

Eficiencia Modelo	Eficiencia sistema existente	Error porcentual
54.74	54.20%	1.0 %

Fuente: Autor.

Como se presenta en las (Tablas 38 y 39) el error generado es aceptable respecto con el comportamiento de la unidad de sedimentación primaria de referencia.

Se puede concluir que el modelo desarrollado se adapta adecuadamente para efectuar el análisis de la unidad de sedimentario primaria diseñada bajo diferentes condiciones de operación. Los métodos de discretización y los esquemas numéricos empleados para describir el comportamiento de la unidad de sedimentación se ajustan de forma adecuada al proceso físico desarrollado en la unidad de tratamiento estudiada.

5.4. Identificación de los elementos de mejora y optimización del sedimentador

Con base en el estudio desarrollado es posible determinar que la geometría de la estructura de sedimentación estudiada, cumplirá de forma adecuada con su función de remoción de sólidos. Sin embargo, es necesario considerar que cuando se den sobrecargas orgánicas, es necesario contemplar la posibilidad de implementar elementos complementarios que ayuden a remover los sólidos más livianos que puedan escaparse del manto de lodos de la estructura y por ende reducir la eficiencia del sistema.

Como resultado del modelo se puede inferir que las partículas con diámetros menores a 50 μm saldrán en el efluente del tanque sedimentador en un 50%, por ende, la eficiencia del sistema estará ligada a la composición granulométrica del agua residual afluyente al sedimentador.

Como producto del presente modelo elaborado se plantea la necesidad de efectuar un análisis mediante modelos físicos en conjunto con CFD, de elementos complementarios que se puedan construir en la estructura con la finalidad de reducir la energía cinética turbulenta en las zonas de recirculación y las zonas de resuspensión de la unidad.

Para ello el presente estudio permite proponer, que con la modificación del baffle deflector de flujo, es posible incrementar la eficiencia de remoción de las partículas menores 10 μm en la unidad de tratamiento, mediante la creación de un sección acampanada que permita que los sólidos no se sometan a un proceso de resuspensión en sentido lateral al vertedero perimetral de salida.

Otro elemento que se plantea analizar como producto del presente estudio, es la construcción de una pantalla adicional ubicada de forma perimetral antes de la sección del vertedero de salida, la cual permite aumentar la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta en la zona final del tanque y evitar que se escapen sólidos livianos que generan líneas de trayectoria hasta esta sección del dominio de flujo en la unidad.

Finalmente, es necesario afirmar que la eficiencia de la unidad estará dada en función del control de los procesos de turbulencia generados por la resuspensión y recirculación del flujo y por ende de las partículas en los puntos críticos de la unidad, como los son la tolva y las paredes superiores del vertedero de salida, donde es necesario proponer alterativas que permitan aumentar la disipación de la energía del flujo en la estructura.

Capítulo 6. Conclusiones y Recomendaciones

Las poblaciones municipales en Colombia tienen diferentes retos respecto al saneamiento de sus aguas residuales y la forma en que se diseñan, construyen y operan los sistemas de tratamiento que permiten controlar la contaminación generada sobre los recursos hídricos.

Es necesario abordar la problemática anteriormente descrita en el país, implementando herramientas de gestión que articulen las fases que estructuran los proyectos de saneamiento municipal.

Con el fin de implementar dichas herramientas de gestión, es necesario emplear la dinámica de fluidos computacional, en el planteamiento de alternativas y diseño de los sistemas de tratamiento de las aguas residuales, permitiendo optimizar su eficiencia y desempeño.

La investigación desarrollada se enfocó en el dimensionamiento de una estructura de sedimentación primaria típica para el tratamiento de las aguas residuales domésticas, tomando como caso de estudio una población municipal del departamento del Tolima y comparando los resultados obtenidos con los de un sedimentador primario real en operación con características similares ubicado en el mismo departamento. La estructura de sedimentación proyectada y modelada atiende una población para el periodo de diseño de 3025.5 habitantes y un caudal medio diario de 5.52 L/s. Se busca remover los sólidos sedimentables y una fracción de los sólidos supracoloidales, es decir los sólidos con diámetro superior a los 100 μm y entre los 10 a 100 μm respectivamente.

Mediante la modelación efectuada en ANSYS FLUENT se estudió el comportamiento hidrodinámico y las eficiencias de remoción de los sólidos en la unidad de sedimentación primaria diseñada. El modelo se aproxima a la realidad, lo que permitió evaluar como operara el sistema diseñado y recomendar mejoras en los componentes de la estructura convencional para incrementar la eficiencia en el proceso.

Atendiendo el objetivo del estudio, se evaluó la influencia de diferentes variables de diseño para determinar su grado de relevancia en el diseño del proceso de sedimentación primaria. Se encontró que la velocidad de flujo en la sección de acceso a la unidad determina los patrones de flujo y trayectoria en el sedimentador. Adicionalmente se encontró que la tasa de desbordamiento superficial es de gran importancia en el diseño de sedimentadores primarios, puesto que permite determinar la relación entre la profundidad y el área de la unidad, lo cual juega un papel

fundamental en la generación de altas o bajas velocidades de flujo horizontal y vertical en el proceso de sedimentación.

Adicionalmente, con el modelo desarrollado fue posible estudiar una variable que hidráulicamente no se cuantifica mediante el diseño convencional del proceso de sedimentación, que es la tasa de disipación de energía cinética turbulenta, la cual permite identificar las posibles zonas de resuspensión y recirculación del flujo, las cuales reducen la eficiencia de sedimentación de las partículas coloidales y supracoloidales.

Para la elaboración del modelo se analizaron diferentes densidades de malla y pasos de tiempo de acuerdo con la disponibilidad de recursos computacionales en el desarrollo del presente estudio. El proceso permitió determinar que para la modelación de sistemas de sedimentación primaria en estado no permanente, es adecuado hacer uso de esquemas numéricos de orden superior y emplear pasos de tiempo pequeños para obtener una mejor aproximación del campo de presión.

De acuerdo con la evaluación de las diferentes discretizaciones de la geometría se encontró que los tiempos computacionales requeridos dependen fuertemente del número de elementos que la malla posea. La discretización seleccionada permite obtener resultados válidos de acuerdo con el comportamiento hidrodinámico de los sólidos en los procesos de sedimentación en tiempos de cálculo razonables.

Para el estudio de la concentración de sólidos y su distribución granulométrica en la unidad de sedimentación se empleó el modelo de mezcla, permitiendo describir la interacción de las fases discretas y continua en el agua residual doméstica. Se encontró que las partículas coloidales representadas por la fase discreta denominada Suprame con diámetros de 10 μm tienden a mantenerse en suspensión en la mezcla y la eficiencia de remoción en la unidad de estas es inferior al 2.5%. Por otro lado, las partículas denominadas como Suprama con diámetros de 50 μm tienden a generar patrones de resuspensión y arrastre en el flujo a velocidades inferiores de 0.1 m/s en la mezcla y una remoción en la unidad de sedimentación de alrededor del 50%. Finalmente, las partículas mayores o iguales a los 80 μm mostraron, una remoción cercana al 100%, ajustándose de forma adecuada al proceso estudiado por diversos autores como De Clercq (2003) y Enriquez (2019). Se concluye que el modelo de mezcla se ajusta de forma adecuada al proceso físico de sedimentación. Sin embargo, es importante anotar, que el modelo multifásico empleado considera las fases discretas y continua como una mezcla, lo cual implica

que emplea una ecuación de referencia para estimar las fracciones de volumen de las fases discretas, obteniendo una reducción del nivel de complejidad del problema.

De acuerdo con lo anterior, se aconseja desarrollar un modelo que permita analizar cada fase de forma independiente y no como una mezcla, para establecer con mayor detalle el comportamiento de cada componente granulométrico, con el fin de estimar si los resultados obtenidos mediante el modelo de mezcla se aproximan a los posiblemente obtenidos mediante un modelo más robusto como el Euleriano.

En lo que respecta al modelo de turbulencia empleado (k-épsilon estándar) para el desarrollo de la modelación del sedimentador primario, se estima que, a pesar de ser un modelo simplificado para el análisis del efecto del flujo turbulento en el proceso, se obtuvo un grado de aproximación adecuado. En las regiones del dominio computacional donde se espera que el flujo presente valores de energía cinética turbulenta superiores a $0.01 \text{ m}^2/\text{s}^2$, el modelo estimó valores alrededor de $0.03 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

En cuanto a la tasa de disipación de energía obtenida mediante la aplicación del modelo de turbulencia (k-épsilon estándar), tal como se esperaba, en la región superior de simetría y en las zonas cercanas a la pantalla deflectora del flujo, se presentaron los valores más altos de disipación. En conclusión, el modelo (k-épsilon estándar) es aplicable para describir el flujo turbulento en la simulación del proceso de sedimentación primaria, siendo económico computacionalmente y con una precisión aceptable.

De acuerdo con lo descrito en el presente capítulo, se concluye que mediante la presente investigación fue posible responder al objetivo general del proyecto de evaluar y analizar el comportamiento hidrodinámico y la eficiencia de remoción de los sólidos suspendidos totales en la unidad. Se obtuvo una eficiencia superior al 50%, empleando el software ANSYS FLUENT.

Finalmente, es importante resaltar que la aproximación efectuada para validar el modelo y las referencias teóricas muestran un ajuste adecuado al posible comportamiento hidrodinámico y físico de las partículas en el interior del sedimentador primario bajo las condiciones definidas en el diseño. Esta conclusión coincide con los estudios efectuados por varios investigadores en los últimos años en el campo de la dinámica de fluidos computacional aplicada a los procesos de tratamiento de aguas.

6.1. Recomendaciones

Una vez efectuado el estudio, se plantea la necesidad de emplear modelos más robustos, que permitan analizar factores complementarios a los tenidos en cuenta en el presente estudio, como lo son los efectos de las corrientes de temperatura en el agua residual contenida en una unidad de sedimentación, los efectos de agitación generados por corrientes de viento sobre la superficie de las unidades y los patrones de cambio en las partículas en función de vibraciones externas en las unidades.

Si bien los resultados obtenidos mediante la modelación desarrollada se ajustan a los procesos hidrodinámicos y físicos en el proceso de sedimentación primaria, es recomendable considerar la construcción de un modelo a escala de la unidad diseñada para comprar los datos obtenidos mediante el presente estudio.

Considerando que las plantas de tratamiento de agua residual en su afluente son sometidas a cambios en la concentración de las partículas suspendidas en el agua durante su operación, es recomendable desarrollar un modelo CFD complementario que permita analizar el funcionamiento de la unidad de sedimentación primaria diseñada bajo condiciones críticas de operación.

Se sugiere la elaboración de un estudio que analice el comportamiento de la unidad bajo condiciones de mayor concentración de partículas en el agua residual, con el fin de analizar su comportamiento bajo condiciones críticas.

Para la estructura de sedimentación estudiada, se recomienda emplear y modelar un baffle deflector más extenso que permita obligar a las partículas más livianas a ser desplazadas hasta el fondo de la estructura y adherirse al manto de lodos generado por los sólidos sedimentables, para de esta forma incrementar la eficiencia de remoción de los sólidos supracoloidales.

Capítulo 7. Bibliografía

- Adams, E. W., & Rodi, W. (1990). Modeling Flow and Mixing in Sedimentation Tanks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 895 - 913.
- Anastasios, S., Georgios, T., & Konstantinos, X. (2009). Design of Secondary Settling Tanks Using a CFD Model. *Journal of Environmental Engineering-asce*, 135(7).
- ANSYS. (29 de 01 de 2009). *ANSYS Fluent 12.0 User's Guide*. ANSYS Fluent.
- ANSYS. (2017). *ANSYS Fluent Tutorial Guide*. Canonsburg, PA 15317: 2600 ANSYS Drive.
- Arboleda, V. J. (2000). *Teoría y practica de la purificación del agua*. Bogotá D.C: McGraw Hill.
- Armijos, P. G. (2018). *Diseño de Canales Abiertos*. Alicante: Editorial Área de Innovación y Desarrollo,S.L.
- Avila, G. S. (1994). *Hidráulica general*. Mexico D.F: Editorial Limusa S.A.
- Baraya, J. R. (2017). *Comparación teórica entre las metodologías de diseño tradicionales y el uso de alternativas de CFD en el diseño de sedimentadores convencionales*. Bogotá D.C: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Berrío, B. J. (2015). *Simulación en CFD de un tanque de sedimentación secundaria con la implementación de un Modelo de Balance Poblacional (PBM)*. Bogotá D.C: Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Química.
- Betancourt, F., Bürger, R., Diehl, S., & Farås, S. (2014). Modeling and Controlling Clarifier-Thickeners Fed by Suspensions with Time-Dependent Properties. *Minerals Engineering*, 62, 91 -101.
- Comisión de regulación de saneamiento y agua potable (CRA). (2019). *Regulación Frente a Tarifas Por Actividad del Servicio - Tratamiento de Vertimientos*. Bogotá D.C.: CRA.
- Comisión Nacional del Agua - CONAGUA. (2008). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento - Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Pretratamiento y Tratamiento Primario*. Tlalpan, México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento.
- Comisión Nacional del Agua - CONAGUA. (2008). *Saneamiento - Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Pretratamiento y Tratamiento Primario*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento: Tlalpan, México, D.F.

- Cortolima. (2012). *Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en El Departamento*. Ibagué . DANE. (20 de Abril de 2020). *Geoportal DANE*. Obtenido de <https://geoportal.dane.gov.co/geovisores/territorio/consulta-divipola-division-politico-administrativa-de-colombia/>
- Davis, M. L. (2010). *Water and Wastewater Engineering. Design Principles and Practice*. New York: McGraw-Hill.
- De Clercq, B. (2003). *Computational Fluid Dynamics of Settling Tanks: Development of Experiments and Rheological, Settling, and Scraper Submodels*. Obtenido de Available at: http://library.wur.nl/WebQuery/clc/1698226%5Cnhttp://modeleau.fsg.ulaval.ca/fileadmin/modeleau/documents/Publications/PhD_s/declercqbob_sum.pdf.
- Deldar, S., Dehkordi, A., & Arani, H. (2018). Investigating the effect of flow entrance and existence of baffle on sedimentation efficiency using Discrete Phase Model (DPM). *Challenge in Nano and Micro Scale Science and technology*, 29-36.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE. (05 de 2022). *Geoportal DANE*. Obtenido de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>
- Enriquez, L. C. (2019). *Nueva configuración de un clarificador primario para el tratamiento del agua residual doméstica*. Santiago De Cali: Univeridad del Valle - Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente.
- Environmental Protection Agency - J. Capacasa. (2011). *Southampton Modeling Report*. Southampton: EPA.
- ESSS. (24 de 06 de 2016). *Dinámica de Fluidos Computacional: ¿que es?* Obtenido de ESSS Software: <https://www.esss.co/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/>
- Ganjare, A. V., & Patwardhan, A. W. (2019). CFD simulations of single-phase flow in settling tanks: comparison of turbulence models. *Indian Chemical Engineer*, 413 - 426.
- Goula, A. M., Kostoglou, M., Karapantsios, T. D., & Zouboulis, A. I. (2008). A CFD methodology for the design of sedimentation tanks in potable water treatment: Case study: The influence of a feed flow control baffle. *Chemical Engineering Journal*, 110 - 121.
- Hirrom, K., & Devi, T. T. (2022). Application of Computational Fluid Dynamics in Sedimentation Tank Design and Its Recent Developments: a Review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 1-26.
- Holmes, D. G., & Connell., S. D. (1989). Solution of the 2D Navier-Stokes Equations on Unstructured Adaptive Grids. *AIAA 9th Computational Fluid Dynamics Conference*. AIAA.

- IDEAM. (2019). *Estudio Nacional del Agua*. Bogotá: ideam:452pp.
- Imam, E., & McCorquodale, J. A. (1983). Simulation of Flow in Rectangular Clarifiers. *Journal of Environmental Engineering*, 713 - 730.
- Jordão, E. y. (2005). *Tratamento de esgoto doméstico*. Rio de Janeiro, Brasil.: ABES.
- Karki, K. C., & Patankar, S. V. (1989). Pressure-Based Calculation Procedure for Viscous Flows at All Speeds in Arbitrary Configurations. *AIAA Journal*, 27:1167-1174.
- Karpinska, A. M., & Bridgeman, J. (2015). CFD-Aided Modelling of Activated Sludge Systems – A Critical Review. *Water Research*, 70.
- Larsen, P. (1977). *On the hydraulics of rectangular settling basins*. Lund, Suecia: Department of Water Resources Engineering, Lund Institute of Technology, University of Lund.
- Launder, B. E., & Spalding, D. B. (London, England, de 1972). *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. London, England: Academic Press.
- Matko, T., Fawcett, N., Sharp, A., & Stephenson, T. (1996). Recent Progress in the Numerical Modelling of Wastewater Sedimentation Tanks. *Process Safety and Environmental Protection*, 245 - 258.
- Medina, M. V., & Laurent, J. (2020). Incorporation of a compression term in a CFD model based on the mixture approach to simulate activated sludge sedimentation. *Applied Mathematical Modelling*, 848 - 860.
- Mendía, B. S., & Pachón, M. d. (2016). *Reflexiones sobre el Derecho de Aguas en Colombia*. Bogotá D.C.: Universidad Externado de Colombia, pp.173 - 218.
- Mendonça, S. R. (2000). *Sistemas de lagunas de estabilización: Cómo utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadío*. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.
- Metcalf and Eddy, Inc. (2003). *Wastewater engineering: Treatment and reuse*. New York: McGraw-Hill.
- Metcalf, & Eddy. (2003). *Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse. 4 edition*. New York: Mc Graw Hill.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). *Resolución 330 de 2017*. Bogotá D.C: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.
- Monroe Environmental. (Agosto de 2022). *Monroe Environmental*. Obtenido de Monroe Environmental: <https://www.monroeenvironmental.com/>
- Neis, U., & Tiehm, A. (1997). Particle Size Analysis in Primary and Secondary Wastewater Effluents. *Water Science and Technology* 36(4), 151-158.

- Rhie, C. M., & Chow, W. L. (1983). Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Trailing Edge Separation. *AIAA Journal*, 21(11):1525-1532.
- Rodríguez, M. (1996). *Contribución al estudio de la degradación anaerobia de tensoactivos aniónicos: alquinbensulfonatos lineales, alquil sulfatos y alcoholes etoxilados sulfatos*. México D.F: Ingeniería Química. Universidad de Alicante.
- Romero Rojas, J. A. (2000). *Tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización*. Mexico D.F: Ed. Alfaomega. ISBN:970-15-0403-8.
- Romero, R. J. (1999). *Potabilización del Agua, 3a edición*. Mexico, D.F: ALFAOMEGA GRUPO EDITOR.
- Romero, R. J. (2013). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. Bogotá: Editorial Ecuena Colombiana de Ingeniería.
- Sánchez, S. H. (2014). *Modelación en CFD de un tramo del Río Arzobispo (Bogotá D.C)*. Bogotá D.C: Pontificia Universidad Javeriana.
- Sonune, A., & Ghate, R. (2004). Developments in Wastewater Treatment Methods. *Desalination*, 167, 55–63.
- Sperling, M. V. (2007). *Wastewater characteristics, treatment and disposal*. London: IWA publishing.
- Stamou, A. I. (1991). On the prediction of flow and mixing in settling tanks using a curvature-modified k- ϵ model. *Applied Mathematical Modelling*, 351 - 358.
- Stamou, A., Theodoridis, G., & Xanthopoulos, K. (2009). Design of Secondary Settling Tanks Using a CFD Model. *Journal of Environmental Engineering*, 135(7).
- Sturm, T. W. (2010). *Open Channel Hydraulics*. Dubuque, IA: McGraw-Hill.
- Tarpagkou, R., & Pantokratoras, A. (2012). CFD methodology for sedimentation tanks: The effect of secondary phase on fluid phase using DPM coupled calculations. *Applied Mathematical Modelling*, 3478 - 3494.
- Tebbutt, A. (1979). Primary Sedimentation of Wastewater. *Water Pollution Control Federation*, 51(12), 2858–2867.
- Torres, P. (2012). Perspectivas del Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales Domésticas en Países en Desarrollo. *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia*, ISSN 1794-1237 Número 18, 120.
- Tsukamoto, R. Y. (2002). Tratamiento Primario Avanzado: el Paradigma Moderno de Tratamiento de Aguas Residuales Sanitarias. *Acodal*, 3-6.

- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics The finite volume method*. Edinburgh: Pearson Education Limited.
- Von Sperling, M., & Chernicharo, C. A. (2005). *Biological wastewater treatment in warm climate regions*. London: IWA.
- Voutchkov, N. (2017). Introduction to Wastewater Clarifier Design. *SunCam*, 2 - 5. Obtenido de DOI:10.13140/RG.2.2.31568.92165
- Walt, J. (2002). *The modeling of water treatment process tanks*. Johannesburgo: Rand Afrikaans University.
- Water Environmental Federation-WEF. (2005). *Clarifier Design. Manual of Practice No. FD-8*.
- Zhang, D. (2014). *Optimize Sedimentation Tank and Lab Flocculation Unit by CFD*. Norwegian University of Life Sciences.

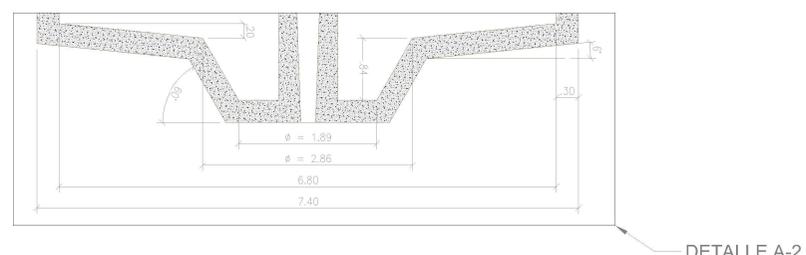
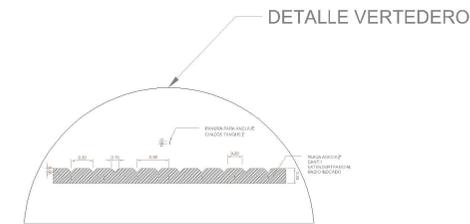
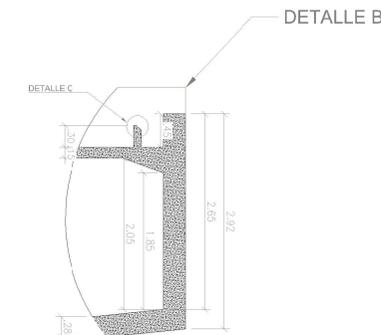
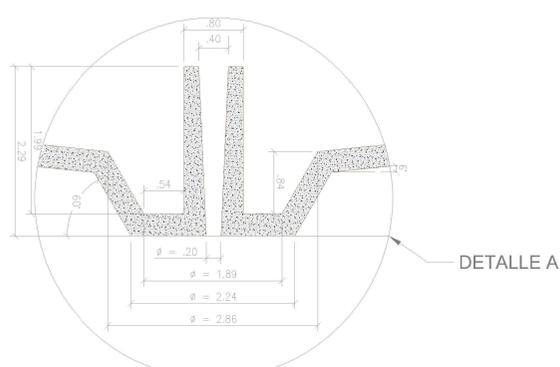
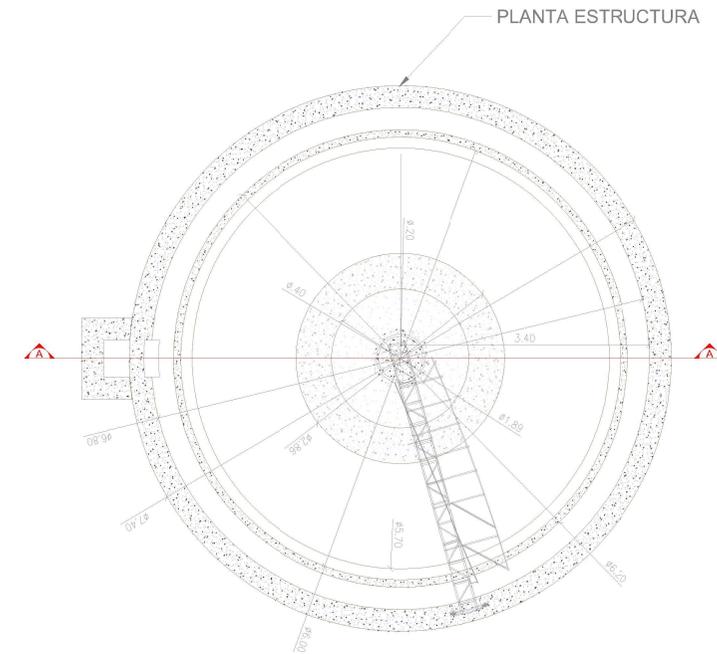
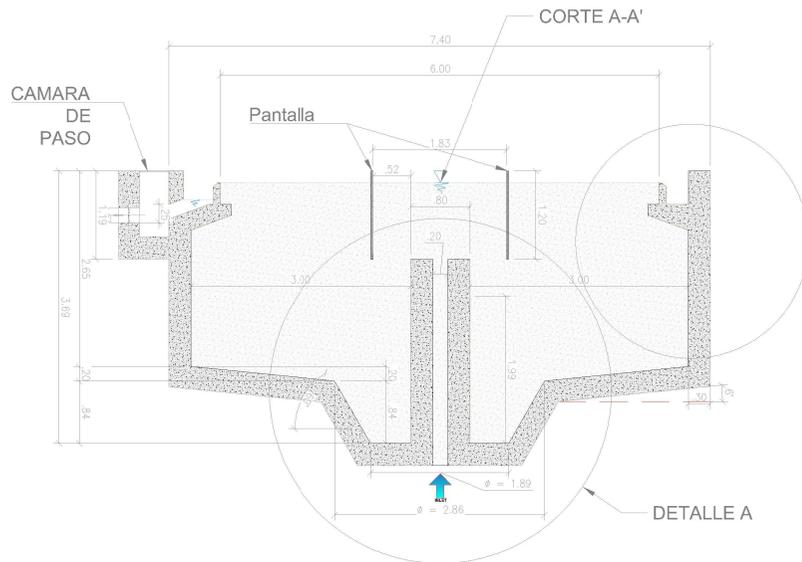
Capítulo 8. Anexos

8.1. ANEXO I - Memoria de dimensionamiento Sedimentador

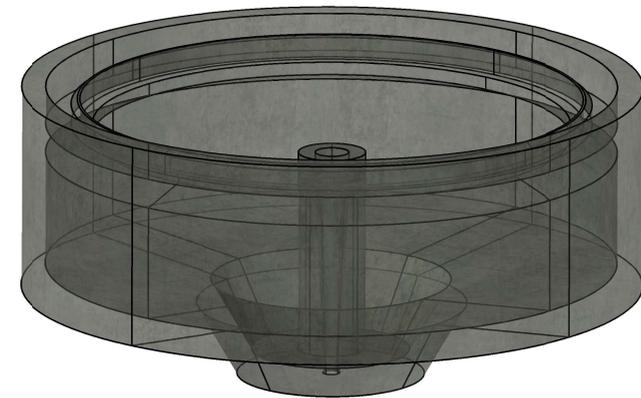
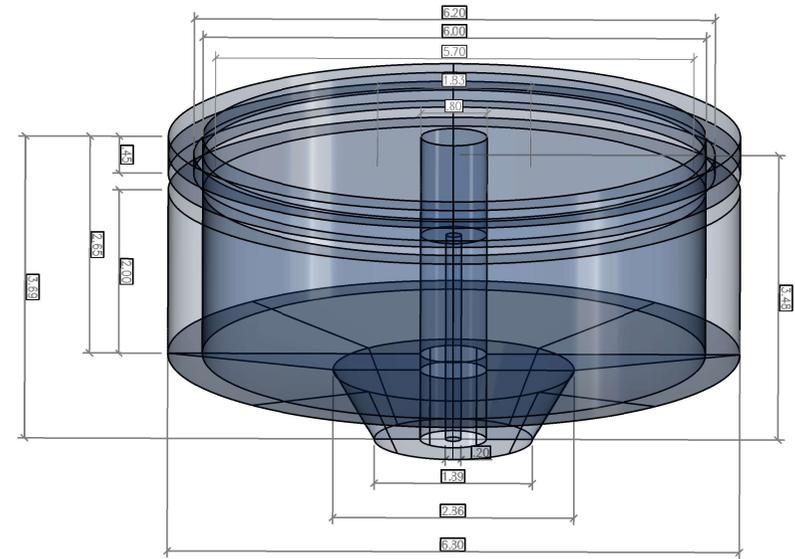
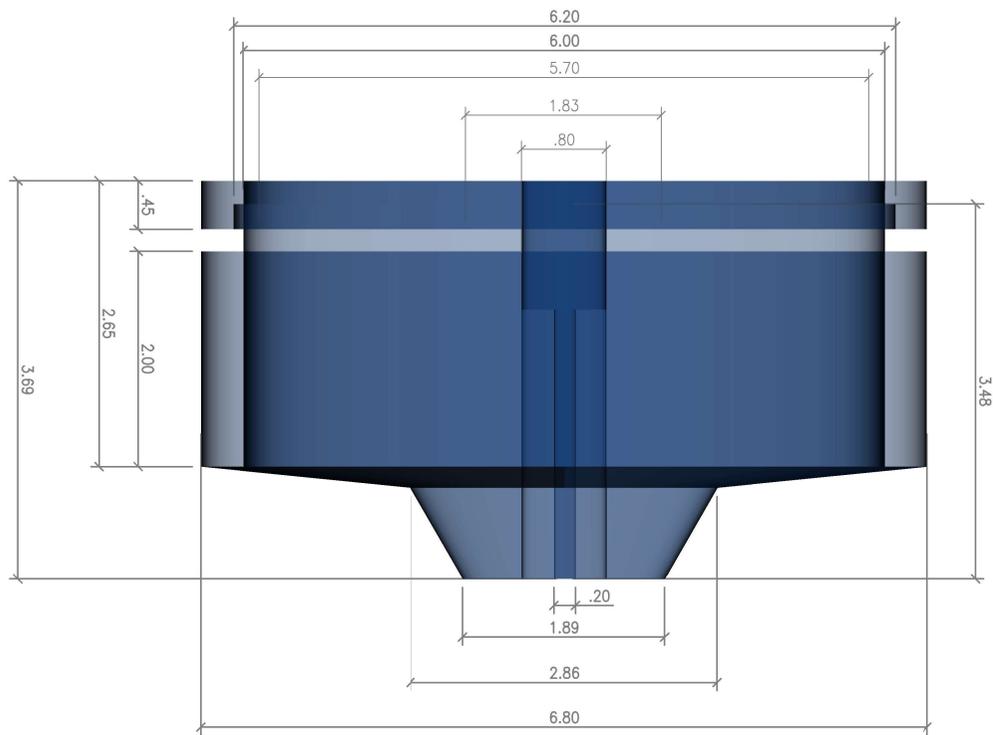
8.2. ANEXO II - Datos entrada modelo

8.3. ANEXO III - Resultados Modelación

8.4. ANEXO IV - Plano estructura de sedimentación dimensionada



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO JURADO: <u>Antonio Arenas Amado</u> JURADO: <u>Andrés Humberto Otalora</u>		MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL DIRECTOR DE LA TESIS: <u>Germán Ricardo Santos</u> ESTUDIANTE: <u>Miguel Ángel Díaz García</u>		 Modelación del flujo en 3D en el proceso de sedimentación para el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando ANSYS-FLUENT		CONTIENE: DIMENSIONES TANQUE SEDIMENTADOR SECUNDARIO REGIÓN DE FLUJO - CORTES Y PLANTA ESCALA: N/A		FECHA: 25/10/2022 PLANO N°. 1 DE 2	
---	--	--	--	--	--	--	--	---------------------------------------	--



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO		MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL			Modelación del flujo en 3D en el proceso de sedimentación para el tratamiento de aguas residuales domesticas utilizando ANSYS-FLUENT	CONTIENE: DIMENSIONES TANQUE SEDIMENTADOR SECUNDARIO REGIÓN DE FLUJO - CORTES Y PLANTA	FECHA: 25/10/2022
JURADO Antonio Arenas Amado	DIRECTOR DE LA TESIS Germán Ricardo Santos	ESTUDIANTE Miguel Ángel Diaz Garcia	ESCALA: N/A				PLANO No. 2 DE 2