



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



CENTRO INTERAMERICANO DE RECURSOS DEL AGUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“APLICACIÓN DE CFD-ANSYS-FLUENT EN EL ESTUDIO
HIDRODINÁMICO DE TANQUES DE RECIRCULACIÓN
EMPLEADOS EN ACUACULTURA”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS DEL AGUA

PRESENTA:

ING. BORIS MIGUEL LÓPEZ REBOLLAR

TUTOR ACADÉMICO: DR. HUMBERTO SALINAS TAPIA

TUTOR ADJUNTO: DR. DAURY GARCÍA PULIDO



TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO, SEPTIEMBRE DE 2015.



UAEM | Universidad Autónoma
del Estado de México

Facultad de Ingeniería

Ciudad Universitaria, Toluca; México, a 04 de Septiembre de 2015.

**ING. BORIS MIGUEL LÓPEZ REBOLLAR.
P R E S E N T E.**

A continuación describo el tema y el capitulado aprobado por esta Institución para el desarrollo de su tesis dirigida por el Tutor Académico DR. EN ING. HUMBERTO SALINAS TAPIA y el Tutor Adjunto DR. DAURY GARCÍA PULIDO de la Maestría en Ciencias del Agua, siendo:

**“APLICACIÓN DE CFD-ANSYS-FLUENT EN EL ESTUDIO HIDRODINÁMICO DE
TANQUES DE RECIRCULACIÓN EMPLEADOS EN ACUACULTURA”**

RESUMEN

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 2. SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN ACUÍCOLA (SRA)

CAPÍTULO 3. DINÁMICA DE FLUÍDOS COMPUTACIONAL (CFD)

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

Asimismo, para la aprobación de la tesis y demás trámites deberá sujetarse al reglamento respectivo de esta Institución.

**Atentamente
Patria, Ciencia y Trabajo**

“2015, Año del Bicentenario Luctuoso de José María Morelos y Pavón”

**M. EN. I. RAÚL VERA NOGUEZ
DIRECTOR**



FACULTAD DE INGENIERÍA
U. A. E. M.



Cerro de Coatepec S/N, Ciudad Universitaria; Toluca México
Tel. (722) 2-14-08-55 / 2-15-13-51

www.uaemex.mx

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a DIOS, por darme la fortaleza, fe y esperanza para realizar las metas y propósitos que puso en mi corazón. “Todo lo puedo en Cristo que me fortalece” Filipenses 4:13.

A todas las personas que participaron directa o indirectamente en la realización de esta tesis, por opinar y criticar constructivamente este trabajo, compartiendo sus buenos deseos y palabras de ánimo.

Agradezco con mucho cariño a mis padres, quienes me han respaldado moralmente en todo momento. Gracias Mamá y Papá, que han sido un ejemplo de lucha y constancia, gracias por creer en mí. A mis hermanos (Milo y Alex), por su apoyo y palabras de ánimo.

Agradezco a mi esposa Leo y a mi hijo Boris Leon, por ser un motivo importante para alcanzar los triunfos que Dios me ha mandado.

Y el más sincero agradecimiento a mi asesor de tesis Dr. Humberto Salinas Tapia, y mi co-asesor Dr. Daury García Pulido, quienes confiaron en mí. Gracias por compartir su conocimiento, por su paciencia y por la guía en mis estudios de maestría y dirección del presente trabajo.

Agradezco al Dr. Pedro Morales, Dr. Juan Antonio García Aragón y Dr. Carlos Díaz Delgado, miembros de mi sínodo, por su atenta lectura a este trabajo, por sus comentarios y correcciones que permitieron mejorarlo.

Agradezco al CONACYT, por el apoyo económico brindado mediante la beca de maestría, ya que sin dicho apoyo hubiese sido muy difícil la culminación de mis estudios de posgrado.

Agradezco al COMECYT, por el apoyo económico brindado mediante la beca de titulación, ya que con su apoyo facilitaron materializar mi trabajo de investigación.

A todos, ¡Muchas Gracias!

DEDICATORIAS

Dedico este trabajo con mucho cariño

A Dios, porque de su mano recibimos

la gracia, y a él debemos la gloria

A mis padres, por su amor y

apoyo incondicional

Tere

Miguel

A mis hermanos, por sus palabras de

ánimo y sustento moral

Milter

Alejandro

RESUMEN

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) tiene distintas aplicaciones en diversas áreas de la ingeniería, principalmente en la modelación de flujos, donde es utilizada para conocer las características de un flujo en movimiento y determinar las variables que intervienen en su comportamiento, de manera teórica pero económica y con resultados muy cercanos a la realidad. En acuicultura, la CFD es utilizada para visualizar y evaluar el comportamiento hidrodinámico de tanques de cultivo de peces, tomando en cuenta las condiciones de flujo para el sano desarrollo de los peces. Sin embargo, pocos trabajos analizan la eficiencia de remoción de sedimentos de forma natural, considerando el comportamiento del flujo dentro del tanque.

En el presente trabajo, se analiza la hidrodinámica de un tanque de recirculación de agua empleado en acuicultura, aplicando simulación por computadora a través de técnicas CFD, demostrando la importancia de realizar simulaciones aplicando métodos numéricos, para la obtención de parámetros hidrodinámicos, principalmente, los campos de velocidad y turbulencia ante diversos escenarios de operación de un sedimentador tipo hidrociclón.

Los resultados obtenidos demuestran que los principales factores que influyen en la hidrodinámica del tanque y del sedimentador son: la forma y distribución de rejillas del sedimentador, así como el diámetro del mismo. El efecto que producen dichas rejillas, son diversas variaciones en la distribución de velocidades del tanque y principalmente dentro del sedimentador, afectando las condiciones óptimas del flujo para la sedimentación de partículas y por ende la eficiencia en la remoción de sedimentos dentro del tanque.

Con los resultados obtenidos mediante la aplicación de CFD fue posible relacionar la hidrodinámica del sedimentador con su diámetro y estructura de rejillas, logrando tener un flujo idóneo en el tanque para el sano desarrollo de los peces y un flujo con velocidad total máxima de 2 cm/s dentro del sedimentador, suficiente para lograr la sedimentación de partículas, y con ello generar un sistema con características de auto-limpieza.

ABSTRACT

Computational Fluid Dynamics (CFD) has different applications in various fields of engineering, primarily in flow modeling, which is used to determine the characteristics of a moving stream and determine the variables that influence their behavior, theoretically but economic and very close to reality results. In aquaculture, CFD is used to display and evaluate the hydrodynamic behavior of fish farming tanks, taking into account the flow conditions for the healthy development of the fish. However, few studies analyze the efficiency of sediment removal naturally, considering the flow behavior inside the tank.

In this paper, the hydrodynamics of a recirculating aquaculture tank is analyzed using computer simulation with CFD techniques, demonstrating the importance of applying numerical simulation methods to obtain hydrodynamic parameters, mainly the velocity and turbulence fields at various stages of operation of a hydrocyclone settler type.

The results show that the major factors influencing the hydrodynamics and the sedimentation tank are: the shape and distribution grid of the settler, as well as the diameter thereof. The effect produced by grids are several variations in the velocity distribution inside the tank and the sedimentation mainly affecting optimal flow conditions for sedimentation of particles and therefore the efficiency of removal of sediments inside the tank.

With the results obtained by the application of CFD was possible to relate the settler with hydrodynamic diameter and structure grids, managing to have a suitable flow in the tank for the healthy development of the fish and maximum total flow rate of 2 cm / s within the settler, sufficient to achieve particle sedimentation, and thus generate a system with self-cleaning characteristics.

3.4.6	Post-procesamiento.....	39
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA		41
4.1	Cronograma de actividades	41
4.2	Validación del software ANSYS-FLUENT	42
4.2.1	Tanque de cultivo a escala (Flores y López, 2012)	44
4.2.1.1	Características físico-hidráulicas del tanque de cultivo a escala	44
4.2.1.2	Modelo conceptual del tanque	46
4.2.2	Modelación y simulación del tanque de cultivo a escala.....	47
4.2.2.1	Etapas de la modelación.....	47
4.2.2.2	Definición de geometría del tanque	47
4.2.2.3	Proceso de mallado	48
4.2.2.4	Establecimiento de parámetros del software ANSYS-FLUENT.....	50
4.2.2.5	Esquemas numéricos de solución	52
4.3	Tanque de cultivo caso de estudio “El Zarco”	53
4.3.1	Características físico-hidráulicas del tanque	54
4.3.2	Modelo geométrico del tanque de acuicultura caso de estudio “El Zarco”	54
4.3.3	Modelación y simulación del tanque de cultivo en condiciones actuales	56
4.3.3.1	Definición de geometría del tanque	56
4.3.3.2	Proceso de mallado	57
4.3.3.3	Establecimiento de ecuaciones y modelos	59
4.3.3.4	Esquemas numéricos de solución	59
4.3.3.5	Simulación del tanque “El Zarco” en condiciones actuales.....	60
4.4	Simulación de escenarios de operación del tanque	62
4.4.1	Planteamiento de escenarios de operación del tanque.....	63
4.4.1.1	Variación de rejilla del sedimentador	63
4.4.1.2	Variación de diámetro de sedimentador.....	66
4.4.2	Simulación de escenarios con ANSYS-FLUENT	67
CAPÍTULO 5. RESULTADOS.....		71
5.1	Resultados de la validación	71
5.1.1	Comparación con resultados descritos por Flores y López (2012).....	72
5.2	Resultados del comportamiento actual del tanque caso de estudio “El Zarco”	80

5.3 Resultados de los escenarios planteados.....	88
5.3.1 Escenarios con variación de rejilla del sedimentador	88
5.3.2 Escenarios con variación de diámetro del sedimentador	102
5.4 Análisis de los resultados.....	111
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	125
BIBLIOGRAFÍA	129

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 2.1.	Diagrama general de los componentes de un SRA (Modificado de MIT Sea Grant College Program, 2006)	10
Ilustración 2.2.	Variables que intervienen en el diseño de tanques de recirculación de agua (Modificado de Oca et al., 2007)	11
Ilustración 2.3.	Sistema de recirculación acuícola prototipo ubicado en el CIRA.....	15
Ilustración 2.4.	Esquema del SRA a escala, (Flores y López, 2012).	17
Ilustración 2.5.	Sistema de recirculación ubicado en El Zarco; a) estanque; b) depósito de recirculación y c) difusores de entrada de flujo.	17
Ilustración 3.1.	Etapas de la simulación con CFD-ANSYS-FLUENT	37
Ilustración 3.2.	Procedimiento para el monitoreo de la solución.	39
Ilustración 4.1.	Etapas a realizar en la investigación	42
Ilustración 4.2.	Cronograma de actividades y tareas de la investigación.....	43
Ilustración 4.3.	Sistema de recirculación de agua a escala (Flores y López, 2012). a) Diagrama del sistema de recirculación a escala; b) Tanque de cultivo a escala	45
Ilustración 4.4.	Esquema del tanque con salida tipo Hidrociclón (Flores y López, 2012)	46
Ilustración 4.5.	Modelo conceptual del tanque a escala	46
Ilustración 4.6.	Extracción del volumen de fluido a partir del sólido del tanque.....	48
Ilustración 4.7.	Detalle de la malla <i>CutCell</i> en la geometría del tanque.	49
Ilustración 4.8.	Gráfica de No. de elementos vs. Calidad Ortogonal.	50
Ilustración 4.9.	Croquis del Tanque de recirculación “El Zarco”; unidades en milímetros (mm).....	55
Ilustración 4.10.	Modelo 3D del Tanque de recirculación “El Zarco”	56
Ilustración 4.11.	Modelo 3D del Tanque y volumen de agua confinado.	57
Ilustración 4.12.	Gráfica de barras: Número de elementos vs. Calidad Ortogonal	57
Ilustración 4.13.	Detalle de malla del tanque “El Zarco”	58
Ilustración 4.14.	Cálculo de la carga de vertido sobre perímetro circular (Hydraulic Design Criteria)	61
Ilustración 4.15.	Vista en corte de salida del flujo a través de tubo interior de sedimentador	62
Ilustración 4.16.	Geometría general de las rejillas del sedimentador (Vista en Corte).....	64
Ilustración 4.17.	Variación de las rejillas del sedimentador para cada escenario	65
Ilustración 4.18.	Esquema del tanque. A) Con cono sedimentador; B) Sin cono sedimentador	69

Ilustración 5.1.	Área de visualización de campos y perfiles de velocidad (Flores y López, 2012)	72
Ilustración 5.2.	Gráfica de los residuales correspondientes a las soluciones de las ecuaciones	73
Ilustración 5.3.	Vectores de velocidad total del tanque a escala, obtenidos en la simulación.	75
Ilustración 5.4.	Contornos de velocidad total del tanque a escala, obtenidos mediante la simulación.	76
Ilustración 5.5.	Campos de velocidad total del tanque a escala, de Flores y López (2012).	77
Ilustración 5.6.	Perfiles de velocidad tangencial (u) del tanque a escala; comparativa con Flores y López (2012).	78
Ilustración 5.7.	Vectores de velocidad vertical (v) del tanque a escala.	79
Ilustración 5.8.	Gráfica de residuales de la simulación del tanque “El Zarco”	81
Ilustración 5.9.	Referencia de tirantes de agua para el tanque “El Zarco”	81
Ilustración 5.10.	Vectores y contornos de velocidad escenario E0, $h=0.085\text{m}$; a) vista en isométrico, b) vista en planta.	83
Ilustración 5.11.	Vectores y contornos de velocidad, $h=0.55\text{ m}$; vista en isométrico.....	84
Ilustración 5.12.	Vectores y contornos de velocidad, $h=1.05\text{ m}$; vista en isométrico.....	85
Ilustración 5.13.	Contornos de velocidad en planos transversales; vista en isométrico.....	85
Ilustración 5.14.	Contorno y vectores de velocidad en plano transversal A; vista en corte.....	86
Ilustración 5.15.	Contorno y vectores de velocidad en plano transversal B; vista en corte.....	87
Ilustración 5.16.	Ubicación de los planos horizontales de la velocidad dentro del tanque.....	89
Ilustración 5.17.	Contornos y vectores de velocidad, escenario E1.....	91
Ilustración 5.18.	Contornos y vectores de velocidad, escenario E2.....	92
Ilustración 5.19.	Contornos y vectores de velocidad, escenario E3.....	93
Ilustración 5.20.	Contornos y vectores de velocidad, escenario E4.....	95
Ilustración 5.21.	Contornos y vectores de velocidad, escenario E5.....	96
Ilustración 5.22.	Contornos y vectores de velocidad, escenario E6.....	97
Ilustración 5.23.	Contornos y vectores de velocidad, escenario E7.....	99
Ilustración 5.24.	Contornos y vectores de velocidad, escenario E8.....	100
Ilustración 5.25.	Contornos y vectores de velocidad, escenario E9.....	101
Ilustración 5.26.	Contornos y vectores de velocidad, escenario E1d1.....	103
Ilustración 5.27.	Contornos y vectores de velocidad, escenario E1d2.....	105
Ilustración 5.28.	Contornos y vectores de velocidad, escenario E2d1.....	106
Ilustración 5.29.	Contornos y vectores de velocidad, escenario E2d2.....	107

Ilustración 5.30. Contornos y vectores de velocidad, escenario E4d1.....	109
Ilustración 5.31. Contornos y vectores de velocidad, escenario E4d2.....	110
Ilustración 5.32. Comparativa del comportamiento del flujo en sedimentador para cada escenario, en la zona de rejillas.	112
Ilustración 5.33. Relación de velocidad del flujo en el tanque y sedimentador	114
Ilustración 5.34. Comportamiento de la velocidad del flujo en el sedimentador, en función del número de rejillas.....	115
Ilustración 5.35. Comportamiento de la velocidad del flujo en el tanque, en función del número de rejillas.	115
Ilustración 5.36. Comparativa del comportamiento del flujo en el tanque y sedimentador, escenarios E0 vs. E1; E1d1; E1d2.....	117
Ilustración 5.37. Comportamiento de la velocidad vertical $-v$ - en distintas alturas del sedimentador, escenario E1d1.....	118
Ilustración 5.38. Contorno de velocidad, plano vertical al interior de sedimentador, E1d1.	119
Ilustración 5.39. Contorno de velocidad, plano vertical en periferia externa de sedimentador, E1d1.....	119
Ilustración 5.40. Contorno de velocidad, plano vertical al interior de sedimentador, E1d1.	120
Ilustración 5.41. Contorno de velocidad, plano vertical al interior de sedimentador, E1d1	120
Ilustración 5.42. Perfiles de velocidad, planos vertical al interior del tanque y sedimentador, E1d1	121
Ilustración 5.43. Contornos de Energía Cinética de Turbulencia, planos horizontales al interior del sedimentador, E0 vs. E1d1.....	122
Ilustración 5.44. Contornos de Energía Cinética de Turbulencia, Cortes transversales del tanque y sedimentador, E0 vs. E1d1.....	123
Ilustración 5.45. Velocidad total, cortes transversales del tanque y sedimentador, E1d1 vs. E1d1a.....	124

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.	Constante de proporcionalidad α , para velocidades v_{rota} / v_{orif}	21
Tabla 4.1.	Configuración de entrada de flujo (Flores y López, 2012)	44
Tabla 4.2.	Parámetros físico-hidráulicos considerados en la validación.....	46
Tabla 4.3.	Características de la malla del tanque	49
Tabla 4.4.	Propiedades del agua utilizada en la modelación	51
Tabla 4.5.	Condiciones de frontera para tanque a escala de Flores y López (2012).	51
Tabla 4.6.	Métodos de interpolación utilizados para el análisis.....	53
Tabla 4.7.	Parámetros hidráulicos del tanque y del sedimentador “El Zarco” (Tenorio, 2014).....	54
Tabla 4.8.	Datos geométricos del tanque El Zarco.....	55
Tabla 4.9.	Parámetros de calidad de malla del tanque “El Zarco”	58
Tabla 4.10.	Establecimiento de ecuaciones y modelos para simulación del tanque “El Zarco”	59
Tabla 4.11.	Métodos de interpolación seleccionados para la simulación del tanque “El Zarco”	60
Tabla 4.12.	Condiciones de frontera para tanque caso de estudio “El Zarco”	62
Tabla 4.13.	Escenarios propuestos con variación del arreglo de rejillas del sedimentador	64
Tabla 4.14.	Relación de diámetros D/d de tanques con sedimentador tipo hidrociclón/alta tasa.....	66
Tabla 4.15.	Relación de diámetros D/d a modelar para escenarios seleccionados	67
Tabla 4.16.	Escenarios de operación propuestos para simulación de tanque “El Zarco”	68
Tabla 5.1.	Valores de los residuales para cada ecuación.....	72
Tabla 5.2.	Balance de flujo másico calculado en la simulación.....	74
Tabla 5.3.	Variación de velocidades calculadas vs. experimentales para el Caso 3	74
Tabla 5.4.	Comparación del caudal en el sistema, calculado vs. experimental.....	81
Tabla 5.5.	Variación de velocidades medias en el tanque y sedimentador, para cada escenario respecto al escenario original E0.	114

LISTA DE ACRÓNIMOS

SRA –	Sistemas de Recirculación Acuícola
RTD –	Residence Time Distribution [Distribución de tiempo de residencia]
CFD –	Computational Fluid Dynamics [Dinámica de fluidos computacional]
CIRA –	Centro Interamericano de Recursos del Agua
PIV –	Particle Image Velocimetry [Velocimetría por imágenes de partículas]
PTV –	Particle Tracking Velocimetry [Velocimetría por rastreo de partículas]
NASA –	National Aeronautic and Space Administration [Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio]
NPARC –	National Program for Applications-Oriented Research in CFD [Programa nacional para la aplicación orientada a la investigación en CFD.
RANS –	Reynolds-Averaged Navier Stokes
LES –	Large Eddy Simulation
CAD –	Computer-Aided Design [Diseño asistido por computadora]
SIMPLE –	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations [Método semi-implícito para las ecuaciones de presión vinculadas]
SIMPLEC –	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Coupled [Método semi-implícito para las ecuaciones de presión vinculadas acopladas]

LISTA DE SÍMBOLOS Y UNIDADES

Símbolo	Descripción	Unidades
V_{tanque}	Velocidad del flujo en el tanque	cm/s
V_{MD}	Velocidad máxima de diseño	cm/s
d	Diámetro del sedimentador	m
D	Diámetro del tanque	m
L	Longitud del cuerpo del pez	cm
F_i	Fuerza de impulso	N
ρ	Densidad del agua	kg/m ³
Q	Caudal	m ³ /s, lpm, lps, cfs
v_{orif}	Velocidad en el difusor	m/s, cm/s
v_{rota}	Velocidad de rotación en el tanque	m/s, cm/s
α	Constante de proporcionalidad	%
M_x	Momentum x	N-s
M_y	Momentum y	N-s
M_z	Momentum z	N-s
u	Velocidad en dirección x	m/s, cm/s
v	Velocidad en dirección y	m/s, cm/s
w	Velocidad en dirección z	m/s, cm/s
\bar{u}	Velocidad media en dirección x	m/s, cm/s
\bar{v}	Velocidad media en dirección y	m/s, cm/s
\bar{w}	Velocidad media en dirección z	m/s, cm/s
u'	Velocidad de fluctuación en dir. x	m/s, cm/s
v'	Velocidad de fluctuación en dir. y	m/s, cm/s
w'	Velocidad de fluctuación en dir. z	m/s, cm/s
t	Tiempo	segundo (s)
p	Presión	Pa, N/m ²
\bar{p}	Presión media	Pa, N/m ²
p'	Presión de fluctuación	Pa, N/m ²
ν	Viscosidad cinemática	N-s/m ²
μ	Viscosidad dinámica	Kg/m-s
T	Cantidad de Calor	j/kg-k
λ	Conductividad térmica	w/m-k
C_p	Calor específico	j/kg-k
V	Volumen	m ³ , cm ³
H_d	Carga hidráulica de diseño	m, cm, ft.
H	Carga hidráulica	m, cm
h_i	Carga hidráulica en difusor	m, cm
A	Área	m ² , cm ² , ft ²
μ_T	Viscosidad turbulenta	Kg/m-s
k	Energía cinética de turbulencia	J/kg
ε	Tasa de disipación de la energía cinética	-
ω	Relación de tasa de disipación y energía cinética	-
C_d	Coefficiente de descarga	-
\dot{m}	Flujo másico	kg/s

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El uso de tecnologías sustentables y amigables con el medio ambiente es una necesidad evidente en este siglo, donde se hace más notoria la problemática de la escasez del agua y su contaminación. La acuicultura siendo un sector que ha sido impactado de forma negativa debido al deficiente suministro del recurso hídrico, ha optado por el uso de Sistemas de Recirculación Acuícola (SRA) para llevar a cabo esta actividad (Salinas et al., 2012). Estos sistemas conformados por distintos componentes que reciclan y recirculan el agua, han tenido gran éxito en zonas productoras de diversas especies de peces dentro del Estado de México.

Gracias a diversos estudios de ingeniería, actualmente existen una gran variedad de sistemas cuya diferencia entre ellos radica principalmente en los componentes que conforman el tren de tratamiento, garantizando la calidad bioquímica del agua necesaria para su uso en el sistema. Los SRA cuentan con diversas geometrías del tanque de cultivo, en su mayoría rectangulares tipo *raceway* y circulares, que propician la oxigenación e intercambio del agua. Sin embargo, poco se ha analizado y estudiado sobre la remoción de sólidos suspendidos dentro del tanque de cultivo de manera no asistida. La remoción de sólidos de manera eficiente es esencial en un SRA y de ello depende gran parte de su éxito (Tenorio, 2014). Si bien, existen diferentes dispositivos y/o componentes que propician la sedimentación y remoción de sólidos dentro del tanque, no hay parámetros que garanticen un buen diseño del tanque de cultivo cuyo flujo beneficie a su auto - limpieza.

Entre los principales problemas detectados en el diseño de sistemas de recirculación, principalmente del tanque de cultivo, está la aplicación inadecuada de los modelos matemáticos en el estudio hidrodinámico de los tanques, ya que los parámetros de

alimentación en la mayoría son datos asumidos y en pocas ocasiones se utilizan datos experimentales. El factor principal, es la falta de aplicación de técnicas y/o modelos en la determinación del comportamiento hidráulico de los sistemas de forma experimental, principalmente en determinar de forma espacial la velocidad en las diferentes zonas de los tanques (Flores y López, 2012), situación que genera altos costos de diseño.

Si bien, existen diversas técnicas para el estudio de la hidrodinámica de los tanques, siendo las más comunes en el campo de la acuicultura: el análisis de distribución de tiempo de residencia (RTD) (Watten et al., 2000; Rasmussen et al., 2005; Lunger et al., 2006); pruebas con trazadores, en donde la concentración de los trazadores es medida en diferentes puntos del tanque (Tvinnereim y Skybakmoen, 1989) y métodos puntuales basados en la evolución temporal del fluido, entre otros. Con estos métodos se puede determinar la intensidad de mezclado y detectar las anomalías presentes dentro del flujo en tanques pequeños, pero poseen la desventaja de no proporcionar información útil para el diseño de los tanques a escala comercial, principalmente en el comportamiento hidráulico. Ya que sólo se determinan el tiempo de intercambio de agua y no se consideran los efectos de turbulencia producida por el movimiento del fluido relacionado con las distintas estructuras que conforman el tanque (Flores y López, 2012).

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) se ha utilizado en los últimos años, para describir los campos de flujo en tanques en dos o tres dimensiones, con la única desventaja de que los resultados deben verificarse con estudios de campo o laboratorio. Sin embargo, la CFD se ha utilizado principalmente en ingeniería de ríos (Nicholas and Smith, 1999) y en el estudio de patrones de flujo en canales abiertos (Wu et al., 2000), logrando demostrar que los resultados obtenidos numéricamente son confiables y presentan una idea muy cercana a la realidad que se está analizando. Así, el principal impacto que ha tenido la aplicación de CFD en el estudio del movimiento de los fluidos, es la factibilidad económica en el diseño hidráulico de componentes en diversas áreas de la ingeniería, tomando en cuenta la facilidad de manipulación de escenarios de operación e identificación de parámetros que influyen en el rendimiento y/o eficiencia de dichos componentes.

Es por eso, que para entender mejor el comportamiento del flujo y determinar los parámetros hidrodinámicos que sirvan de apoyo para el diseño de sistemas de recirculación de agua, especialmente los tanques de cultivo con características de auto limpieza, es importante realizar un estudio fiable y preferentemente de bajo costo.

La presente investigación, se enfoca en simular y analizar la hidrodinámica de un tanque de cultivo con recirculación de agua propuesto por Gallego (2010) y Tenorio (2014) para identificar los patrones de flujo generados por los componentes del tanque y proponer alternativas de mejora principalmente en la zona de sedimentación. Para ello se propone aplicar herramientas computacionales basadas en la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). La ventaja de utilizar CFD radica en llevar a cabo simulaciones de diversos escenarios de operación del tanque, teniendo la opción de modificar a conveniencia sus componentes, principalmente la forma y constitución del sedimentador (tipo hidrociclón). Así, de manera óptima y eficiente se podrán proponer las relaciones óptimas entre el diámetro del tanque y el anillo exterior del sedimentador (su forma y distribución de las rejillas) que garanticen el flujo idóneo dentro del tanque para el sano desarrollo de los peces y que a su vez promuevan la sedimentación y remoción de partículas dentro del sedimentador.

Se analizó el tanque de cultivo con recirculación de agua caso de estudio “El Zarco”, ubicado en la zona de La Marquesa, Estado de México. Este tanque fue previamente estudiado por Tenorio (2014), quien obtuvo una producción de biomasa óptima bajo un esquema de cultivo cuyo sedimentador diseñó a base de placas reductoras de velocidad (sedimentador de alta tasa). Sin embargo, el proceso constructivo y de implementación de dicho sistema es complicado. Por ello, con base en lo que reportan Flores y López (2012) y Summerfelt (2004), la presente investigación consistió en proponer únicamente la modificación de las rejillas y diámetro del sedimentador, como una propuesta sustituta al prototipo estudiado por Tenorio (2014). Con estas modificaciones se logró obtener un cambio notorio en el comportamiento del flujo tanto en el tanque como dentro del sedimentador, promoviendo así la remoción y sedimentación de sólidos de manera no asistida y eficiente.

Para comprender el alcance de la presente investigación, el trabajo está estructurado de la siguiente manera: en el capítulo 2 se describe el concepto y antecedentes de los sistemas de recirculación acuícola, principalmente del tanque de cultivo y sistemas de remoción de sólidos de manera no asistida (sedimentador). Así mismo, se mencionan algunos parámetros que relacionan el cultivo de peces con las características generales del flujo en el tanque.

En el capítulo 3 se describen las técnicas de modelación y simulación con CFD, específicamente las relacionadas al movimiento de los fluidos. Se describen los principales modelos y ecuaciones que gobiernan el movimiento de los fluidos y la turbulencia, así como el procedimiento y etapas generales para llevar a cabo simulaciones por medio de CFD.

En el capítulo 4 se describe la metodología llevada a cabo para el desarrollo del presente trabajo, que incluye la descripción de los equipos utilizados así como los métodos y técnicas empleadas en el desarrollo de la presente investigación. Se explica el desarrollo y obtención de los resultados.

En el capítulo 5 se muestran los resultados, principalmente los contornos y vectores de velocidad presentes en diversas zonas dentro del tanque en estudio, cuya hidrodinámica se modifica bajo las diferentes condiciones de operación propuestas. Así mismo, se presentan de forma gráfica los resultados del comportamiento hidráulico del sedimentador y del tanque, comparando el esquema actual de operación y el obtenido en la simulación por computadora.

Finalmente se presentan las conclusiones del presente trabajo, así como las recomendaciones para futuras investigaciones.

1.1 Problemática

Los Sistemas de Recirculación de Agua (SRA) utilizados en la acuicultura son una herramienta que garantiza la producción acuícola con el uso eficiente de agua. Uno de los componentes más importantes de los SRA es el tanque de cultivo (Flores y López, 2012). La problemática principal de los tanques de acuicultura es su deficiente diseño desde el punto de vista hidráulico y la optimización de los procesos de eliminación de sólidos de forma natural (sedimentación). Debido a ello, no existen tanques con características de auto-limpieza, cuyo objetivo principal sea el de contar con un flujo idóneo para el desarrollo de los peces y que a su vez promueva la remoción y sedimentación de sólidos dentro del tanque de cultivo.

Desde el punto de vista analítico, la problemática que limita el estudio y diseño hidráulico de los tanques de cultivo son los altos costos. Esto debido a que para llevar a cabo el análisis del flujo en tanques se debe contar con un modelo a escala o prototipo, para poder realizar estudios experimentales o de campo. Aunado a esto, se requieren equipos especiales para la medición de flujos, en su mayoría ópticos o acústicos, los cuales en la mayoría de los casos pueden ser adquiridos únicamente por instituciones educativas o gubernamentales. Por otro lado, el análisis numérico y/o modelación, al no ser debidamente implementados, no ayudan significativamente al análisis del flujo por tratarse de técnicas en su mayoría en 2D.

Sin embargo, con la tecnología actual se han desarrollado modelos y esquemas de solución con base en la simulación numérica por computadora en 3D. Actualmente existen pocos pero muy poderosos softwares de simulación que permiten analizar y visualizar el comportamiento de un flujo en 3D. Además, dichos softwares consideran modelos y factores como rugosidad, turbulencia, fenómenos relacionados a la capa límite, etc., garantizando que el modelo para simular sea lo más representativo posible del fenómeno físico en estudio. Su única desventaja es que son costosos en una primera instancia, pero factibles al poseer la capacidad de simular diversos escenarios de operación de cualquier fenómeno, evitando la construcción y/o modificación de modelos o prototipos, invirtiendo un menor tiempo de análisis en el diseño.

1.2 Justificación

Como se ha mencionado, el éxito de un SRA se debe a que es una solución sustentable, funcional y económica. Sin embargo, su implementación y correcto funcionamiento depende de estudios previos de su hidrodinámica y de un buen diseño. El elemento principal de un SRA es el tanque de cultivo, cuyo objetivo principal es estar conformado por ciertos componentes y estructuras que propicien un flujo homogéneo y estable, idóneo para el desarrollo de los peces y que a su vez favorezca la remoción de sedimentos de forma natural (no asistida). Una de las limitaciones que se presenta en los SRA es la poca información para el diseño hidráulico del tanque de cultivo. El estudio de los tanques utilizados en acuicultura generalmente se realiza a través de diversas técnicas (analíticas, numéricas, ópticas, experimentales, etc.) en modelos a escala de laboratorio o prototipos, lo que en ocasiones resulta muy costoso y poco práctico.

En el presente trabajo se aplican técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics [CFD]) para llevar a cabo simulaciones del comportamiento del flujo en 3D, en un tanque a escala real utilizado en la acuicultura. Con ello, identificar y obtener el comportamiento óptimo del flujo ante diferentes relaciones de diámetro del tanque vs. diámetro del anillo exterior del hidrociclón, considerando la configuración de salida del flujo, forma del fondo del tanque y tipo de entrada. Con la finalidad de garantizar un flujo homogéneo y estable, el tanque de cultivo de peces debe cumplir con las necesidades hidráulicas para el sano desarrollo de los peces y que a su vez promueva una alta tasa de remoción de sedimentos dentro del tanque de manera no asistida. Así, con el uso de CFD-ANSYS-FLUENT en el análisis del flujo en tanques de cultivo de peces se podrá generar información que sirva como guía para la correcta y eficiente implementación y/o rediseño de un tanque de acuicultura dentro de un SRA. Con esto, se beneficiará a aquellos que practican o desean practicar la acuicultura desde un enfoque sustentable. Además, con el presente trabajo se pretende demostrar la factibilidad de la aplicación de CFD-ANSYS-FLUENT como una alternativa para el estudio y evaluación de tanques de cultivo de peces con características de auto limpieza.

1.3 Hipótesis

La hidrodinámica del tanque de recirculación y del sedimentador (hidrociclón) es afectada por la relación entre el diámetro del tanque, el anillo exterior del hidrociclón (su forma y distribución de las rejillas) y forma del fondo, influyendo en la eficiencia de sedimentación y remoción de partículas dentro del tanque, caso de estudio “El Zarco”.

1.4 Objetivo general

Aplicar la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en la evaluación hidrodinámica de un tanque circular con recirculación de agua, considerando la relación entre diámetro del tanque, diámetro del hidrociclón, formas del fondo, tipo y distribución de rejillas del hidrociclón, para identificar el arreglo óptimo que garantice el flujo idóneo para el desarrollo de los peces y la alta remoción de sedimentos dentro del tanque; “Caso de estudio sistema de recirculación prototipo de El Zarco”.

1.5 Objetivos específicos

- 1.- Realizar visita de campo a la granja de cultivo de “El Zarco”, para obtener datos y características del Sistema de Recirculación de Agua prototipo.
- 2.- Desarrollar un modelo conceptual del tanque a escala real (caso de estudio “El Zarco”), identificando los componentes del tanque que representan las condiciones de entrada, salida y frontera del tanque, para ser simulado en ANSYS-FLUENT.
- 3.- Simular y analizar mediante ANSYS-FLUENT el modelo a escala del tanque ubicado en el CIRA, y comparar los resultados obtenidos con los descritos en Flores y López (2012), a fin de validar el software.
- 4.- Realizar la simulación del tanque prototipo “El Zarco” en las condiciones en las que opera, a fin de identificar la problemática existente de su funcionamiento actual.

- 5.- Desarrollar un árbol de experimentos, planteando los escenarios de operación del tanque para ser simulados en ANSYS-FLUENT, considerando principalmente la modificación del sedimentador (diámetro y rejillas) y el fondo del tanque.

- 6.- Simular con ANSYS-FLUENT distintos escenarios de operación del tanque a escala real (caso de estudio “El Zarco”), para identificar y visualizar los patrones de flujo en zonas inestables o de turbulencia, generados por los diferentes componentes del tanque.

- 7.- Realizar un análisis paramétrico para identificar la relación entre los elementos del tanque y el comportamiento del flujo dentro del tanque, y sirvan para el diseño de tanques eficientes.

Para el cumplimiento de los objetivos fue necesario conocer todas las variables que intervienen en el proceso. Por ello fue necesario conocer las bases y antecedentes de los sistemas de recirculación de agua y de las técnicas modelación de flujos mediante CFD. De esta forma se describe el contenido de cada capítulo del presente trabajo que permitió alcanzar los objetivos planteados.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN ACUÍCOLA (SRA)

2.1. Antecedentes

Un sistema de recirculación es aquel que permite la producción y cultivo de peces a gran escala en un esquema cerrado, filtrando y recirculando el agua en proporciones moderadas y liberando poco o ningún contaminante (Flores y López, 2012). Estos sistemas están compuestos por una serie de módulos que tratan el agua, manteniendo su calidad en los niveles necesarios para reutilizarla y lograr la supervivencia de los peces (Wheaton, 1977).

En este tipo de sistemas, aproximadamente un 99% del agua utilizada es tratada y recirculada con calidad adecuada para la supervivencia de peces. El porcentaje restante corresponde al agua que se cambia o suple por evaporación, lavado o purgado de lodos y/o desechos sólidos. Gracias a esto y por ser amigable con el medio ambiente, el uso de los SRA se ha convertido en una alternativa factible en comparación con los métodos tradicionales de estanques de producción intensiva, ya que no hay descarga de agua desde el sistema en cualquier forma regular. Estos sistemas están diseñados para ser altamente sustentables con un impacto mínimo para el medio ambiente (Flores y López, 2012).

La Ilustración 2.1 muestra el diagrama general de un SRA, con los principales componentes que lo conforman. Algunos sistemas son más sofisticados que otros, principalmente en los módulos del tren de tratamiento. Sin embargo, todos cuentan con los elementos básicos que son el tanque de cultivo, estructuras de entrada y salida de flujo, un módulo de

biofiltración/oxigenación y un módulo para la remoción de sólidos suspendidos. Este último puede ser integrado dentro del tanque de cultivo, por medio de un sedimentador. Cada uno de estos elementos, entre otros, es implementado según las necesidades del pez que se desee cultivar.

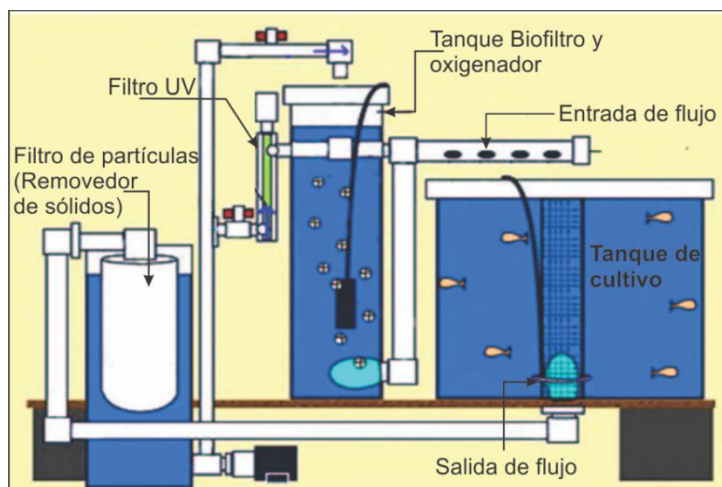


Ilustración 2.1. Diagrama general de los componentes de un SRA (Modificado de MIT Sea Grant College Program, 2006)

Dentro del área de la acuicultura se ha implementado como alternativa los Sistemas de Recirculación Acuícola (SRA) para llevar a cabo la producción de peces de manera sustentable y ecológica. El componente principal dentro de los SRA es el tanque de cultivo, ya que en éste se lleva a cabo la producción de peces y cuyas características influyen en todo el sistema.

Los SRA son utilizados en todo el mundo, principalmente en laboratorios de investigación, en la producción y mantenimiento de peces ornamentales y en acuarios públicos y privados. Otra aplicación de los SRA es en el cultivo de peces para consumo humano (trucha, tilapia, etc.). En la década de los 90's, los pioneros de los SRA pusieron gran interés en la cría y engorda de la tilapia (Kubitza, 2006).

Hoy en día, con los avances tecnológicos en la ingeniería y numerosos estudios realizados, los SRA son diseñados para la acuicultura y la necesidad única de contar con un sistema biológico/acuático (Timmons y Losordo, 1994). Existen numerosas fuentes comerciales que

distribuyen el equipo y complementos necesarios para los SRA. Desde hace dos décadas, con el auge de los SRA, existe información y literatura para el diseño y operación desde el punto de vista biológico/químico, haciéndolos cada vez más confiables para su uso en las granjas acuícolas.

Aunado a las características de los SRA, la Ilustración 2.2, muestra las diferentes variables que intervienen en el diseño de un tanque de recirculación y su relación con la hidrodinámica. El diseño de los tanques de recirculación de agua, depende tanto de variables físicas como biológicas, donde la actividad de los peces y la dinámica de los sedimentos están relacionadas con la hidrodinámica. En la ausencia de peces la hidrodinámica es determinada por la geometría del tanque y por el efecto de entrada y salida del flujo. Así, es importante conocer las características que se presentan en el tanque dependiendo de la geometría y componentes del mismo (Flores y López, 2012).

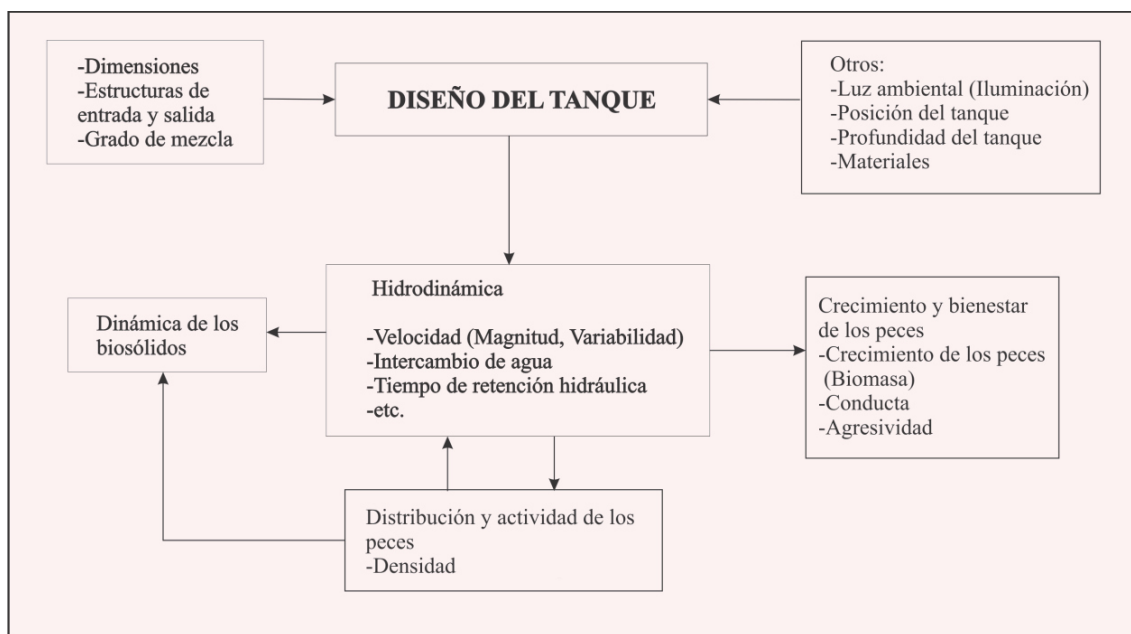


Ilustración 2.2 Variables que intervienen en el diseño de tanques de recirculación de agua (Modificado de Oca et al., 2007).

Los sistemas más comunes son aquellos en los que se emplean tanques circulares y rectangulares tipo *raceways*, construidos a la intemperie pero con sistemas de recirculación intensiva. Para ello, deben ubicarse en zonas con temperaturas correspondientes a la especie

en cuestión o, de lo contrario, emplear invernaderos. Los casos como la granja acuícola ubicada en El Zarco y La Ciénega, dentro del Estado de México, utilizan sistemas a base de tanques circulares de concreto conectados entre sí. Sin embargo, estas granjas no cuentan con un sistema de recirculación intensiva a base de algún tren de tratamiento.

Los tanques construidos con concreto tienen su fondo con una cierta pendiente hacia la parte central del tanque, donde se ubica la salida del agua. Algunos utilizan un tubo vertical para la remoción de los sólidos, y recirculan el agua para su oxigenación y tratamiento. Otros, utilizan un drenaje doble y procesos de tratamiento separados. También se han desarrollado diseños innovadores que incluyen una zona de mayor profundidad alrededor del drenaje central para que los sólidos sean rápidamente retirados. Algunos de los cultivos han colocado también techos plásticos o invernaderos a fin de controlar las condiciones ambientales, y también para disminuir la depredación por las aves.

2.1.1 Remoción de sólidos y sedimentación

Diversos trabajos se han desarrollado para implementar dispositivos integrados al tanque de cultivo para propiciar la remoción de sólidos de manera asistida y no asistida. Recientemente se ha optado por el diseño de un tanque cuya geometría ayude a remover de manera natural (sedimentación) los sólidos suspendidos dentro del tanque. Existe la propuesta hecha por Hazen (1904) y Camp (1936) donde plantean las bases para el diseño de tanques con sedimentación natural, estableciendo que para lograr un buen diseño hidráulico se debe entender el proceso de sedimentación dentro del tanque (referenciado en Yoon y Lee, 2000).

Una deficiente remoción de sólidos dentro del tanque provoca el mal funcionamiento de los demás componentes del SRA. Los sedimentos constituidos por restos de alimento, heces fecales de los peces, etc., son una fuente de demanda de oxígeno y generan nutrientes dentro del agua que afectan directamente la salud de los peces (Chen et al., 1993). Además, si el agua contiene mayor cantidad de nutrientes y sólidos disueltos, el proceso de tratamiento se vuelve más costoso y complicado de llevar a cabo.

En los años recientes, se han realizado estudios para el diseño de tanques con sistemas de auto-limpieza (Timmons et al., 1998). Para que un tanque tenga características de auto-limpieza, es necesario que cuente con una geometría y aditamentos internos que eviten la presencia de zonas de nula velocidad (zonas muertas) dentro del tanque donde pueda provocarse la acumulación de sólidos. Así mismo, debe contar con componentes para la remoción y/o extracción de sólidos sedimentables.

Timmons et al. (1998), han estudiado extensivamente el sistema de extracción de sedimentos de doble dren para tanques circulares con flujo rotatorio. Éste consiste en un pequeño dren central en el fondo del tanque que remueve un 5-10 % del agua con sedimento y un segundo dren por donde sale el resto del agua. Losordo et al. (1994), establecen un sistema de estanques de sedimentación que consiste en tanques con flujo estable sin turbulencia. Su característica principal radica en el fondo del tanque, con cierta inclinación para canalizar los sedimentos hacia el centro del tanque.

Losordo et al. (2000) y Summerfelt et al. (2004), utilizaron pequeños separadores en forma de remolino para capturar sólidos sedimentables concentrados dentro de un dren colocado en el centro al fondo del tanque. Los separadores remolino, también conocidos como sedimentadores Tasa de Té o Hidrociclones, operan inyectando el agua de manera tangencial en el radio exterior de un tanque cónico. Esto provoca que el agua gire alrededor del eje del tanque. La rotación primaria dentro del tanque crea un flujo radial secundario hacia el centro del tanque cónico y las fuerzas inerciales creadas ayudan a la captura de los sólidos (Davidson y Summerfelt, 2004).

Diversos trabajos e investigaciones estudian el comportamiento de los dispositivos antes mencionados. Sin embargo, la mayoría de los estudios se basan en modelos a escala o en sistemas comerciales a base de pruebas controladas en laboratorio. Si bien, se ha logrado entender mejor el proceso de sedimentación de partículas dentro de los tanques con características de auto-limpieza, los estudios siguen limitados a llevarse a cabo en modelos de laboratorio o prototipos físicos.

Otra manera de remover los sólidos dentro de un tanque de cultivo es mediante la sedimentación. La sedimentación es el proceso donde los sólidos suspendidos sedimentables que tienen una densidad o gravedad específica mayor que el agua, pueden dejar de estar suspendidos y sedimentar, separándose del flujo principal (Cripps y Bergheim, 2000). La sedimentación es un proceso que se relaciona directamente con el flujo y su interacción con las características de los sólidos.

Según Cripps y Bergheim (2000) hay cuatro tipos de sedimentación: discreta, floculante, obstaculizada (por zona) y por compresión. Las bajas concentraciones de desechos en la acuicultura usualmente sedimentan de manera discreta sin interacción entre una partícula y otra. En algunos casos se puede presentar la floculación por colisión natural de las partículas o por atracción, incrementando el tamaño de las partículas y la velocidad de sedimentación. En el diseño de los tanques de acuicultura con sedimentación natural se toma en cuenta que dentro del flujo no existan zonas de turbulencia y/o re-suspensión. Al existir sitios con flujo turbulento dentro del tanque se provoca una constante recirculación de partículas evitando que éstas sedimenten (Wheaton, 1977).

2.2. Investigaciones recientes de los SRA

En los últimos años, en el Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA) de la Universidad Autónoma del Estado de México, se ha desarrollado investigación en torno a la remoción de sólidos en dichos sistemas de recirculación para cultivo de peces. En primera instancia, Gallego et al., (2004); Gallego (2004); García (2008) y Gallego (2010) analizaron un prototipo de un tanque construido de mampostería con recirculación de agua ubicado en el CIRA (Ilustración 2.3). El sistema se alimenta por medio de gravedad, manteniendo un suministro de agua constante al sistema (Gallego, 2010).

Este sistema presentó deficiencia en los procesos de sedimentación de partículas cohesivas de forma natural (Gallego, 2010), atribuido a los dispositivos de entrada y salida del flujo, los cuales tienen influencia directa en el comportamiento hidrodinámico del tanque. Gallego (2010), le adjudica la baja eficiencia alcanzada por el sedimentador a dos problemas

principales: 1) a que no se incorporó el cono concentrador de los lodos en el momento de la construcción del tanque; 2) un diseño inadecuado de la purga de lodos, lo que ocasionó que el movimiento del agua fraccionaba los sólidos y eran arrastrados a las siguientes unidades del tren de tratamiento y en algunos casos estos se re-suspendían en el sistema ocasionando problemas de sanidad para los peces (Flores y López, 2012).

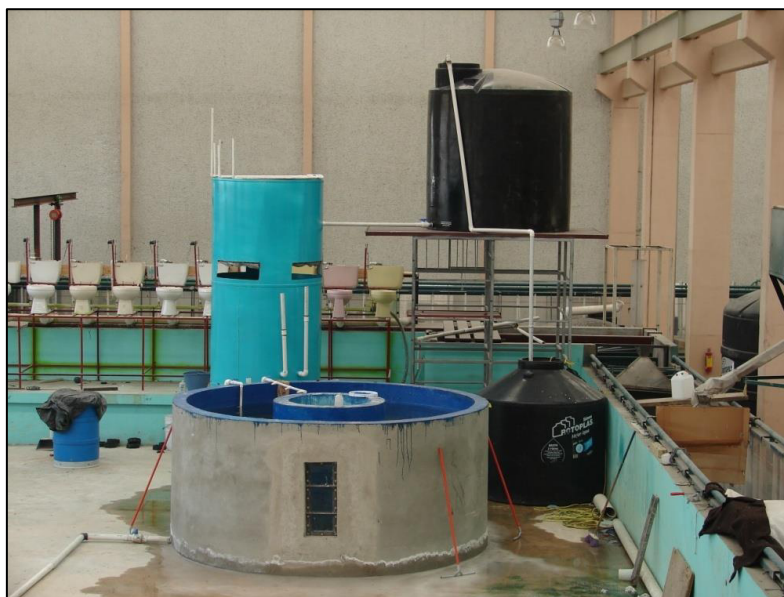


Ilustración 2.3 Sistema de recirculación acuícola prototipo ubicado en el CIRA.

En sus recomendaciones, Gallego (2010) pide realizar estudios de sedimentabilidad en columnas de sedimentación de los sólidos generados en el estanque. Esto para determinar la eficiencia del sedimentador con base en su carga específica, situación que motivó las consecuentes investigaciones. Así mismo, comenta que uno de los principales factores a tomar en cuenta en el diseño de los SRA es el comportamiento hidrodinámico del flujo y la configuración adecuada de los sistemas de entrada y salida del flujo, así como del sedimentador.

Flores y López en el año 2012 analizaron un SRA a escala con similitud geométrica al tanque de Gallego (2010) (Ilustración 2.4). Dichos autores realizaron un análisis hidrodinámico del tanque a escala, enfocándose en el comportamiento del flujo generado por diversas configuraciones de entrada y salida del flujo. En su trabajo aplicaron técnicas de velocimetría

óptica en 2D para medir los campos y perfiles de velocidad del flujo dentro del tanque. Concluyeron que los principales factores que influyen en la remoción y sedimentación de partículas son la forma del sedimentador (diámetro y rejillas) así como la inclinación del fondo del tanque. Ya que dichos parámetros afectan considerablemente el comportamiento del flujo dentro del tanque y en la zona cercana a las rejillas del sedimentador.

Con base en los trabajos anteriores, Tenorio (2014) realizó un estudio de un sistema de recirculación acuícola prototipo construido en la granja acuícola ubicada en El Zarco. Dicho sistema se muestra en la Ilustración 2.5, el cual consta de un tanque de cultivo de sección circular con un sedimentador en la parte central del estanque. La entrada de agua es por medio de difusores verticales y horizontales sumergidos en el tanque. El agua es suministrada con una bomba ubicada en un depósito de recirculación, donde se lleva a cabo los procesos básicos de limpieza del agua, como filtración y sedimentación.

El tanque de cultivo “El Zarco” es un sistema similar al del modelo de Gallego (2010) y de Flores y López (2012). Sin embargo, cuenta con mejoras significativas como la inclinación de la plantilla del tanque y un cono de sedimentación que sobresale de la parte central del sedimentador, que sirve para captar y mantener los sólidos sedimentables. Este cono se adaptó con la finalidad de tener mayor carga hidráulica y evitar la re-suspensión y arrastre de las partículas dentro del sedimentador. Además, el sedimentador consta de placas verticales paralelas con cierta inclinación para reducir la velocidad del flujo dentro del sedimentador y fomentar la captación de partículas hacia el cono sedimentador. Esta configuración del sedimentador se le llama sedimentador de alta tasa (Tenorio, 2014).

Si bien, con el diseño del sedimentador propuesto por Tenorio (2014) se obtuvieron resultados satisfactorios tanto en la producción de peces como en la remoción de partículas, su desventaja radica en el proceso constructivo e implementación de dicho sistema. Por ello, el presente trabajo se enfocó en proponer un rediseño al sedimentador de dicho tanque, omitiendo las placas inclinadas y sustituyéndolas por un mejor diseño en las rejillas del sedimentador.

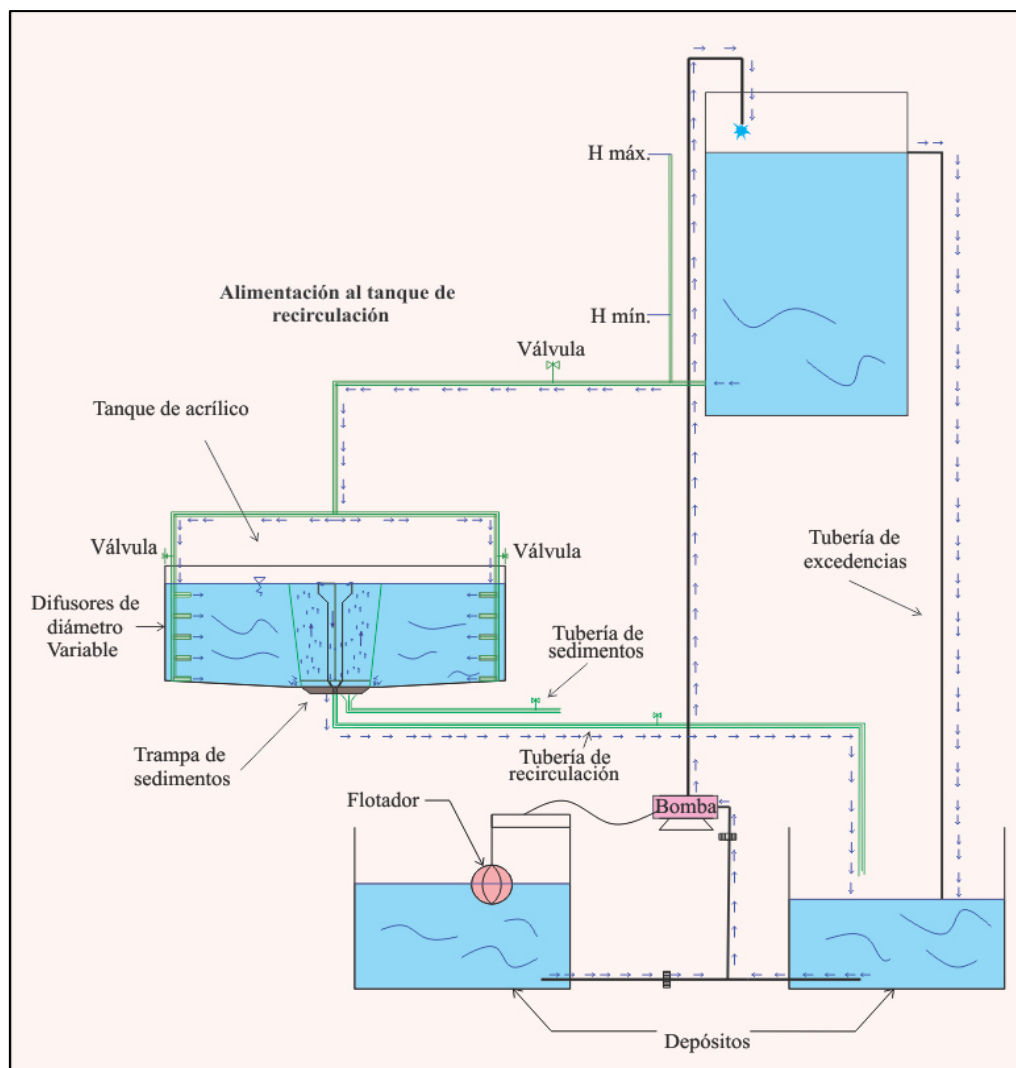


Ilustración 2.4 Esquema del SRA a escala, (Flores y López, 2012).

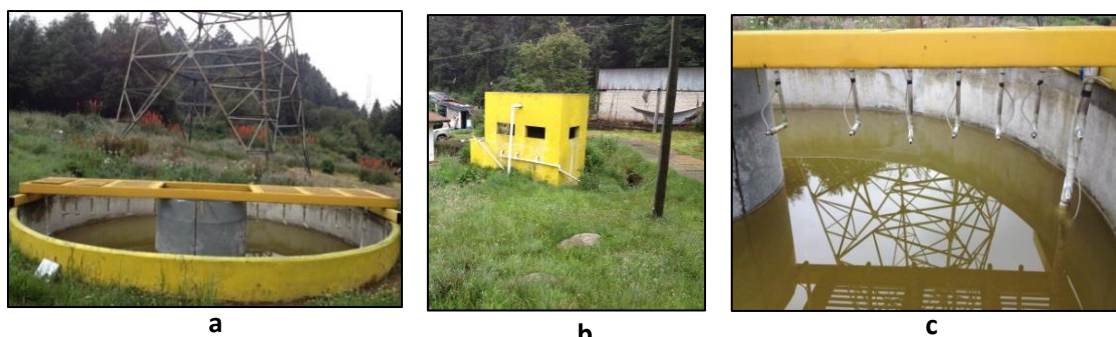


Ilustración 2.5. Sistema de recirculación ubicado en El Zarco; a) tanque; b) depósito de recirculación y c) difusores de entrada de flujo.

De lo anterior surge la necesidad de implementar herramientas e instrumentos que ayuden a mejorar el diseño de tanques con recirculación de agua, especialmente aquellos cuyos antecedentes ya mencionados han otorgado suficiente información para atacar el lado débil que presentan dichos sistemas, en especial los tanques de cultivo y sus procesos de limpieza y remoción de sedimentos. Así, con los estudios recientes se demuestra que la velocidad del flujo dentro de un tanque de cultivo de un SRA es afectado por su geometría y sus dispositivos de entrada y salida del flujo (Flores y López, 2012) y estos a su vez influyen en la sedimentación de partículas dentro del tanque.

Respecto al estudio de la sedimentación de partículas en los tanques de recirculación para el cultivo de peces, en el CIRA se realizan diversos estudios que permiten determinar el comportamiento de los sedimentos y la velocidad de sedimentación. García-Aragón et al. (2014) analizaron sedimentos provenientes de alimento para peces, con diámetros primarios medios entre de 20 y 75 micrones, en el estudio se analizó la formación de flóculos y se determinó la velocidad de caída de partículas. Debido a que experimentalmente es muy complejo obtener la caracterización de partículas y por ende la velocidad de las mismas sin la ruptura de los flóculos, en este trabajo se aplicaron las técnicas ópticas PIV y PTV para obtener los campos de velocidad de las partículas. Además, lograron caracterizar diversos tamaños de partículas que floccularon, formando partículas con un diámetro de hasta 450 micrones. Entre las principales conclusiones que describen, destaca la velocidad de caída de sedimentos para diversos diámetros de partículas, la cual está en un rango de 0.005 - 0.015 m/s, para un diámetro medio de partículas de 75 – 300 micrones, respectivamente. Este rango de velocidades se tomó como base en el presente trabajo para proponer la estructura óptima del sedimentador del tanque de “El Zarco”.

2.3. Parámetros hidrodinámicos para el cultivo de peces

La hidrodinámica de un tanque de cultivo se encuentra directamente afectada por su geometría y principalmente por los componentes que lo integran, así como las estructuras para la remoción de sólidos (sedimentadores internos). Es por ello, que para garantizar un flujo apto para el desarrollo acuícola dentro del tanque, se deben tomar en cuenta ciertos parámetros

relacionados con dichos componentes. Los principales parámetros a considerar son la velocidad de entrada del flujo y su efecto en el flujo del tanque de cultivo. Además de contar con velocidades cómodas para el nado de los peces dentro del tanque, el flujo deberá ser óptimo para promover la sedimentación de sólidos, canalizándolos al sedimentador sin generar el arrastre y/o re-suspensión de partículas.

Generalmente los tanques ofrecen una mezcla homogénea del agua, sin embargo, la concentración de los sólidos disueltos cambia de un punto a otro dentro del tanque, pese a este hecho una mezcla adecuada puede proveer la misma calidad de agua a todos los peces, optimizando el diseño de las estructuras de entrada y salida del flujo en el tanque.

La influencia que tiene la estructura de entrada, es decir, la forma de inyección del flujo en el tanque es (Skybakmoen, 1989; Tvinnereim y Skybakmoen, 1989; Davidson y Summerfelt, 2004):

- Mayor uniformidad del perfil de velocidades a través del tanque
- Aumentar la capacidad del tanque para mover los sólidos sedimentables al centro
- Mayor uniformidad en el mezclado del agua

Con las estructuras de entrada (orificios: tamaño, número y posiciones), se puede controlar dentro del tanque: la velocidad de entrada, la tasa de entrada, la velocidad de rotación en el tanque y el caudal en el sistema (Flores y López, 2012). Según diversos estudios, se ha establecido que la velocidad del agua en el tanque, debe ser de 0.5 veces la longitud del pez/segundo (Ecuación 2.1), y con ello optimizar la salud, el tejido muscular y respiración adecuada del pez (Losordo and Westers, 1994).

$$V_{tanque} = 0.5 * Long. Pez/s \quad 2.1$$

Para tilapia, Losordo and Westers (1994) recomiendan una velocidad del flujo en el tanque de 15-30 cm/s. Summerfelt et al. (2004), recomiendan mantener una velocidad de 15-20 cm/s dentro del tanque, para peces con longitud de 12-24 cm. Esto sin exceder la velocidad máxima

de diseño propuesta por Timmons y Youngs (1991), quienes dedujeron que la velocidad del flujo en el tanque (velocidad de rotación en tanques circulares) que requieren los peces para evitar la fatiga es:

$$V_{MD} \leq \frac{5.25}{L^{0.37}} \quad 2.2$$

Donde:

V_{MD} = Velocidad máxima de diseño en [Longitud del pez/s] L/s

L = Longitud del cuerpo del pez en *cm*

Estas velocidades no siempre son las adecuadas para promover la remoción de sedimentos, ya que para conducir los sólidos hacia el sedimentador se requieren velocidades mayores a 15 - 30 cm/s (Burrows y Chenoweth, 1970 y Mäkinen et al., 1988). Por lo cual, es importante encontrar las condiciones hidrodinámicas que permitan una buena supervivencia de los peces y una buena eliminación de residuos sólidos.

Tvinnereim y Skybakmoen (1989) determinaron que la velocidad de la corriente en un tanque circular puede ser controlada en gran parte por la variación de la fuerza de impulso del flujo de entrada (F_i), la cual es definida como:

$$F_i = \rho * Q * (v_{orif} - v_{rota}) \quad 2.3$$

Donde:

ρ = Densidad del agua en Kg/m^3

Q = Caudal de entrada en m^3/s

v_{orif} = Velocidad de entrada a través de los orificios en m/s

v_{rota} = Velocidad de rotación en el tanque en m/s

La energía de impulso de entrada se disipa a medida que crece la turbulencia en la zona de rotación del tanque. Entonces, la fuerza de impulso, y por tanto la velocidad de rotación en el tanque, puede ser regulada ajustando la velocidad de flujo de entrada.

Paul et al. (1991) reportaron que la velocidad de rotación del tanque es directamente proporcional a la velocidad del flujo de entrada en los difusores, especialmente cerca de la pared del tanque. Lo cual se expresa en la siguiente ecuación:

$$v_{rota} \approx \alpha * v_{orif} \quad 2.4$$

Donde:

α = constante de proporcionalidad, que varía dependiendo del diseño de la estructura de entrada, y diversos autores reportan valores entre 0.01 y 0.20, según estudios experimentales.

Existen diversas relaciones de velocidad de nado del pez y del flujo dentro del tanque, en función de la entrada del flujo (coeficiente α). Para entradas de flujo mediante difusores (*jets*) se muestran en la Tabla 2.1 algunos valores de α que relacionan la velocidad de entrada del flujo en el difusor y su efecto en la velocidad del flujo en el taque.

Tabla 2.1. Constante de proporcionalidad α , para velocidades v_{rota} / v_{orif}

Valores de α	Autor	Observaciones
15-20%	Timmons et al., 1998	Altas velocidades, tanques circulares
3.7%	Watten et al., 2000	MCR, velocidades medias.
8%	Ebeling et al., 2005	-
3.9%	Labatut et al., 2006	Diámetro de difusor de 15mm
1.05-1.08%	Flores y López, 2012	Diámetro de difusor de 5mm

CAPÍTULO 3

DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

En este apartado se presentan las bases de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), sobre las cuales está sustentada la presente investigación. Se describe un marco teórico de las principales aplicaciones de CFD en la modelación y simulación de flujos. Así mismo, se describen las etapas y procedimientos generales para llevar a cabo un análisis mediante CFD. Además, se muestran los modelos y ecuaciones matemáticas en las que se basa la CFD, para la simulación de flujos. Aunado a esto, se describen los modelos de turbulencia y esquemas numéricos de solución más comunes que complementan el análisis con CFD.

3.1. Antecedentes

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), es un término genérico para esquemas numéricos que representan el flujo de masa y momentum a través de un fluido continuo (Peterson, 1999). La CFD posee la ventaja de no requerir una etapa de calibración, ya que se deriva de las ecuaciones universales que gobiernan el flujo de fluidos. El comportamiento de un flujo dentro de un medio se puede predecir mediante la solución de las ecuaciones diferenciales que describen la conservación de masa y momentum. La interacción de las partículas y su geometría hacen que dichas ecuaciones sean muy difíciles de resolver, no así con el uso de la CFD. Actualmente con la existencia de supercomputadoras, los procesos necesarios para resolver dichas ecuaciones se realizan en poco tiempo con la aplicación de CFD, siendo ésta una herramienta efectiva y con un gran potencial (Goula et al., 2008).

La CFD tiene distintas aplicaciones en la ciencia y tecnología moderna. Entre las principales áreas de aplicación destaca la industria automotriz (diseño de autos aerodinámicos), la aeronáutica (diseño de aviones, etc.) y la mecánica en general (diseño de turbo-bombas, álabes, motores, radiadores, etc.). En la ingeniería, la aplicación de la CFD está en la mecánica de fluidos, principalmente en el estudio del comportamiento de un fluido o fluidos dentro de un medio.

En cuanto a tanques de sedimentación, una de las aplicaciones de la CFD es en la evaluación y modificación de tanques de sedimentación para plantas de tratamiento de aguas residuales (Goula et al., 2008). En algunos casos se aplica para el diseño de tanques de sedimentación de plantas potabilizadoras. Escasamente y en actual desarrollo se aplica CFD en el diseño de tanques de cultivo con características de auto-limpieza utilizados en acuicultura (Jer-Vui et al., 2013).

Larsen (1977) fue probablemente el primero que utilizó un modelo de CFD en varios clarificadores para plantas de tratamiento de agua residual. Shamber y Larock (1981) utilizaron el método de volumen finito para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, el modelo de turbulencia K-epsilon y la ecuación de concentración de sólidos con velocidad de caída. Todo lo anterior desarrollado para modelar clarificadores secundarios para plantas de tratamiento de agua residual (Goula et al., 2008).

Liu y García (2011) desarrollaron un modelo de CFD en 3D capaz de calcular la dirección de un flujo multifásico turbulento, en un tanque de sedimentación primario para una planta de tratamiento de agua residual. Utilizaron un modelo de dos fluidos, para evaluar el comportamiento de la mezcla suspendida de agua-sólido dentro del tanque. El modelo numérico desarrollado fue utilizado para el diseño final de una propuesta establecida para tanques de sedimentación primarios en Chicago. Las ecuaciones que utilizaron fueron las de Navier-Stokes para dos fluidos parcialmente mezclados, el modelo de turbulencia k-ε (K-Epsilon) y el modelo propuesto fue para un flujo No-Newtoniano basado en el modelo reológico plástico de Bingham.

Goula et al. (2008) desarrollaron una metodología de CFD para el análisis del transporte de sedimentos para diferentes tamaños de partículas en un tanque de una planta de tratamiento de agua potable. Mediante la simulación del tanque pudieron observar el comportamiento del flujo con sedimentos bajo distintos escenarios de las pantallas (baffles) ubicadas en la entrada del flujo. Con ello lograron identificar aquel escenario que favoreciera la mayor sedimentación de sólidos. Para el transporte de sólidos utilizaron un modelo Lagrangiano bajo un esquema de Modelos de Fase Discreta mediante un software de simulación.

Jer-Vui et al. (2013) utilizaron CFD para estudiar los problemas de flujo en un tanque de cultivo de peces. Realizaron simulaciones para comparar las estructuras de entrada de flujo: tangencial y normal. Encontraron que la entrada normal de flujo es escasa en la auto-limpieza. Obtuvieron resultados positivos en la auto-limpieza con la entrada de flujo tangencial, teniendo valores óptimos de velocidad de 20 - 30 m/s. Sin embargo, estas condiciones son inadecuadas para el crecimiento de los peces debido a las altas velocidades.

Brown y Jacobsen (2009) comentan un modelo de CFD basado en un tanque de almacenamiento construido con una entrada de flujo estándar y un arreglo de salida de flujo. El modelo fue adaptado para mostrar el cambio de los patrones de circulación causados por la modificación de la tubería de entrada y una pantalla (baffle) dentro del tanque. Concluyeron que el uso de software CFD reduce costos, logrando aplicar esta técnica en proyectos a pequeña escala y alcanzar un diseño garantizado. Los principales modelos que utilizaron en la simulación fueron las ecuaciones de Navier-Stokes y el método de turbulencia Large Eddy Simulation (LES).

El uso de CFD en el estudio de los fluidos garantiza resultados confiables. Con ello, se puede llevar a cabo la implementación y diseño de componentes de un sistema para mejorar su funcionamiento. Además, se logra visualizar el comportamiento de un fluido y predecir los patrones de flujo presentes en un sistema. Mediante el uso de la CFD se cuenta con la ventaja de poder manipular a conveniencia cada componente del medio en estudio y sus condiciones de operación, esto con gran ahorro de dinero, tiempo y esfuerzo. Así la (CFD) es una

herramienta alterna que puede facilitar el estudio del comportamiento del flujo y los procesos de sedimentación dentro de un tanque utilizado en el cultivo de peces.

3.2. Proceso general de la dinámica de fluidos computacional

El proceso general para el uso y aplicación de un análisis mediante CFD, recomendado por la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio (NASA), en el archivo *NPARC Alliance Verification and Validation*, consta de las etapas siguientes:

1. Formulación del Problema

Etapas donde se describe el objetivo del análisis, así como las rutas más sencillas para alcanzar dicho objetivo. También, se describe la geometría que será analizada, si ésta pertenece a un todo o se puede analizar de forma aislada. Además, se analiza la necesidad del dimensionamiento espacial, si es requerido un modelo de análisis unidimensional (1D), bidimensional (2D) o tridimensional (3D). Aunado a esto, se debe especificar la temporalidad del fenómeno a estudiar, es decir, un análisis de un flujo en estado estacionario o transitorio, incluyendo la naturaleza viscosa del flujo (no viscoso, laminar, turbulento).

2. Modelo geométrico y el Dominio Fluido

Se refiere al cuerpo sobre el cual el flujo será analizado y modelado. Comúnmente se requiere una herramienta de dibujo de CAD para poder definir la geometría. Al establecer la geometría del modelo, se deben considerar simplificaciones al mismo, para permitir un esfuerzo de análisis óptimo y razonable. Se delimita la extensión del dominio finito de la geometría sobre la cual el flujo es simulado. Comúnmente, algunas zonas de la frontera del dominio coinciden con las superficies del cuerpo geométrico. Otras superficies son fronteras libres por donde el flujo entra o sale. La geometría y el dominio del flujo son modelados de manera que estos provean condiciones óptimas que beneficien la generación de la malla. Así, la modelación toma mucho en consideración la estructura y topología de la generación de la malla, es decir, del modelo geométrico.

3. *Establecimiento de las condiciones iniciales y de frontera*

Etapa en la cual se requiere especificar las condiciones físicas en las fronteras de dicho dominio establecido. La simulación generalmente empieza por una solución inicial y ésta usa un método iterativo para alcanzar la solución final del campo de flujo.

4. *Generación de malla*

El dominio del fluido es discretizado en una malla o cuadrícula a través de elementos o volúmenes finitos. La generación de la malla implica la definición de la estructura y topología y posteriormente la generación la cuadrícula de dicha topología. Actualmente todas las mallas son estructuradas con multi-bloques, sin embargo, pueden existir mallas contiguas, no contiguas y con superposición. La malla debe poseer una mínima calidad en su cuadrícula, la cual se define con parámetros de ortogonalidad. Es importante tomar en cuenta la calidad de la malla en zonas donde se requiera ver los fenómenos de capa límite, donde se deben considerar espesores muy finos en las capas que conforman dicha capa límite.

5. *Establecimiento de estrategias de simulación*

Las estrategias para realizar la simulación implican la determinación de aspectos como los pasos de espacio o pasos de tiempo. Dichos pasos se refieren a la evolución de la propiedad principal dependiente (temperatura, velocidad, densidad, presión, concentración, etc.) a través de las dimensiones independientes (tres coordenadas espaciales y el tiempo). Otras estrategias de simulación se refieren a la elección del modelo, es decir, si es un modelo turbulento (flujos con esfuerzos de Reynolds significativos) o químico (procesos que incluyan reacciones químicas), así como la elección de los algoritmos.

6. *Establecimiento de parámetros de entrada*

Un código de CFD generalmente requiere de un archivo de entrada creado a partir de una lista de valores de parámetros de entrada que sean consistentes con la estrategia planteada o

deseada. Además, generalmente se requiere de un archivo de malla que contenga la estructura de la malla en sí, además de la información de las condiciones de frontera para generar una solución inicial del flujo y posteriormente solucionar el dominio completo.

7. Realización de la simulación

La simulación se realiza con diversas posibilidades de opciones para el procesamiento interactivo o por lotes (secciones) y/o con procesamiento distribuido. Esto para lograr un tiempo óptimo en la generación de la solución. De esto depende la capacidad computacional disponible en la simulación.

8. Monitoreo de la simulación

Mientras la simulación está en proceso, la solución es monitoreada para determinar si se ha obtenido una convergencia, denominada convergencia iterativa. Diversas referencias describen los métodos para examinar la convergencia iterativa. Sin embargo, la base principal de la convergencia está en lograr minimizar el error de solución mediante un número determinado de iteraciones, y por otro lado, satisfacer con la igualdad en los modelos matemáticos planteados, con una diferencia mínima de error. Los detalles de este tema se encuentran en *NPARC Alliance CFD verification and Validation Web Site*, en la página titulada *Examining Iterative Convergence*.

9. Post-procesamiento para obtención de resultados

El post-procesamiento incluye la extracción de las propiedades del flujo (empuje, sustentación, resistencia, velocidad, turbulencia, etc.) deseadas del campo de flujo analizado y calculado computacionalmente.

10. Comparación de resultados

Las propiedades del flujo calculadas son posteriormente comparadas con resultados analíticos, computacionales, o estudios experimentales para establecer la validez de los resultados obtenidos.

11. Análisis de sensibilidad

La sensibilidad de los resultados obtenidos son examinados para comprender las posibles diferencias en la exactitud de los resultados y/o la realización de la simulación con respecto a parámetros como: dimensiones, condiciones del flujo, condiciones iniciales, estrategia de los pasos, algoritmos, topología y densidad de la malla, modelo de turbulencia, modelo químico, modelo de flujo, viscosidad, condiciones de frontera y sistema computacional. Se debe considerar realizar repeticiones en el proceso de simulación, hasta llegar a una sensibilidad satisfactoria de los parámetros antes mencionados.

12. Reporte de resultados

Etapa en la cual se reportan los resultados obtenidos en el análisis, incluyendo la descripción de los pasos antes mencionados.

Con lo anterior se garantiza que un análisis mediante CFD, tenga un sustento teórico que garantice la fiabilidad y validez de los resultados obtenidos en cualquier etapa de la simulación. Si bien, los pasos listados anteriormente son una guía para el desarrollo de un análisis mediante CFD, estos son un fundamento válido y sugerido para lograr resultados que sean fieles representantes del fenómeno físico a simular.

3.3. Modelos y ecuaciones de la CFD

Con la ayuda de la CFD, se han realizado diversos estudios en el área de la ingeniería, especialmente relacionada al movimiento de los fluidos. Los modelos de CFD están basados en las ecuaciones de conservación de masa, energía y momentum, derivadas de las ecuaciones de movimiento de Navier-Stokes. Siempre que el flujo es turbulento, dichas ecuaciones deben ser promediadas sobre un pequeño incremento de tiempo aplicando una descomposición de Reynolds, lo cual resulta en ciertas ecuaciones y modelos que describen la energía de turbulencia presente en el flujo. Así, la CFD se basa en dichas ecuaciones para predecir el comportamiento del flujo, considerando cualquier régimen de flujo.

3.3.1 Ecuaciones de Navier-Stokes

La teoría básica de la modelación con CFD son las ecuaciones de la dinámica de fluidos de Navier-Stokes, las cuales son usadas para modelar parámetros del flujo de un fluido, como velocidad, temperatura y presión. Los contornos de velocidad pueden ser posteriormente utilizados para trazar las trayectorias de partículas que viajan a través del flujo, por lo que se pueden calcular distribuciones de tiempo de residencia (Xu, 2010).

Las ecuaciones de Navier-Stokes describen el movimiento de pequeñas regiones y/o volúmenes de fluido. Estas ecuaciones surgen de la aplicación de la segunda ley de Newton para el movimiento de fluidos, juntas con el supuesto de que los esfuerzos del fluido son la suma de un término difuso viscoso (proporcional al gradiente de velocidad), más un término de presión. La forma general de las ecuaciones de Navier-Stokes en coordenadas cartesianas, para un flujo compresible es:

- Ecuación de conservación de masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad 3.1$$

- Ecuaciones de cantidad de movimiento (momentum):

$$M_x \quad \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho u)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2(u)}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2(u)}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2(u)}{\partial z^2} \quad 3.2$$

$$M_y \quad \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2(v)}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2(v)}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2(v)}{\partial z^2} \quad 3.3$$

$$M_z \quad \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho w)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \frac{\partial^2(w)}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2(w)}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2(w)}{\partial z^2} \quad 3.4$$

Aceleración local+ tres términos de advección= gradiente de presión+ tres términos de difusión

- Ecuación de la energía

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad 3.5$$

Aceleración local+tres términos de advección=difusión

Donde: x, y, z son los ejes del sistema coordenado. u, v y w son las componentes radial, tangencial y vertical de la velocidad. ρ es la densidad del fluido. p es la presión absoluta. T es la cantidad de calor del fluido. C_p es el calor específico del fluido. λ es la conductividad térmica y ν es la viscosidad cinemática del fluido.

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

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad 3.6$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad 3.7$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad 3.8$$

La ecuación de continuidad para un flujo incompresible se define como:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad 2.15$$

Donde, al prescindir de los términos ρ y ν , las ecuaciones tienen solamente cuatro incógnitas (u , v , w y p). Las ecuaciones de Navier-Stokes son ecuaciones diferenciales parciales acopladas y no lineales y están dentro de las ecuaciones mejor conocidas y más difíciles de las ciencias de la ingeniería. A partir de éstas ecuaciones, se pueden obtener ecuaciones para casos especiales (flujo estacionario, bidimensional) omitiendo los términos adecuados.

Excepto para unos cuantos flujos especiales y muy simplificados, las ecuaciones de Navier-Stokes se han resistido a ser solucionadas desde su desarrollo original. Actualmente, con el avance de las computadoras se ha podido dar solución a diversos fenómenos representados por estas ecuaciones, aunque técnicamente son aproximadas, muchas de ellas han resultado ser válidas (Potter et al., 2002).

3.3.2 Turbulencia y Modelo de turbulencia $k-\epsilon$

La turbulencia es un comportamiento caótico dependiente del tiempo, presente en casi todos los flujos. Generalmente se cree que es debido a la inercia del fluido como un todo: la culminación de la dependencia del tiempo y aceleración convectiva. Por lo tanto, flujos donde los efectos de inercia son pequeños, tienden a ser laminares. De ahí se deriva el número de Reynolds, el cual cuantifica que tanto es afectado el flujo por las fuerzas inerciales. Se cree, sin total certeza, que las ecuaciones de Navier-Stokes describen la turbulencia apropiadamente.

Sin embargo, la solución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes para flujos turbulentos es en extremo difícil debido a las diferencias significativas en la escala de mezcla-longitud contenida en un flujo turbulento. La solución estable de estas ecuaciones requiere de una discretización muy fina. En cuanto a la discretización del espacio, en una sección de 0.1×0.1 m se tienen vórtices de 10 - 100 micrómetros de tamaño. Para ello se necesitaría contar con una

malla discretizada en al menos $10^9 - 10^{12}$ puntos. Además, ya que la turbulencia depende del tiempo, para poder analizarla se necesita una discretización temporal en lapsos de tiempo de aproximadamente 100 microsegundos, lo que demanda un tiempo computacional casi imposible de cubrir. Para contrarrestar esta dificultad, al modelar flujos turbulentos en un esquema práctico de CFD, se utilizan ecuaciones como las RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes) descritas a continuación.

3.3.2.1 Ecuaciones Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS)

Las ecuaciones RANS son la aproximación más antigua para la modelación de la turbulencia. Un conjunto promediado de las ecuaciones de continuidad y momentum de Navier-Stokes es resuelto, evitando calcular cada uno de los pequeños vórtices de turbulencia en todo el flujo. Esto es, al considerar términos promediados en función del tiempo de las ecuaciones de continuidad y momentum (en su forma conservativa), para el cálculo de las fluctuaciones turbulentas de un flujo incompresible en función de las velocidades medias, presiones medias, esfuerzos medios, etc., (descartando fluctuaciones instantáneas del flujo) se pueden calcular los procesos de turbulencia, mediante las ecuaciones llamadas RANS:

- Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad 2.16$$

- Ecuaciones de momentum

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}\bar{u})}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{w}\bar{u})}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial(\bar{p})}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\nu \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right] - \left[\frac{\partial \bar{u} \bar{u} \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v} \bar{u} \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w} \bar{u} \bar{u}}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad 2.17$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}\bar{v})}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{w}\bar{v})}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial(\bar{p})}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\nu \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right] - \left[\frac{\partial \bar{u} \bar{v} \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v} \bar{v} \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w} \bar{v} \bar{u}}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad 2.18$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}\bar{w})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}\bar{w})}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{w}\bar{w})}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial(\bar{p})}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\nu \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right] - \left[\frac{\partial \bar{u}'\bar{w}'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}'\bar{w}'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}'\bar{w}'}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad 2.19$$

Donde \bar{u} , \bar{v} , \bar{w} y \bar{p} son valores medios y u' , v' , w' y p' son fluctuaciones de turbulencia.

Puede notarse que las ecuaciones anteriores son similares a las de un flujo laminar, excepto por la presencia de los términos de la forma $\overline{a'b'}$, que son los términos conocidos como esfuerzos de Reynolds. Aunado a ello, Boussinesq (1868) (referenciado en Tu, et al., 2013) propuso que los esfuerzos de Reynolds pueden estar ligados a la tasa media de deformación. Así, se obtiene que:

$$-\rho \overline{u'u'} = 2\mu_T \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \frac{2}{3} \rho k \quad 2.20$$

$$-\rho \overline{v'v'} = 2\mu_T \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \frac{2}{3} \rho k \quad 2.21$$

$$-\rho \overline{w'w'} = 2\mu_T \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} - \frac{2}{3} \rho k \quad 2.22$$

$$-\rho \overline{u'v'} = \mu_T \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \quad 2.23$$

$$-\rho \overline{u'w'} = \mu_T \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) \quad 2.24$$

$$-\rho \overline{v'w'} = \mu_T \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) \quad 2.25$$

De los términos anteriores, el lado derecho de cada ecuación es análogo a la Ley de Viscosidad de Newton, excepto por la aparición de los términos de turbulencia o viscosidad turbulenta μ_T y la energía cinética de turbulencia k .

Al igual que las ecuaciones RANS, es posible desarrollar unas ecuaciones de transporte para adaptar la cantidad de turbulencia k y otros términos de turbulencia como la tasa de disipación de la energía de turbulencia ε . Con ello, Launder y Spalding (1974) propusieron el modelo estándar de turbulencia k - ε , utilizado comúnmente para el análisis de flujos turbulentos.

3.3.2.2 Modelo de turbulencia κ-ε

Existen diversos modelos de turbulencia basados en dos ecuaciones. Los más populares son el modelo κ-ε y κ-ω (K-Épsilon y K-omega). Para el modelo κ-ε, ε representa la tasa disipación de la energía cinética de turbulencia dentro del sistema. Para el modelo κ-ω, ω representa la relación entre la tasa disipación de la energía cinética de turbulencia y la energía cinética de turbulencia, κ.

Varios estudios han comprobado la eficacia del modelo κ-ε aplicado a flujos circulares, flujos confinados con esfuerzos cortantes de Reynolds significativos, además de la poca demanda computacional y óptima convergencia para su solución. Por ello, dicho modelo fue el seleccionado y aplicado en la presente investigación, el cual consiste en las siguientes ecuaciones.

Modelo de turbulencia κ-ε

$$(\kappa) \quad \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v k)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w k)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right] + (P - D) \quad 2.26$$

$$(\varepsilon) \quad \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \varepsilon)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w \varepsilon)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P - C_{\varepsilon 2} D) \quad 2.27$$

$$P = 2\mu_T \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \mu_T \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} \mu_T \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 - \frac{2}{3} \rho \mu_T k \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad 2.28$$

Dónde:

$$D = \rho \varepsilon \quad 2.29$$

$$k = \frac{1}{2} u'_i u'_i, \text{ con } i = 1, 2, 3 \quad 2.30$$

$$\varepsilon = \mu_T \overline{\left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right) \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right)}, \text{ con } i, j = 1, 2, 3 \quad 2.31$$

$$\mu_T = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad 2.32$$

De las ecuaciones anteriores, k es la energía cinética; ϵ es la tasa de disipación de la energía cinética; μ coeficiente de viscosidad dinámica; μ_T viscosidad local de turbulencia; P y D son términos de producción y destrucción, respectivamente; σ y C son constantes ajustables, según datos experimentales propuestos por Launder y Spalding (1974). Este modelo se aplicó para predecir la energía cinética presente dentro del tanque y así garantizar su aportación a los campos de velocidad para que estos fuesen representativos del comportamiento del flujo dentro del tanque.

3.4 CFD-ANSYS-FLUENT

Actualmente en el mercado tecnológico existen diversos paquetes computacionales de simulación de flujos. Por listar algunos, **OpenFOAM** es un software libre con paquetería para CFD, producida por la compañía comercial OpenCFD Ltd. Este software de CFD es utilizado por organismos comerciales y académicos. Cuenta con una extensa variedad de herramientas para resolver cualquier problema complejo de flujo de fluidos, incluyendo reacciones químicas, turbulencia y transferencia de calor. **OpenFlow** es un software libre (para Linux o Windows), principalmente diseñado para resolver las ecuaciones incompresibles de turbulencia de Navier-Stokes con aproximación de simulación de remolinos grandes (Large Eddy Simulation [LES]). Puede resolver geometrías arbitrarias tridimensionales complejas con aproximaciones mediante volúmenes finitos. **FLOW3D** es una herramienta poderosa de modelado para cualquier proceso de flujos. Posee la característica principal de predecir con alto grado de exactitud flujos a superficie libre. Posee un paquete completo de pre-procesamiento, mallado y post-procesamiento.

FLUENT Inc. es un software perteneciente a la familia ANSYS, Inc., que es uno de los líderes mundiales desarrolladores de software de simulación en ingeniería. Uno de sus principales productos de simulación es el software de dinámica de fluidos computacional CFD-FLUENT. Este software es un código general multi-propósito basado en el método de volumen finito y elemento finito aplicado a una malla. La tecnología de FLUENT ofrece un gran número de modelos físicos que pueden ser aplicados a una gran variedad de ramas de la industria e ingeniería (Xu, 2010). Así mismo, ANSYS, Inc. posee una paquetería completa

para simulación, comenzando con un módulo de dibujo en 3D, modelos matemáticos y esquemas de solución, un módulo para crear cualquier tipo de malla y un paquete de post-procesamiento.

Para realizar la simulación en ANSYS-FLUENT, se recomienda seguir las etapas mostradas en la Ilustración 3.1. En cada una de las etapas se desglosan algunos puntos esenciales que deben ser considerados para evitar cualquier contratiempo en el proceso de simulación.

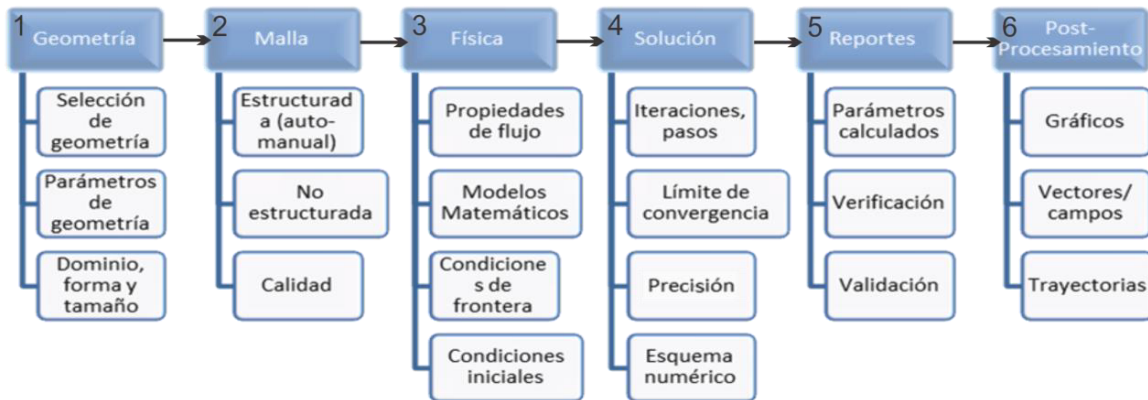


Ilustración 3.1. Etapas de la simulación con CFD-ANSYS-FLUENT

3.4.1 Modelo geométrico

Dentro de sus productos, ANSYS-FLUENT ofrece una herramienta de dibujo de CAD en 2D y 3D llamado Ansys-DesignModeler. Con dicho módulo se puede realizar la representación geométrica del sólido que se desea modelar y a partir de este se puede extraer el dominio del fluido sobre el cual se crea la discretización de la malla. Por otro lado, este módulo llamado Ansys-DesignModeler posee la opción de importar cualquier sólido o geometría en 2D o 3D de la mayoría de las paqueterías de dibujo, principalmente de SolidWorks. Aunado a ello, una vez que se elige la opción de importar la geometría desde otro software de dibujo, con Ansys-DesignModeler se pueden detallar o mejorar cualquier aspectos del dibujo importado, a fin de tener un dominio cuya topología sea lo más amigable posible para realizar sobre ella el proceso de mallado.

3.4.2 Generación de Malla

Un módulo muy completo que posee la paquetería de ANSYS es la herramienta de mallado Ansys-Meshing. Con éste módulo se puede llevar a cabo la discretización del dominio a modelar. Esto por medio de la fragmentación del sólido en pequeños elementos llamados volúmenes finitos, los cuales pueden ser de tipo hexaédrico, prismático, tetraédrico y piramidal. Con la combinación de estas formas, se puede llevar a cabo la fragmentación de cualquier geometría, ajustando dichos elementos a la topología del dominio a modelar. La convergencia de los resultados depende de la calidad de la malla, es por ello que ANSYS-Meshing propone diversas escalas y métodos para evaluar la calidad de los elementos que conforman la malla.

3.4.3 Set-Up en FLUENT

Dentro de la interfaz de ANSYS-FLUENT, se le conoce como *set-up* al apartado donde se seleccionan los parámetros, ecuaciones, modelos de turbulencia y esquemas numéricos de solución para llevar a cabo la simulación. En dicho apartado, FLUENT cuenta con diversas opciones de simulación, tales como esquema de solución (Basado en presión o basado en densidad), estado del flujo (estacionario o transitorio), modelos de turbulencia (κ - ϵ , κ - ω , Reynolds Stress, etc.), esquemas de solución (PRESTO!, SIMPLE, SIMPLEC, etc.), grado de solución (1er Orden, 2do Orden, Implícito, Explícito, etc.), entre otros. Además, dentro de este apartado, se seleccionan los pasos de tiempo (*time-steps*) en los que se requiere llevar a cabo la solución, el número de iteraciones, etc. Esto según el fenómeno que se tenga, el poder computacional disponible y el grado de exactitud deseado.

3.4.4 Condiciones iniciales y de frontera

ANSYS-FLUENT tiene como opciones las condiciones de frontera de entradas, salidas, paredes y orificios. Estas condiciones de frontera son establecidas en el dominio a simular, cada una según la zona que se tenga en la geometría. Es posible tener varias combinaciones de estas condiciones siempre y cuando exista coherencia en el modelo geométrico. Dentro de la

etapa de selección de las físicas, se asignan los valores de las condiciones iniciales y de frontera a todas aquellas fronteras correspondientes.

3.4.5 Monitoreo de la simulación

FLUENT cuenta con una herramienta de monitoreo de la solución, la cual básicamente muestra y reporta el comportamiento de los resultados en cada iteración, para identificar si se tiene una solución con tendencia a converger o a divergir. Esto mediante gráficas que muestran los valores de los residuales de cada término de las ecuaciones a resolver. Esto para verificar la precisión alcanzada por cada uno de los parámetros monitoreados. Aunado a ello, dentro del monitoreo se realiza un procedimiento de verificación de los resultados que arroja el software, para identificar anomalías que perjudiquen la convergencia de la solución. La Ilustración 3.2 muestra el procedimiento recomendado para realizar el monitoreo de la solución, con el fin de obtener una convergencia satisfactoria.

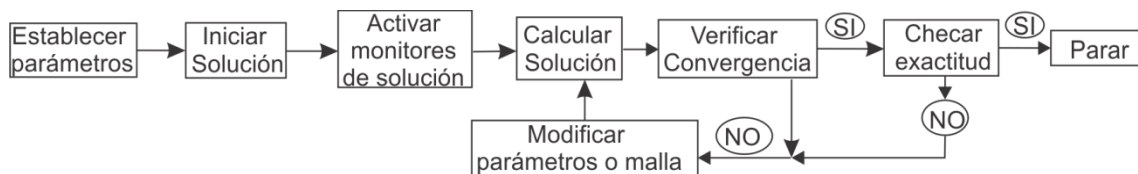


Ilustración 3.2. Procedimiento para el monitoreo de la solución.

3.4.6 Post-procesamiento

Finalmente, la paquetería de ANSYS cuenta con un módulo de post-procesamiento llamado ANSYS-Results, donde una vez obtenidos los resultados en FLUENT, estos pueden ser exportados a un visualizador de datos dentro de ANSYS-Results para poder ser interpretados mediante distintos gráficos. Esto facilita la comprensión del comportamiento de los campos de velocidad, turbulencia, presión, etc. Así mismo, los archivos de resultados arrojados por FLUENT pueden ser exportados bajo distintos formatos para el tratamiento de los datos mediante software como Excel, TecPlot, etc.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

En el siguiente apartado se muestra la metodología empleada para llevar a cabo el presente trabajo. Siguiendo el cronograma de actividades planteado, se desarrollaron las diversas etapas que fueron claves para esta investigación. Es importante recalcar que el software no requiere de una etapa de calibración, dado que su fundamento se basa en la solución numérica de las ecuaciones gobernantes de la Hidráulica y Mecánica de Fluidos. Así, la primera actividad realizada fue la validación del software de simulación, mediante la modelación del tanque de cultivo a escala propuesto por Flores y López (2012). Con la comparación de resultados experimentales y los obtenidos en la simulación, se verificó la correcta selección de parámetros del software que posteriormente fueron utilizados en la simulación del tanque de cultivo del caso de estudio “El Zarco”, en sus condiciones actuales de operación. Posteriormente, se procedió con la propuesta de escenarios para evaluar el funcionamiento hidrodinámico del tanque “El Zarco” bajo diversas modificaciones del diámetro y rejillas del sedimentador. Finalmente, se obtuvieron campos y vectores de velocidad del comportamiento del flujo para cada escenario, identificando la influencia de las modificaciones en el flujo del tanque, principalmente dentro del sedimentador.

4.1 Cronograma de actividades

La Ilustración 4.1 muestra las etapas generales en las que está dividido el desarrollo del trabajo. La Ilustración 4.2 muestra el cronograma de actividades completo, con cada una de las tareas que sirvieron como guía para realizar la investigación. La primera fase del trabajo fue el desarrollo de la Etapa 1 y parte de la Etapa 2. Esto consistió en llevar a cabo la conceptualización y simulación del tanque a escala descrito en Flores y López (2012) para validar los parámetros, modelos y ecuaciones del software de simulación CFD-ANSYS-

FLUENT. Posteriormente, parte de la Etapa 2 fue realizar la conceptualización y el modelo geométrico del tanque de recirculación para el caso de estudio “El Zarco”, para su posterior simulación. Dentro de esta etapa se realizó el planteamiento y simulación de distintos escenarios de operación del tanque caso de estudio “El Zarco”, bajo modificaciones del diámetro y rejillas del sedimentador.

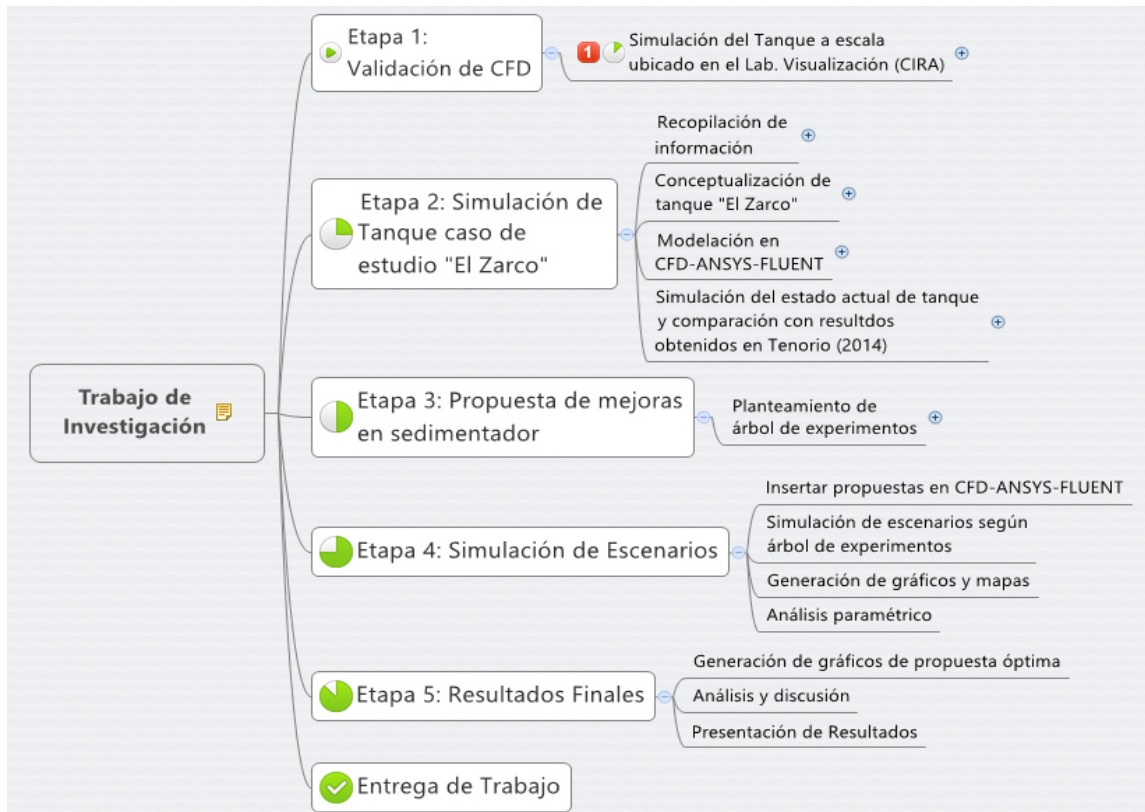


Ilustración 4.1. Etapas realizadas en la investigación.

4.2 Validación del software ANSYS-FLUENT

Dentro de este apartado se realizó una recopilación de información referente a las características del tanque a escala descrito en Flores y López (2012). Esto consistió en la descripción geométrica, identificación de los diferentes elementos de entrada para su funcionamiento y datos de salida (resultados). Este tanque a escala fue simulado en ANSYS-FLUENT con fines de validación de los parámetros, modelos y ecuaciones utilizadas en el software.

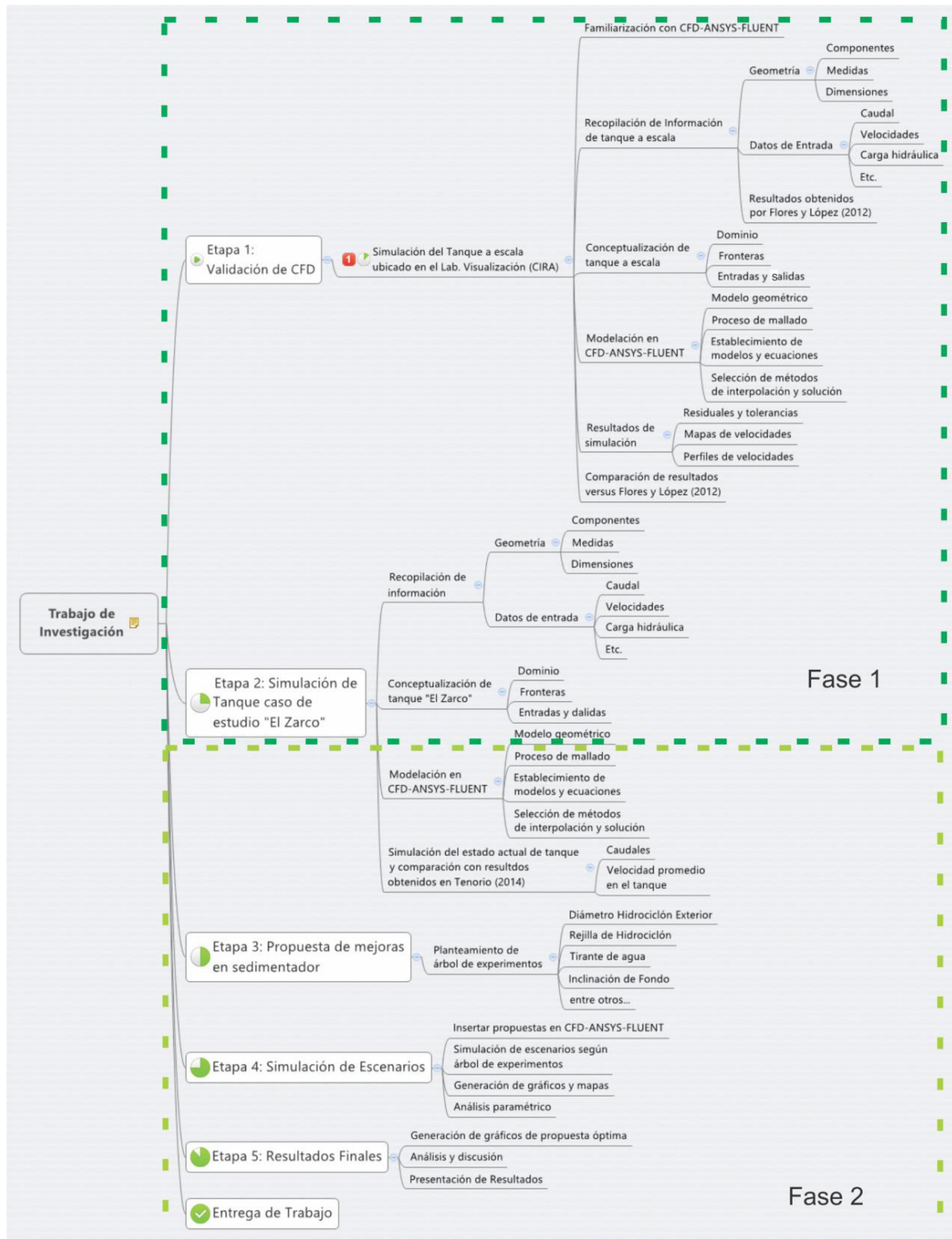


Ilustración 4.2. Cronograma de actividades y tareas de la investigación.

4.2.1 Tanque de cultivo a escala (Flores y López, 2012)

En su trabajo de investigación, Flores y López (2012) llevaron a cabo la medición física-experimental de la velocidad del flujo en un tanque de cultivo a escala. Esto mediante el uso y aplicación de técnicas ópticas no invasivas PIV (Particle Image Velocimetry) y PTV (Particle Tracking Velocimetry). Teniendo el medio físico, lograron obtener de manera no intrusiva los campos y perfiles de velocidad del flujo. Con ello, lograron identificar el arreglo óptimo de los dispositivos de entrada y salida de flujo que garantizan una buena eficiencia de remoción de sedimentos dentro del tanque. Es importante mencionar que los datos experimentales que obtuvieron se tomaron como referencia para validar el software de simulación empleado en el presente trabajo.

4.2.1.1 Características físico-hidráulicas del tanque de cultivo a escala

El tanque es de sección circular con dimensiones de 103 cm de diámetro y 35 cm de altura. Este tanque cuenta con un SRA, con aditamentos que permiten controlar la carga en el depósito y el caudal en el tanque. El sistema cuenta con tubería de PVC hidráulico para la alimentación de agua al tanque por gravedad, a través de un tren de difusores, con tubería de 13 mm (1/2") y 19 mm (3/4") de diámetro, con boquillas de diferentes diámetros. Los trenes de difusores están instalados de tal forma que controlan la dirección y velocidad del flujo. Se utilizaron 5 difusores separados a una distancia vertical de 6 cm entre ellos y la altura del tirante del agua fue de 30 cm (Ilustración 4.3). Flores y López (2012) plantearon 5 escenarios de operación del tanque, variando principalmente el diámetro y dirección de los difusores. Una de las configuraciones que mejor comportamiento hidrodinámico presentó fue la que se muestra en la Tabla 4.1, ya que el arreglo de difusores propicia velocidades que benefician la canalización de partículas a la zona del sedimentador. Esta configuración fue la seleccionada para validar el software.

Tabla 4.1. Configuración de entrada de flujo (Flores y López, 2012)

Difusor		Dirección del difusor (°)					Observaciones
Diámetro (mm)	Tipo	1	2	3	4	5	
3.18	Tapón	45	30	45	90	135	Un tren de difusores

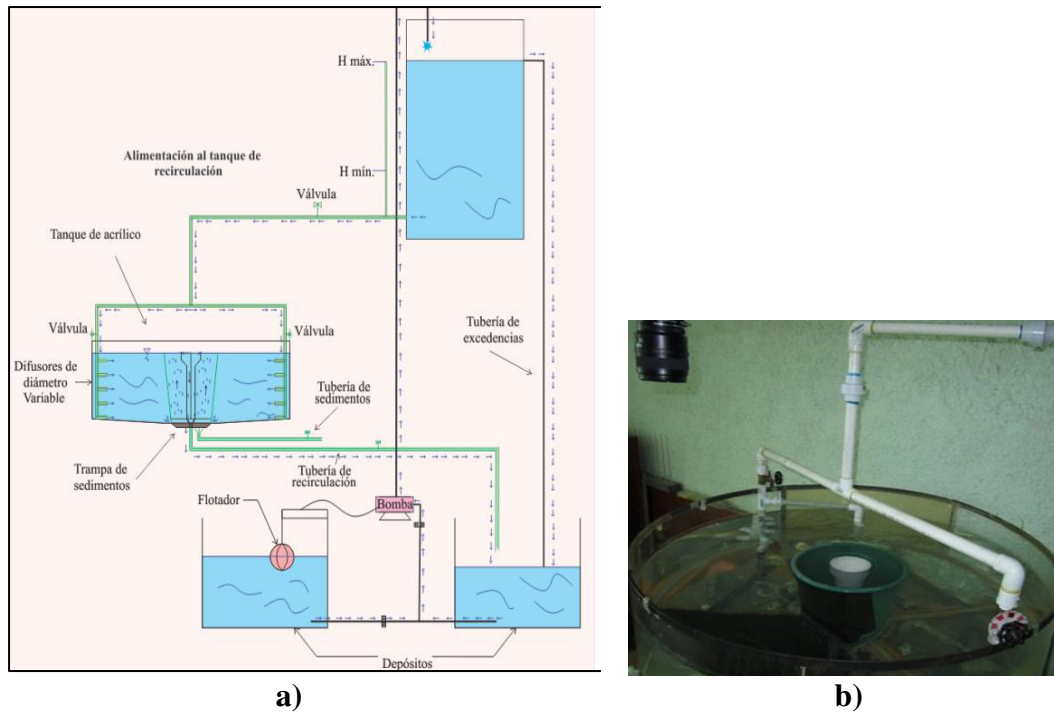


Ilustración 4.3. Sistema de recirculación de agua a escala (Flores y López, 2012). a) Diagrama del sistema de recirculación a escala; b) Tanque de cultivo a escala.

El sistema de salida radica en el principio de hidrociclón que consiste en dos tubos concéntricos instalados en el centro del tanque. El tubo externo tiene ranuras perimetrales en la parte inferior, esto permite la entrada de agua y sedimentos por el tubo exterior ascendiendo hasta alcanzar la altura del tubo interior conectado al sistema de salida. En ésta zona se cuenta con una trampa de sedimentos que sobresale del fondo del tanque en la parte inferior (Ilustración 4.4). La Tabla 4.2 muestra los diferentes parámetros de la configuración con el arreglo de difusores antes mencionado, y que fue considerada para la validación del software ANSYS-FLUENT. Los datos se usaron como condiciones iniciales para llevar a cabo la simulación y los resultados se utilizaron con fines de comparación.

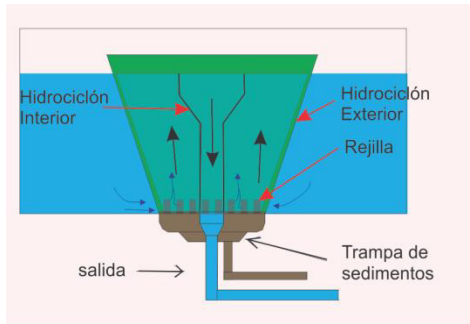


Ilustración 4.4. Esquema del tanque con salida tipo Hidrociclón (Flores y López, 2012)

Tabla 4.2. Parámetros físico-hidráulicos considerados en la validación.

Parámetros	Valor
Diámetro de difusor (mm)	3.18
Caudal (lpm)	9
Carga Hidráulica (cm)/(Pa)	119/11667
Tirante (cm)	30
No. de difusores	5
Vel. Promedio en el tanque (cm/s)	5.95
Vel. Promedio de difusor (V_{orif}) en (cm/s)	474.79
Coefficiente de descarga calculado (C_d)	0.8
Coefficiente de proporcionalidad (α)	1.25%

4.2.1.2 Modelo conceptual del tanque

En este apartado se muestra la conceptualización gráfica del tanque, es decir, la identificación de cada componente y/o elemento del tanque y su representación como parte del modelo a simular. Básicamente, un modelo conceptual consta de un dominio, condiciones de frontera (pared), entradas, salidas y orificios. La Ilustración 4.5 muestra el tanque a escala y la representación de las condiciones de frontera a utilizar en la simulación.

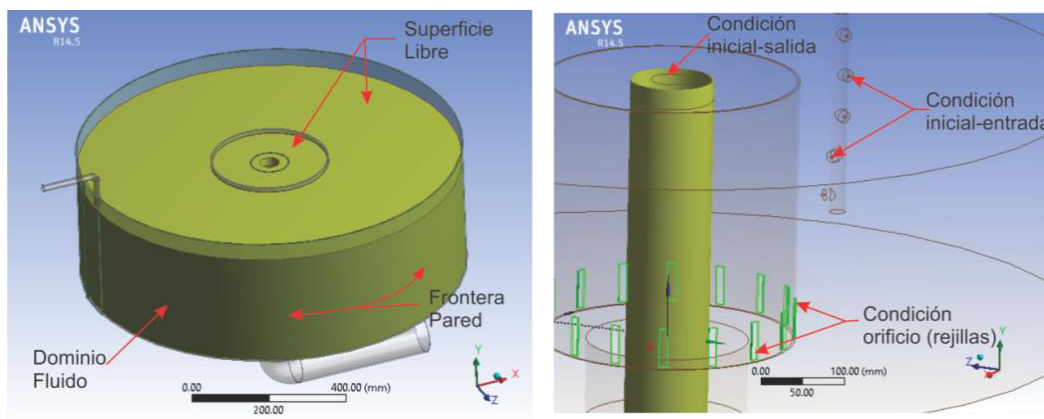


Ilustración 4.5. Modelo conceptual del tanque a escala

En los apartados siguientes se mencionarán los criterios aplicados en cada una de las condiciones iniciales y de frontera utilizadas en la simulación.

4.2.2 Modelación y simulación del tanque de cultivo a escala

Para la validación del software ANSYS-FLUENT se llevó a cabo la modelación y simulación del tanque a escala. El software posee una variedad de parámetros, ecuaciones, modelos y esquemas de solución para llevar a cabo una correcta simulación. Es por ello, que en esta etapa se seleccionaron aquellos que mejor se ajustaron al comportamiento del flujo dentro del tanque y cuya convergencia estuviese dentro de los límites permisibles, teniendo como base de comparación los resultados (campos y perfiles de velocidad) obtenidos experimentalmente por Flores y López (2012). Si bien, no se obtuvo una congruencia exacta de resultados debido a los diferentes métodos de medición del flujo, se consiguió que la comparativa fuese similar.

4.2.2.1 Etapas de la modelación

La modelación del tanque a escala se realizó siguiendo seis etapas fundamentales mostradas en la Ilustración 3.1: i) establecimiento de la geometría (tanque de cultivo), ii) creación de la malla (método de volumen finito), iii) establecimiento del dominio, condiciones iniciales y/o de frontera, iv) selección de los modelos, ecuaciones y método de solución (algoritmos), v) verificación de los reportes arrojados por el software (residuales, tolerancias, etc.) y vi) el post-procesamiento de los resultados para la obtención de gráficos.

4.2.2.2 Definición de la geometría del tanque

La geometría del tanque se definió con la ayuda del software CAD SolidWorks, mediante trazos lineales y herramientas de dibujo obteniendo el sólido en 3D del tanque de acuicultura y sus elementos como los difusores y el sedimentador tipo hidrociclón. Una vez teniendo el sólido del tanque, se procedió a extraer el fluido confinado dentro del mismo, ya que sobre éste se lleva a cabo la simulación (Ilustración 4.6).

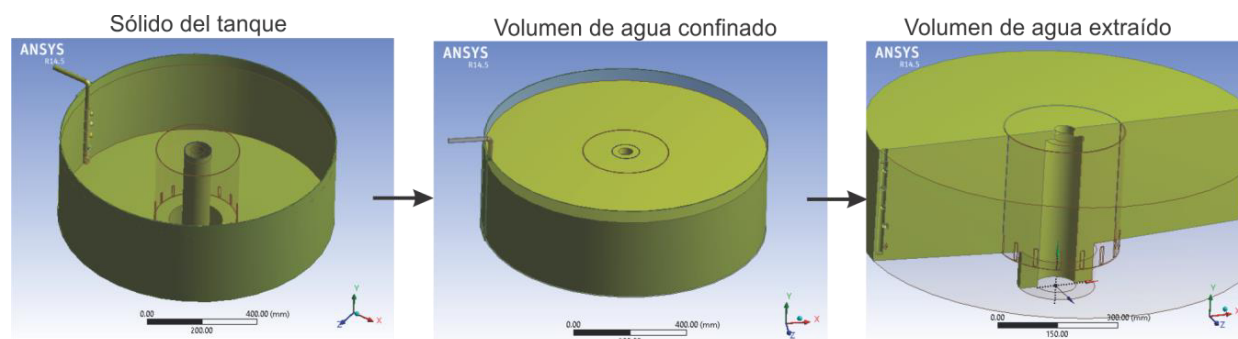


Ilustración 4.6. Extracción del volumen de fluido a partir del sólido del tanque.

El volumen de agua extraído representa el sólido del fluido que fue dividido en elementos finitos mediante el proceso de mallado con la ayuda de la herramienta ANSYS-Meshing.

4.2.2.3 Proceso de mallado

El proceso de mallado fue una parte muy importante para esta etapa de validación ya que la convergencia y veracidad de los resultados dependen mucho de una buena calidad en la malla. El software ANSYS-Meshing posee varios métodos para realizar la fragmentación del sólido en volúmenes finitos de control que conforman la malla. Para este caso se utilizó el método *CutCell*, el cual genera un porcentaje alto de elementos (celdas) hexaédricas en todo el dominio. Este método también utiliza algunos otros elementos como tetraedros y prismas para lograr conformar la malla en zonas agudas o afiladas. Este método es ampliamente recomendado y utilizado para simular fluidos en geometrías complejas. La Ilustración 4.7 muestra la malla que se realizó a la geometría del fluido del tanque. Puede observarse que la malla es muy fina en casi todo el dominio con un tamaño promedio de celdas (elementos) de 4mm. En la zona de los difusores se tiene una malla aún más fina con tamaños de celdas de hasta 1mm.

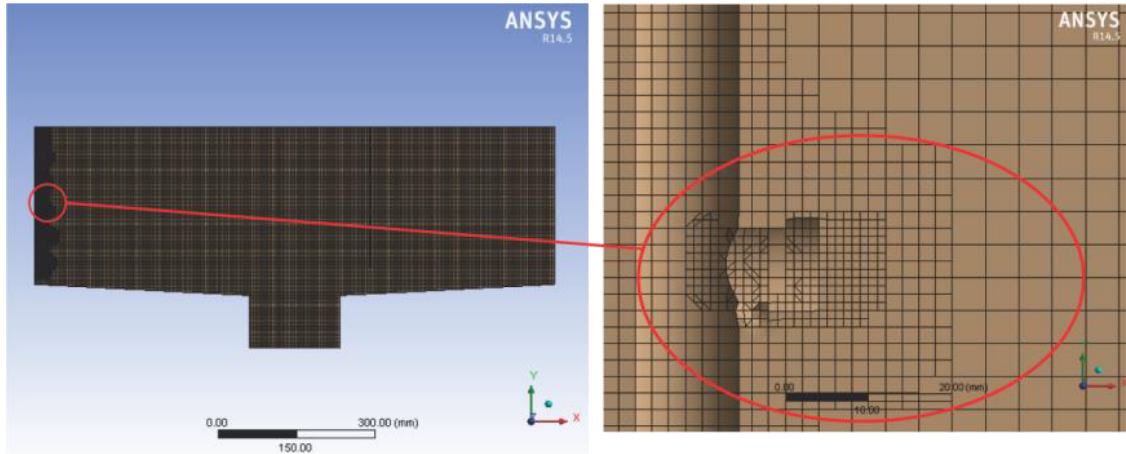


Ilustración 4.7. Detalle de la malla *CutCell* en la geometría del tanque.

La calidad de la malla es satisfactoria cuando el usuario así lo considere, sin embargo, ANSYS-Meshing recomienda algunos parámetros (escalas) para verificar que la malla se encuentre dentro de un rango aceptable de calidad para asegurar convergencia y resultados confiables. La escala que se utilizó en este trabajo fue la llamada *Orthogonal Quality*, la cual se basa en la medición de la ortogonalidad de los elementos, es decir, que tan perfectamente geométricos son éstos elementos. La Tabla 4.3 muestra las características de la malla realizada para el tanque a escala.

Tabla 4.3. Características de la malla del tanque

Concepto	Valor	Observaciones												
Número de elementos	3,864,310	En su mayoría, hexaedros												
Número de nodos	3,946,634													
Min. orthogonal quality	0.2029	<ul style="list-style-type: none"> Orthogonal quality mesh metrics spectrum <table border="1"> <tr> <td>Inaceptable</td> <td>Bad</td> <td>Acceptable</td> <td>Good</td> <td>Very good</td> <td>Excellent</td> </tr> <tr> <td>0-0.001</td> <td>0.001-0.10</td> <td>0.10-0.20</td> <td>0.20-0.69</td> <td>0.70-0.95</td> <td>0.95-1.00</td> </tr> </table>	Inaceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent	0-0.001	0.001-0.10	0.10-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00
Inaceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent									
0-0.001	0.001-0.10	0.10-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00									
Máx. orthogonal quality	1.0													
Prom. orthogonal quality	0.996													
Tamaño min. elemento	1mm													
Tamaño máx. elemento	4mm													

Si bien, se tienen valores “Buenos” con valores mayores a 0.2029 en cuanto a la calidad mínima de la malla, estos corresponden a un número de elementos muy pequeño (menos del 2% de elementos). La mayor cantidad de elementos (97%) tiene un valor superior a 0.96 como lo muestra la Ilustración 4.8.

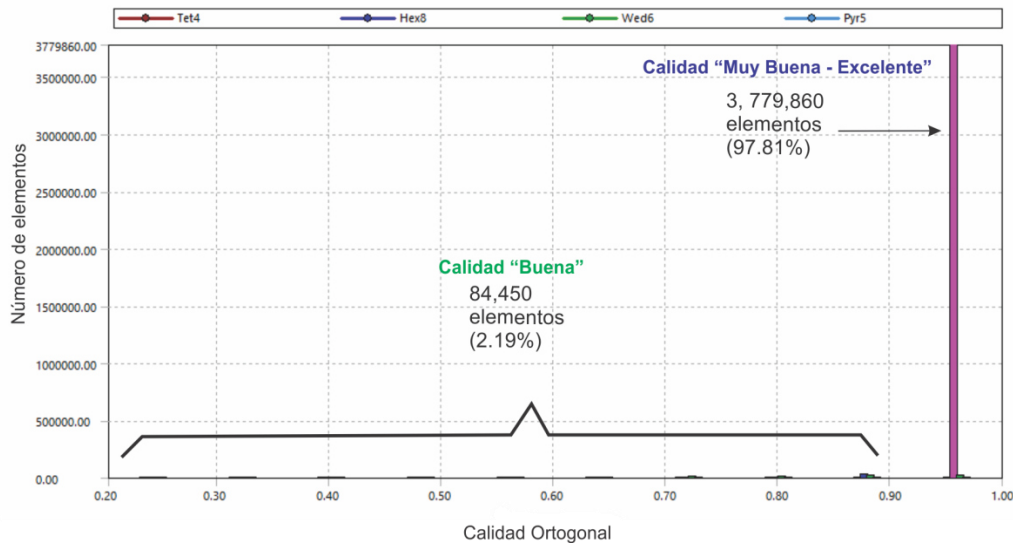


Ilustración 4.8. Gráfica de No. de elementos vs. Calidad Ortogonal.

Con lo anterior se garantizó que la malla creada es aceptable y se procedió a establecer las condiciones de frontera para su simulación en ANSYS-FLUENT.

4.2.2.4 Establecimiento de parámetros del software

Dentro de esta etapa, se procedió a establecer principalmente los modelos matemáticos, esquemas numéricos de solución así como las condiciones iniciales y de frontera. Con ello se inicia el procedimiento de simulación en ANSYS-FLUENT, el cual se describió en la Ilustración 3.2.

Para la etapa de solución en ANSYS-FLUENT se estableció el solucionador basado en presión (“Pressure-Based Solver”). En este método el campo de velocidad es obtenido de la ecuación de Momentum. Posteriormente, la ecuación de conservación de masa (Continuidad) es calculada resolviendo una ecuación de corrección de presión. Esta ecuación de corrección se deriva de igual manera que la del campo de velocidad pero se corrige la presión hasta satisfacer la ecuación de continuidad. El flujo se consideró incompresible y estacionario (no transitorio) ya que dentro del tanque usualmente se tienen velocidades relativamente bajas y los valores de entrada y salida del flujo se consideran constantes en lo largo del tiempo. El fluido utilizado en la modelación fue agua con las propiedades mostradas en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Propiedades del agua utilizada en la modelación

Densidad	998.2	Kg/m ³
Calor específico	4182	j/kg-k
Conductividad térmica	0.6	w/m-k
Viscosidad dinámica	0.001003	Kg/m-s

Los modelos y ecuaciones establecidas para llevar a cabo la modelación fueron: la ecuación de conservación de masa (Continuidad) y las ecuaciones de momentum, bajo el esquema RANS. Además, para el fenómeno de turbulencia se estableció el modelo matemático que rige su comportamiento. Entre las ecuaciones existentes para el cálculo de la turbulencia, se aplicó el modelo κ - ϵ (K-Épsilon, energía cinética y su tasa de disipación). Como se mencionó anteriormente, se recomienda este modelo por tratarse de un flujo circular, confinado y con esfuerzos cortantes de Reynolds significativos. Las condiciones de celdas, iniciales y de frontera se establecieron como lo indica la Tabla 4.5. Partiendo de los datos de Flores y López (2012), se establecieron 3 casos de simulación del tanque de cultivo a escala.

Tabla 4.5. Condiciones de frontera para tanque a escala de Flores y López (2012)

Caso	Elemento	Zona	Condición	Valor	Observaciones
-	Volumen de agua	Interior	Celdas interiores	-	-
-	Paredes del Tanque	Pared adyacente al fluido	Frontera de pared	-	-
-	Superficie	Superficie Libre del agua, adyacente al fluido	Frontera de superficie	-	-
Caso 1	Entrada	Área transversal de los difusores	Entrada de velocidad	474.79 cm/s	Dato de Flores y López (2012)
	Salida	Pared interna de hidrociclón interior	Salida de flujo a presión atmosférica	Caudal calculado por el software	
Caso 2	Entrada	Área transversal de los difusores	Entrada de velocidad	418.97, 425.41, 429.84, 432.98, 434.85 (cm/s)	Con Coef. Descarga Cd=0.9
	Salida	Pared interna de hidrociclón interior	Salida de flujo a presión atmosférica	Caudal calculado por el software	
Caso 3	Entrada	Área transversal de los Difusores	Entrada de flujo másico, \dot{m}	0.147 kg/s en cada difusor	Equivalente a 1.8 lpm c/dif
	Entrada	Área transversal de los Difusores	Entrada de carga (Presión)	12000, 12637, 13274, 13912, 14549 Pa	Dato de Flores y López (2012)
	Salida	Pared interna de hidrociclón interior	Salida de flujo a presión atmosférica	Caudal por verificar y velocidades de difusores por calcular.	

La principal diferencia radicó en la condición de entrada, donde en dos casos se propuso **entrada de velocidad de flujo** y salida a superficie libre, y otro caso con **entrada de flujo másico** y carga de presión con salida a superficie libre.

Los datos de entrada de carga por presión fueron obtenidos por Flores y López (2012), de acuerdo a las condiciones geométricas e hidráulicas del modelo de laboratorio. Es importante mencionar que la salida del flujo se consideró a través de una pared delgada sobre el tubo interior del hidrociclón, asumiendo que el flujo vierte mediante una capa delgada de fluido sobre dicha pared debido al bajo caudal que se tuvo. Sin embargo, para el tanque caso de estudio “El Zarco” se realizó un análisis para calcular la carga de agua que vierte sobre el tubo de salida en forma de vertedor circular.

Finalmente, una vez establecidas las condiciones de frontera y los modelos matemáticos de los 3 casos de simulación del tanque a escala, se procedió a seleccionar los esquemas de solución y su discretización espacial, es decir, los métodos y algoritmos para la solución de las ecuaciones.

4.2.2.5 Esquemas numéricos de solución

El esquema SIMPLE-Coupled (Semi-Implicit Method for Pressure-Linkage Equations) fue utilizado para resolver las ecuaciones antes mencionadas. En este esquema se asume un campo de presiones preliminar y se resuelven las ecuaciones de momentum. Posteriormente, a partir de la ecuación de continuidad se obtiene una ecuación de corrección de presión y se resuelve para corregir el campo de presión. Finalmente, este campo de presiones es utilizado para actualizar (corregir) el campo de presiones y velocidades resueltos preliminarmente. Los campos de presión preliminares son mejorados progresivamente a través del proceso iterativo hasta que la convergencia es alcanzada para el campo final de velocidad y de presión. Para los métodos iterativos de interpolación para la solución de los términos de cada ecuación, se seleccionaron aquellos que mejor convergencia presentaron (Tabla 4.6), de acuerdo con el problema planteado y lo recomendado en literatura (Maher, A.R. Sadiq Al-Baghdali, 2011; Tu, Jiyun Yeoh, et al., 2011; Manual de Usuario ANSYS R15, Fluid Dynamics).

Tabla 4.6. Métodos de interpolación utilizados para el análisis.

Término	Factor de relajación	Método de interpolación	Características
Gradiente	-	Green-Gauss Cell Based	Minimizar variación en celdas.
Presión	0.3	PRESTO!	Para flujos con velocidades rotatorias y dominios curvos.
Momentum	0.7	Second Order Upwind	Alto grado de precisión en las caras de cada celda (elemento).
Energía cinética de turbulencia	0.8	QUICK	Para flujos rotatorios y con malla hexaédrica dominante
Tasa de disipación de turbulencia	0.8	QUICK	Para flujos rotatorios y con malla hexaédrica dominante
Energía	1.0	Second Order Upwind	Alto grado de precisión en las caras de cada celda (elemento).

Una vez establecido lo anterior dentro del software ANSYS-FLUENT para el tanque a escala, se obtuvieron los resultados que se describen en el capítulo de resultados.

4.3 Tanque de cultivo caso de estudio “El Zarco”

Una vez que se validaron las ecuaciones, modelos y esquemas numéricos de solución del software mediante la simulación del tanque a escala descrito por Flores y López (2012), se procedió a simular el tanque de cultivo caso de estudio “El Zarco”. Para ello, se siguió el procedimiento similar al desarrollado en la etapa de validación. Este procedimiento consistió en la identificación de los parámetros físico-hidráulicos del tanque caso de estudio “El Zarco”, planteamiento de la geometría y dominio a modelar, selección de la malla y establecimiento de las ecuaciones, modelos y esquemas numéricos de solución.

Es importante mencionar, que para la simulación del tanque a escala real “El Zarco” se establecieron los mismos parámetros de solución validados en el tanque a escala (ecuaciones, modelo de turbulencia y esquemas numéricos de solución), ya que son aplicables independientemente de las dimensiones del modelo a simular. Sin embargo, para el caso de la malla se tuvo especial cuidado ya que esta etapa es directamente dependiente de la geometría a modelar.

4.3.1 Características físico-hidráulicas del tanque

El sistema de recirculación de acuicultura (SRA) ubicado en El Zarco (Estado de México), cuenta con un tren de tratamiento a base de un filtro percolador y un filtro de arena para el reacondicionamiento del agua. El tanque de cultivo es de geometría circular construido con concreto hidráulico cuyas dimensiones son las siguientes: 6 m de diámetro, 1.20 m de altura en la parte más profunda y fondo con pendiente de 15 % de la pared exterior hacia el centro del tanque. El sistema de salida es mediante un sedimentador de alta tasa (tipo hidrociclón) de 1.6 m de diámetro ubicado en el centro del tanque. El agua del tanque entra a la zona del sedimentador por la parte inferior de éste a través de una rejilla perimetral de 0.17 m de altura. En la Tabla 4.7 se presentan los parámetros hidráulicos del tanque de recirculación y del sedimentador, obtenidos por Tenorio (2014) y utilizados como punto de partida en esta investigación.

Tabla 4.7. Parámetros hidráulicos del tanque y del sedimentador “El Zarco” (Tenorio, 2014)

Parámetros	Valor
Caudal de entrada (Q)	7 L/s = 25.2 m ³ /h
Volumen del tanque (V)	25 m ³
Área del sedimentador (A)	2.01 m ²
Carga hidráulica superficial (sedimentador)	12.53 m ³ /m ² d
Velocidad media del flujo (sedimentador)	4.46x10 ⁻³ m/s
Velocidad longitudinal máxima (tanque)	10.4 cm/s

4.3.2 Modelo geométrico del tanque de acuicultura caso de estudio “El Zarco”

Se realizaron visitas de campo al centro acuícola “El Zarco”, ubicado en la zona de La Marquesa, en el Estado de México. En este centro se encuentra un Sistema de Recirculación Acuícola, el cual consta de un tren de tratamiento para el agua recirculada y un tanque de cultivo (Ilustración 2.5). El tanque de cultivo es de geometría circular con entrada de flujo a base de trenes de difusores en posición vertical y horizontal, sumergidos en el flujo. La salida del agua es mediante un sistema de remoción de sólidos tipo hidrociclón (sedimentador de alta tasa). Este sistema consta de dos tubos concéntricos ubicados en el centro del tanque. El tubo exterior tiene ranuras perimetrales en la parte inferior por donde entra el flujo a una zona de baja velocidad. Este flujo asciende hasta alcanzar la altura del tubo interior el cual funge como

salida del tanque. En la parte inferior de estos tubos se ubica un cono truncado que sirve como trampa de sedimentos.

Actualmente el SRA “El Zarco” no se encuentra en operación por motivos de mantenimiento, lo que facilita la obtención de datos geométricos para realizar el modelo en 3D. La Tabla 4.8 muestra las características geométricas del tanque y sus componentes.

Mediante el uso del software SolidWorks, se realizó el modelo en 3D virtual del tanque con dimensiones reales (escala 1:1). La Ilustración 4.9 muestra el croquis y las dimensiones del tanque. La Ilustración 4.10 muestra el modelo en 3D del tanque.

Tabla 4.8. Datos geométricos del tanque “El Zarco”.

Elemento	Dimensión	Descripción
Tanque circular	Diámetro = 6 m	-
Tubo exterior del hidrociclón	Diámetro = 1.6 m	Con 5 ranuras perimetrales (rejillas) separadas a 2.54cm y con altura de 17 cm
Tubo interior del hidrociclón	Diámetro = 0.20 m (8")	Altura (tirante) = 1.1 m en la parte más profunda del tanque (cercana al hidrociclón exterior); 0.9 m en la parte menos profunda (cercana a la pared exterior del tanque)
Pendiente del fondo del tanque	15 %	-
Difusores	Diámetro = ½"	2 arreglos equidistantes de 6 difusores horizontales y 3 verticales

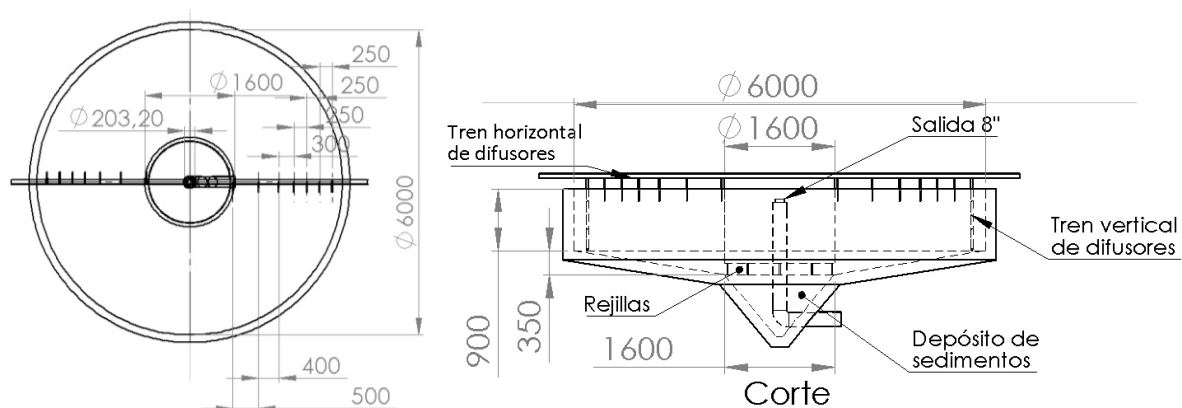


Ilustración 4.9. Croquis del Tanque de recirculación “El Zarco”; unidades en milímetros (mm).

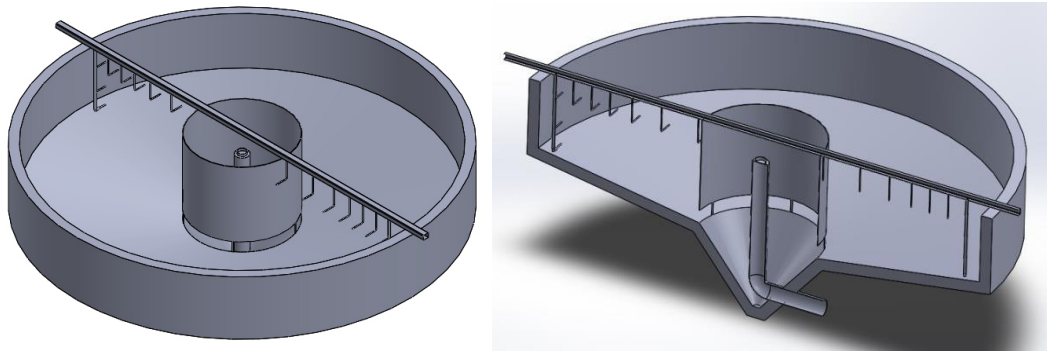


Ilustración 4.10. Modelo 3D del Tanque de recirculación “El Zarco”.

4.3.3 Modelación y simulación del tanque de cultivo en condiciones actuales

En el presente apartado se describe el procedimiento que se realizó para llevar a cabo la modelación y simulación del tanque de cultivo caso de estudio “El Zarco” en las condiciones actuales de operación. Las etapas de la modelación y simulación son similares a las realizadas en el tanque de cultivo a escala (etapa de validación), sin embargo, en la etapa de mallado existen diferencias significativas relacionadas principalmente a las dimensiones del tanque caso de estudio “El Zarco” en comparación con el modelo a escala. Por ello, se tuvo especial cuidado en cumplir con una buena calidad de malla para el tanque debido a las dimensiones del dominio.

4.3.3.1 Definición de la geometría del tanque

Una vez que se obtuvo el modelo geométrico del tanque y sus componentes, se procedió a utilizar la herramienta DesignModeler de ANSYS-Workbench. Con este módulo de modelación geométrica, se extrajo el volumen del fluido confinado dentro de sólido del tanque. Así, el volumen de fluido se convirtió en el dominio a simular. La Ilustración 4.11 muestra el volumen de agua confinado en el tanque.

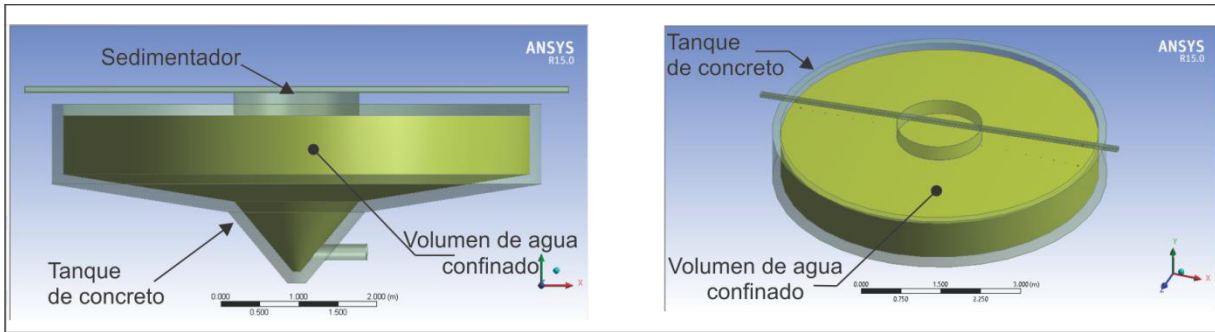


Ilustración 4.11. Modelo 3D del Tanque y volumen de agua confinado.

4.3.3.2 Proceso de mallado

Teniendo el volumen de agua correspondiente al dominio a modelar, se procedió a seleccionar y generar la malla cuyos elementos tuvieron un ajuste idóneo a la geometría del dominio. La malla se creó con elementos en su mayoría hexaédricos mediante el método de ensamblaje *CutCell* seleccionado dentro del módulo ANSYS-Meshing. Se generaron un total de **3,054,764 elementos** volumétricos y **3,360,128 nodos** que conforman la malla del dominio. Así mismo, la calidad de la malla presenta los parámetros mostrados en la Tabla 4.9.

La Ilustración 4.12 muestra la gráfica correspondiente al número de elementos de la malla y su calidad, resaltando que 2, 900,000 elementos (94.93 % del total) tienen un valor de calidad entre 0.7 y 0.95 (Calidad “Muy Buena-Excelente”). Aproximadamente 150,000 de elementos restantes (5.07% del total) tienen una calidad aceptable de malla.

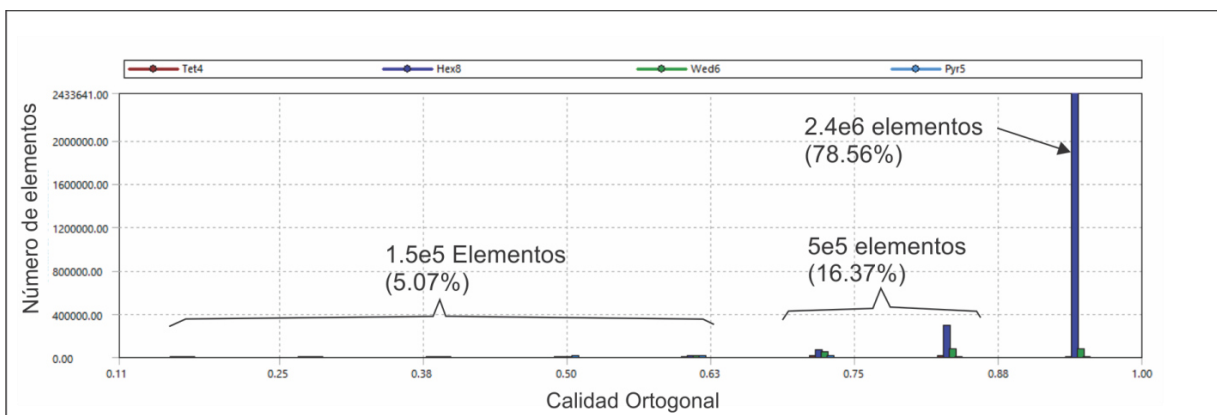


Ilustración 4.12. Gráfica de barras: Número de elementos vs. Calidad Ortogonal

Tabla 4.9. Parámetros de calidad de malla del tanque “El Zarco”

Parámetro de Calidad Ortogonal	Valor	Calidad	No. aproximado de elementos
Mínima	0.1001	Malla aceptable	5000
Media	0.94	Muy buena malla	3,049,764
Máxima	0.99	Excelente malla	

Aunado a la calidad de la malla, la Ilustración 4.13 muestra la geometría de la malla, donde se aprecia el comportamiento de los elementos que la conforman. La malla tiene un **tamaño mínimo de elementos de 0.01m** y un **tamaño máximo de 0.03m**. Esto garantiza que la transición entre elementos es suave y que existe un buen ajuste de los elementos a la geometría del sólido. Es importante mencionar que se realizó un refinamiento mayor en las zonas de interés como la entrada y salida del flujo y la zona de las rejillas. Esto con la finalidad de garantizar la correcta estimación del comportamiento del flujo en dichas zonas donde es más notable la presencia de fenómenos de turbulencia.

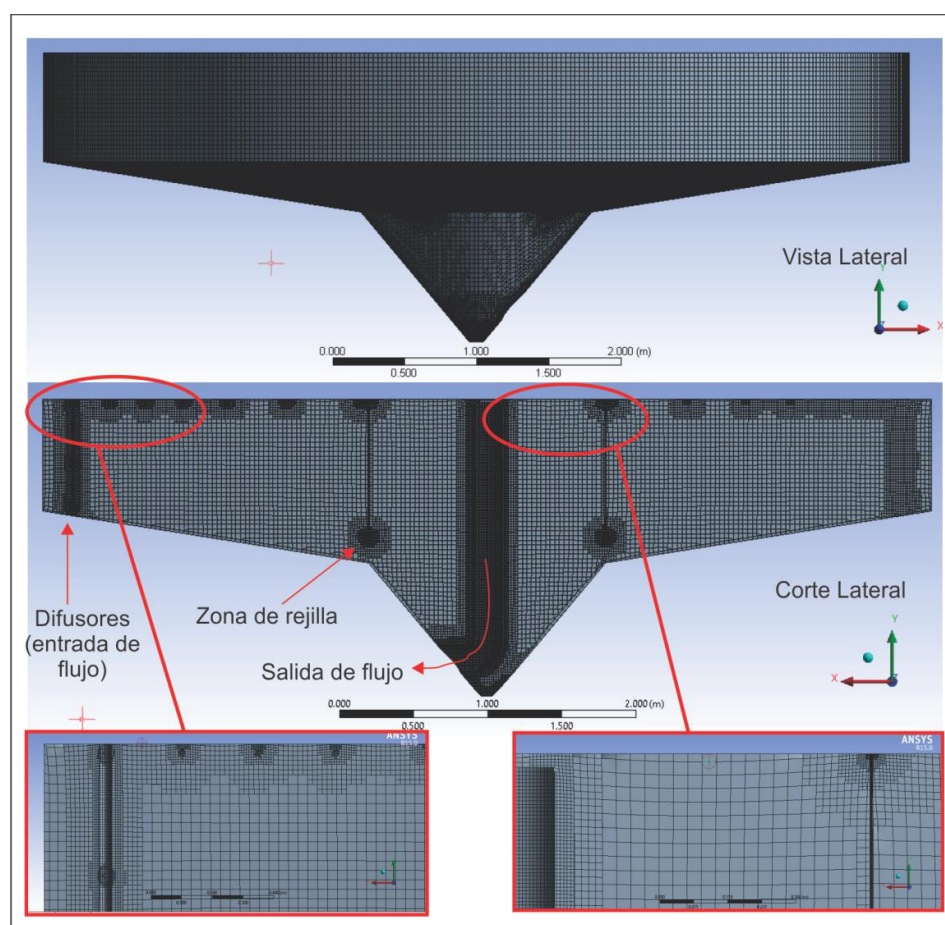


Ilustración 4.13. Detalle de malla del tanque “El Zarco”

Una vez que se creó la malla con la calidad idónea que garantiza una convergencia satisfactoria en los resultados, se procedió a establecer los parámetros para la simulación en ANSYS-FLUENT.

4.3.3.3 Establecimiento de modelos y ecuaciones

Como se describió anteriormente, las ecuaciones y modelos establecidos en ANSYS-FLUENT para simular el tanque caso de estudio “El Zarco” fueron los mismos que se aplicaron a la simulación del tanque a escala de Flores y López (2012) en la etapa de validación del software. Así, los modelos y ecuaciones seleccionados se muestran en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10. Establecimiento de ecuaciones y modelos para simulación del tanque “El Zarco”

Esquema de solución	Pressure-Based Solver - (Esquema de solución basado en presión)			
Estado del flujo	Estacionario (No transitorio)-sin variación temporal de caudal y tirante			
Propiedades del agua	Densidad	998.2	Kg/m^3	
	Calor específico	4182	j/kg-k	
	Conductividad térmica	0.6	w/m-k	
	Viscosidad dinámica	0.001003	Kg/m-s	
Ecuaciones y modelos bajo el esquema RANS	-Ecuación de continuidad -Ecuaciones de momentum -Modelo de turbulencia k- ϵ			

4.3.3.4 Esquemas numéricos de solución

En la etapa de validación se demostró que los esquemas numéricos de solución y los respectivos factores de relajación tuvieron una muy buena respuesta en cuanto a la solución de las ecuaciones y por lo tanto en la convergencia de las mismas. Así, para el caso de la simulación del tanque caso de estudio “El Zarco” se tomaron en cuenta los mismos parámetros, garantizando la óptima convergencia en los resultados. La Tabla 4.11 muestra los métodos de interpolación para los términos de cada ecuación, aplicados a la simulación del tanque.

Tabla 4.11. Métodos de interpolación seleccionados para la simulación del tanque “El Zarco”

Término	Factor de relajación	Método de interpolación	Características
Gradiente	-	Green-Gauss Cell Based	Minimizar variación en celdas.
Presión	0.3	PRESTO!	Para flujos con velocidades rotatorias y dominios curvos.
Momentum	0.7	Second Order Upwind	Alto grado de precisión en las caras de cada celda (elemento).
Energía cinética de turbulencia	0.8	QUICK	Para flujos rotatorios y con malla hexaédrica dominante
Tasa de disipación de turbulencia	0.8	QUICK	Para flujos rotatorios y con malla hexaédrica dominante
Energía	1.0	Second Order Upwind	Alto grado de precisión en las caras de cada celda (elemento).

4.3.3.5 Simulación del tanque “El Zarco” en condiciones actuales

En este apartado se describe el procedimiento que se siguió para simular el comportamiento del flujo en el tanque de cultivo caso de estudio “El Zarco” en condiciones actuales de operación, es decir, bajo la geometría y configuración de sus componentes instalados. Para ello, se utilizaron los datos descritos en Tenorio (2014) y posteriormente se plantearon las condiciones de frontera, iniciales y de salida en el modelo de simulación de acuerdo a la validación realizada.

Para las condiciones iniciales, se consideró flujo estacionario con un nivel de agua constante dentro del tanque. Las condiciones de entrada fueron establecidas como entradas de velocidad en cada difusor, partiendo de lo descrito en el Capítulo 2.

Partiendo de lo descrito por Tenorio (2014), quien reporta un tamaño máximo de **pez de 20cm de longitud**. Con base en lo mencionado en el Capítulo 2 y en pruebas preliminares, se seleccionó el criterio de Summerfelt (2004) y Losordo & Westers (1994). Así, la condición inicial de entrada de velocidad en cada difusor se calculó aplicando la ecuación 2.1 y 2.2, teniendo:

$$V_{tanque} = 10 \text{ cm/s}$$

con velocidad máxima:

$$V_{MD} = 35 \text{ cm/s}$$

Y con la recomendación de Labatut et al., (2006), ecuación 2.4:

$$v_{orif} = 257 \text{ cm/s}$$

Este valor de velocidad se asignó como condición frontera de cada difusor del tanque.

Por otro lado, para la condición de salida en el tubo interior del sedimentador se asignó la condición a superficie libre es decir a presión atmosférica. Sin embargo, debido al caudal que se tiene, fue necesario calcular la carga necesaria sobre la arista del tubo, considerando un vertedor circular o un SpillWay/GloryHole, como lo muestra la Ilustración 4.14. Esto se tomó en cuenta al generar el dominio del fluido, para poder asignar la condición de salida al área proyectada por la carga hidráulica de vertido en el tubo.

De acuerdo con el Hydraulic Design Criteria de la U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, el criterio para estimar la carga sobre un vertedor circular es:

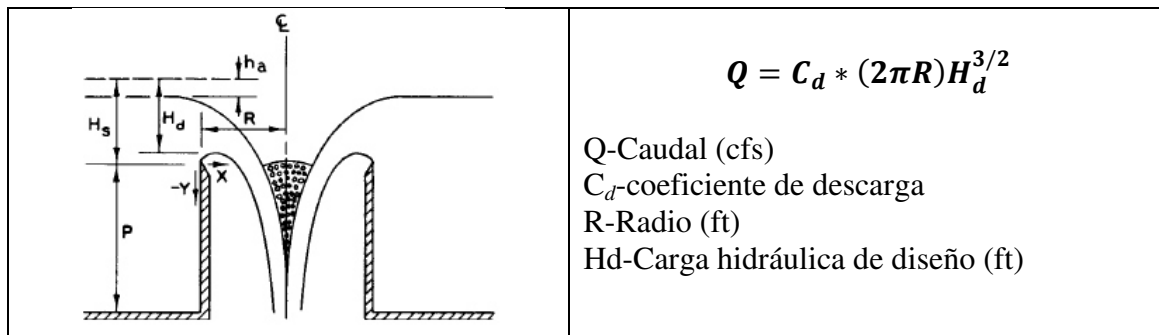


Ilustración 4.14. Cálculo de la carga de vertido sobre perímetro circular (Hydraulic Design Criteria)

Para este caso, se tiene un diámetro de 0.2032 m (0.67 ft), un caudal de salida de aproximadamente 7 lps (0.247 cfs). El coeficiente $C = 3.75$ se obtuvo de la gráfica de Wegner (1956) contenida en el Hydraulic Design Chart 140-1/6. Así, la carga de vertido es:

$$H_d = 0.10 \text{ ft} = 3.03 \text{ cm}$$

Este valor se estableció como la altura de vertido en el tubo de salida del sedimentador (Ilustración 4.15), para que en el área proyectada por dicha altura en todo el perímetro le fuese asignada la condición de salida de flujo.

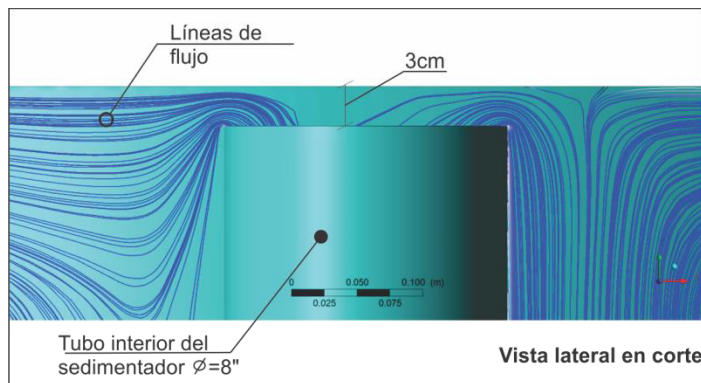


Ilustración 4.15. Vista en corte de salida del flujo a través de tubo interior de sedimentador

Así, en la Tabla 4.12 se muestran las condiciones de entrada y salida planteadas para el tanque caso de estudio “El Zarco”, bajo las condiciones actuales de operación. Posteriormente se procedió a simular el flujo dentro del tanque y su comportamiento dentro del sedimentador. Los resultados arrojados por el software se describen en el apartado correspondiente. Se muestran campos y vectores de velocidad del flujo, líneas de trayectorias, contornos de turbulencia, etc.

Tabla 4.12. Condiciones de frontera para tanque caso de estudio “El Zarco”

Escenario	Elemento	Zona	Condición	Valor	Observaciones
Operación Actual del Tanque	Entrada	Área transversal de los difusores	Entrada de velocidad	257 (cm/s)	-
	Salida	Pared interna de hidrociclón interior	Salida de flujo a presión atmosférica	Caudal calculado con el software	Con carga de vertido de 3cm
*El comportamiento del flujo se supuso estacionario (No transitorio), por lo que el nivel de agua dentro del tanque se mantiene constante, al igual que la entrada y salida de flujo, a través del tiempo.					

4.4 Simulación de escenarios de operación del tanque

En esta etapa se muestran los diversos escenarios de operación del tanque caso de estudio “El Zarco”, planteados con base en los resultados observados en la simulación del tanque en condiciones actuales de operación. Además, con lo descrito en el protocolo del presente trabajo, los principales elementos del tanque a modificar son: la forma y distribución de las rejillas del sedimentador y el diámetro del mismo. Esto para lograr mejorar el comportamiento del flujo dentro del tanque y del sedimentador, según lo recomendado en literatura.

4.4.1 Planteamiento de escenarios de operación del tanque

Para el planteamiento de los escenarios de operación del tanque se tomó en cuenta principalmente la forma y distribución de las rejillas del sedimentador. Flores y López (2012) demostraron que el comportamiento del flujo dentro del tanque (principalmente cercano a las rejillas) y el flujo dentro del sedimentador está directamente relacionado con la forma y distribución de dichas rejillas. Sin embargo, debido al tipo de salida y sedimentador que presenta el tanque en estudio, no existe información suficiente que relacione el comportamiento del flujo dentro del tanque con el tipo y distribución de rejillas del sedimentador tipo hidrociclón (Gallego, 2010; Flores y López, 2012) o sedimentador de alta tasa (Tenorio, 2014). Por ello, se propuso relacionar la altura máxima de las rejillas con el diámetro del tanque (**D**) y la altura del agua (**h**).

Por otro lado, diversos autores proponen valores de relación entre diámetro de tanque de cultivo (**D**) y la altura del agua en el tanque (**h**). Dichos autores concuerdan con la idea de que la relación **D/h** está directamente relacionada con: el costo del espacio utilizado; la carga hidráulica requerida en el sistema; la densidad de biomasa dentro del tanque de cultivo y la especie del pez a cultivar. Burrows & Chenoweth (1955); Chenoweth et al., (1973) y Larmoyeux et al., (1973) proponen valores de $D/h=5:1$ hasta $10:1$; Summerfelt (2004) propone valores $D/h=4:1$ hasta $4.8:1$; Gallego (2010) y Flores y López (2012) reportan resultados satisfactorios con valores $D/h=3:1$. Por ello, con base en las recomendaciones de los autores, se propusieron diversos escenarios de operación del tanque variando la forma y distribución de rejillas así como el diámetro del sedimentador.

4.4.1.1 Variación de rejilla del sedimentador

Como se mencionó, diversos autores han propuesto valores que relacionan el diámetro del tanque de cultivo (para tanques circulares) y la altura de agua en el tanque. Las relaciones recomendadas se encuentran dentro de un rango $D/h=3:1$ a $D/h=10:1$.

Para el caso de estudio “El Zarco” se tiene un diámetro del tanque $D=6\text{ m}$. La altura de agua mínima es de $h=0.9\text{ m}$ y máxima de 1.25 m (Tenorio, 2014). Por lo tanto, según los valores de referencia se tiene una relación promedio de $D/h\approx 6:1$. Por otro lado, debido a que no existen valores de referencia que delimiten la altura máxima de las rejillas del sedimentador, para el presente trabajo se planteó mantener la altura actual de las rejillas $h_r = 0.17\text{ m}$. Posteriormente, tomando como base este valor, se propusieron tres anchos de rejilla (b_r) en función de la altura h_r . Además, para cada ancho de rejilla se propusieron tres diferentes separaciones de rejillas (S_r) de igual forma en función de h_r . La Ilustración 4.16 muestra la configuración de la geometría de las rejillas, mientras que la Tabla 4.13 muestra los diferentes escenarios de operación variando el arreglo de las rejillas del sedimentador.

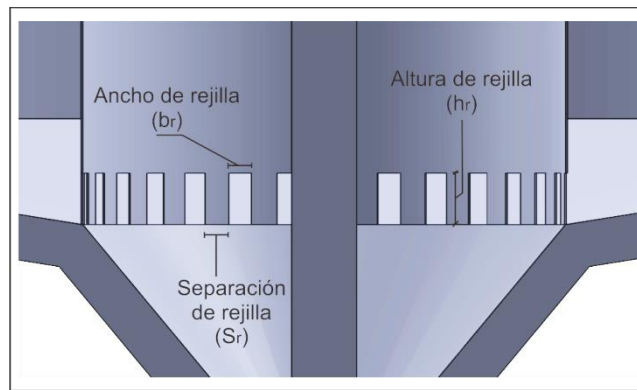


Ilustración 4.16. Geometría general de las rejillas del sedimentador (Vista en corte).

Tabla 4.13. Escenarios propuestos con variación del arreglo de rejillas del sedimentador

Altura de rejilla	Ancho b_r		Separación S_r		# de rejillas	Escenario
$h_r = 17\text{ cm}$	$0.5h_r$	8.5cm	$0.5h_r$	8.5cm	30	E1
			$1.0h_r$	17cm	20	E2
			$2.0h_r$	34cm	12	E3
	$1.0h_r$	17cm	$0.5h_r$	8.5cm	20	E4
			$1.0h_r$	17cm	15	E5
			$2.0h_r$	34cm	10	E6
	$2.0h_r$	34cm	$0.5h_r$	8.5cm	12	E7
			$1.0h_r$	17cm	10	E8
			$2.0h_r$	34cm	7	E9

La Ilustración 4.17 muestra de manera gráfica la configuración de las rejillas del sedimentador, resaltando las dimensiones, la separación y el número de rejillas de cada escenario que se simuló.

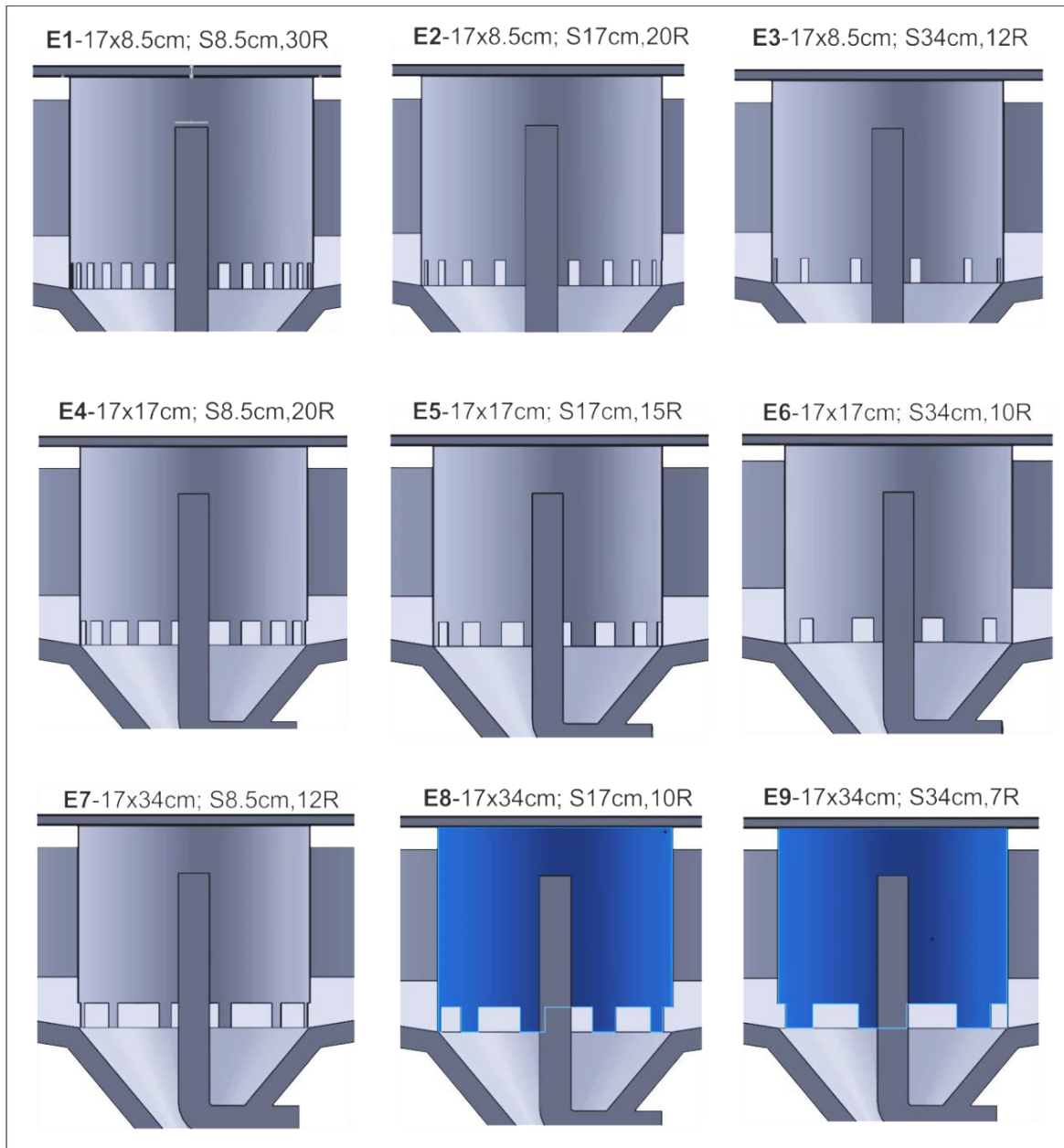


Ilustración 4.17. Variación de las rejillas del sedimentador para cada escenario

Una vez planteados las nueve configuraciones de rejillas del sedimentador, se procedió a simular dichos escenarios con el software ANSYS-FLUENT. Los resultados obtenidos para cada escenario se muestran en el siguiente capítulo. Además, se realizó una comparativa del comportamiento del flujo entre los resultados obtenidos en las nueve simulaciones y los resultados obtenidos en la simulación del comportamiento actual del tanque de cultivo “El Zarco”. Con base en los resultados analizados, se procedió a seleccionar aquellos escenarios

que mejor comportamiento presentaron, tomando en cuenta flujos con menor turbulencia y menor velocidad en el sedimentador. Posteriormente se plantearon modificaciones del diámetro del sedimentador a dichos escenarios, siguiendo la metodología descrita en el apartado siguiente.

4.4.1.2 Variación de diámetro de sedimentador

Posterior a la simulación del tanque bajo distintos arreglos de las rejillas del sedimentador, se procedió a seleccionar tres escenarios cuyo comportamiento del flujo presentó cualidades de homogeneidad del flujo y baja turbulencia. A estos tres escenarios seleccionados se les realizó la variación del diámetro del sedimentador. Esto para analizar el impacto en el comportamiento del flujo bajo distintas condiciones de operación en función de la relación del diámetro del tanque D y del diámetro del sedimentador d .

Como se ha mencionado, para el tipo de sedimentador existente en el tanque de estudio “El Zarco” (sedimentador tipo hidrociclón o de alta tasa) no existen recomendaciones sobre el impacto que tiene el tamaño y forma del sedimentador sobre el flujo. Los estudios más recientes realizados por Tenorio (2014), Flores y López (2012) y Gallego (2010) en tanques de cultivo prototipos y a escala bajo este sistema de sedimentación, contienen información que se tomó en cuenta para proponer los escenarios de operación del tanque, variando el diámetro del sedimentador. La Tabla 4.14 muestra las características del sedimentador de los tanques de cultivo estudiados por los autores mencionados, destacando la relación de diámetros (del tanque y del sedimentador) en cada caso.

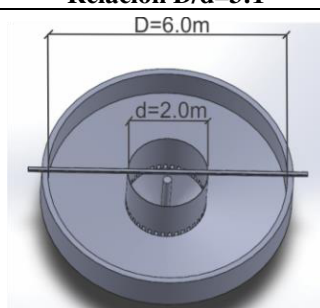
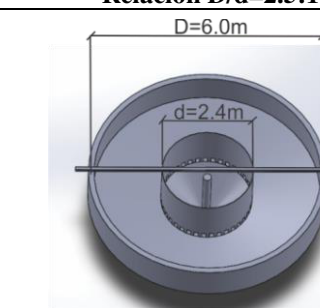
Tabla 4.14. Relación de diámetros D/d de tanques con sedimentador tipo hidrociclón/alta tasa

Autor	Diámetro del tanque (D)	Diámetro del sedimentador (d)	Relación D/d	Observaciones
Tenorio, 2014	6m	1.6m	3.75	Tanque prototipo “El Zarco”, caso de estudio del presente trabajo, con tipo hidrociclón (sedimentador de alta tasa)
Flores y López 2012	1m	0.35m	≈2.85	Tanque modelo a escala, con sedimentador tipo hidrociclón con rejillas
Gallego, 2010	3m	0.85m	≈3.5	Tanque prototipo, sedimentador tipo hidrociclón

Los trabajos realizados por dichos autores describen que los tanques de cultivo bajo estas condiciones de operación, presentaron un comportamiento idóneo para el cultivo de peces, pero con algunas limitantes en cuanto al comportamiento hidráulico del sedimentador.

Sin embargo, las relaciones D/d son muy similares en los tres casos por lo que, estos valores se tomaron en cuenta como base para proponer distintas variaciones de diámetros del tanque de cultivo. Por cuestiones de factibilidad constructiva, se decidió mantener constante el diámetro del tanque ($D= 6 \text{ m}$) y se propusieron dos valores de diámetro del sedimentador d , recordando que el diámetro actual del sedimentador es de 1.6 m. Así, los escenarios propuestos bajo diferentes relaciones D/d se muestran en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15. Relación de diámetros D/d a modelar para escenarios seleccionados

Relación $D/d=3:1$	Relación $D/d=2.5:1$
	
Escenarios a modelar: E1, E2, E4	Escenarios a modelar: E1, E2, E4

Una vez que se plantearon los escenarios de operación del tanque “El Zarco” bajo distintos valores de relación D/d , se procedió a llevar a cabo la simulación en ANSYS-FLUENT.

4.4.2 Simulación de escenarios con ANSYS-FLUENT

La Tabla 4.16 muestra el resumen de los distintos escenarios propuestos para simular. En la primera etapa de simulación se consideró la variación del tamaño y distribución de rejillas del sedimentador, teniendo 9 escenarios. Con base en los resultados obtenidos en la primera etapa de simulación, se seleccionaron tres escenarios con dos distintas relaciones de diámetro del tanque y diámetro del sedimentador, teniendo 6 escenarios modelados en esta etapa, haciendo un total de 15 escenarios modelados.

Además, partiendo del escenario óptimo E1d1 (Ilustración 4.18A) se propuso un escenario adicional E1d1a (Ilustración 4.18B). Este último consistió en suprimir el cono sedimentador que sobresale del tanque, para visualizar el efecto que tiene dicha estructura en el comportamiento del flujo en el tanque, principalmente dentro del sedimentador. La discusión de los resultados se muestra en el siguiente capítulo.

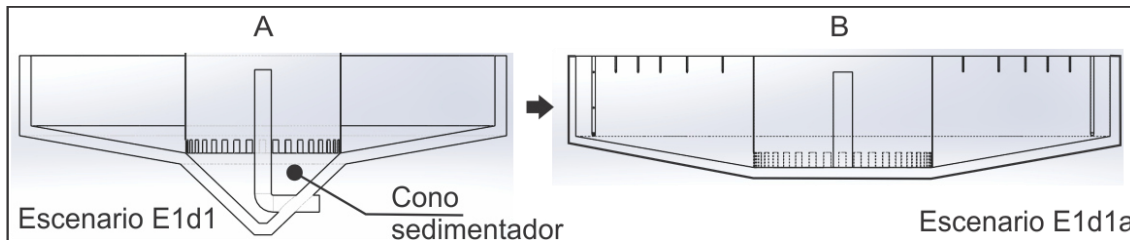


Ilustración 4.18. Esquema del tanque. A) Con cono sedimentador; B) Sin cono sedimentador

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en la etapa de la validación del software. Se muestran los campos y perfiles de velocidad obtenidos en la simulación del tanque de cultivo a escala y su comparación con los resultados que reportan Flores y López (2012).

También se muestran los resultados obtenidos en la simulación del tanque del caso de estudio “El Zarco”, bajo sus condiciones actuales, con base en lo que reporta Tenorio (2014). Finalmente, se hace una comparativa entre dichos resultados y los obtenidos en la simulación de los diferentes escenarios planteados bajo distintas propuestas de configuración de diámetro y rejillas del sedimentador.

5.1 Resultados de la validación

En el presente apartado se muestran los resultados obtenidos en la etapa de validación del software. Se presenta de forma gráfica los campos y perfiles de velocidad resultado de la simulación con CFD del tanque de cultivo a escala utilizado en Flores y López (2012) y se realiza la comparativa con los resultados que dichos autores presentaron en su investigación donde utilizaron la técnica de velocimetría por imágenes de partículas. Los resultados expresan una aproximación muy cercana y fiable que justifica la validez del uso de CFDs al estudio y análisis del comportamiento del flujo en tanques de acuicultura, con fines de optimización y rediseño.

5.1.1 Comparación con resultados descritos por Flores y López (2012)

Con fines de comparación los resultados obtenidos con CFD se muestran en la misma sección de análisis (Ilustración 5.1) que la experimentada en Flores y López (2012) con PIV (Particle Image Velocimetry). Se muestra la comparación de los campos y perfiles de velocidad obtenidos con CFD y experimentalmente con PIV.

Al realizar la simulación del tanque, se revisó la convergencia de los esquemas de solución, para ello se obtuvieron los valores de los residuales para cada término de las ecuaciones de continuidad, momentum y turbulencia (Tabla 5.1). El software ANSYS-FLUENT recomienda, que al alcanzar un valor de 1×10^{-3} en los residuales se tiene una convergencia satisfactoria. La Ilustración 5.2 muestra el comportamiento de los residuales para cada término de las ecuaciones. Se realizaron diversas corridas variando el número de iteraciones hasta alcanzar la convergencia, se analizó hasta 1500 iteraciones. Sin embargo, no se presentaron cambios significativos a partir de las 500 iteraciones. Puede observarse que en 500 iteraciones los residuales tienden a disminuir con pequeñas variaciones entre iteraciones y se logró alcanzar un valor menor a 1×10^{-3} en todos los parámetros, excepto por la ecuación de continuidad.

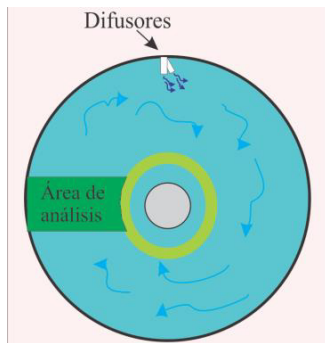


Ilustración 5.1. Área de visualización de campos y perfiles de velocidad (Flores y López, 2012)

Tabla 5.1. Valores de los residuales para cada ecuación.

Residuales	
Número de iter	500
Eq.Continuidad	2.59E-01
x-velocity	6.04E-04
y-velocity	3.24E-04
z-velocity	6.05E-04
<i>k</i>	4.68E-03
épsilon	6.30E-03

Si bien, el valor del residual del término “Continuidad” no alcanza esta tolerancia, se acepta dicho resultado ya que realizando un balance de flujo másico (resultado de la simulación) se tiene un equilibrio en el flujo de entrada (*in*) con el de salida (*outlet*) garantizando que existe continuidad en el sistema, (ANSYS User Manual, 2014) (Tabla 5.2).

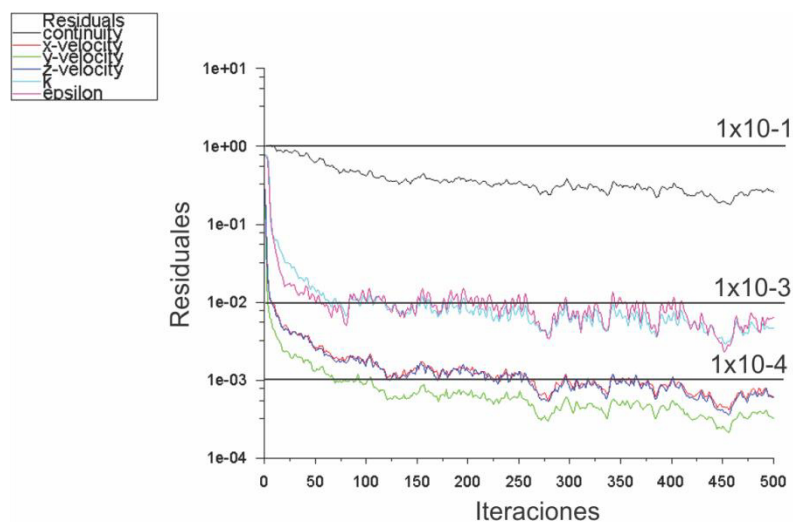


Ilustración 5.2. Gráfica de los residuales correspondientes a las soluciones de las ecuaciones.

Comparando el caudal calculado en la simulación con el descrito en Flores y López (2012) puede observarse que son similares, la variación en el caso 1 es únicamente de 0.96 lpm y en el caso 2 es prácticamente el mismo (9 lpm). En el caso 3 donde las condiciones de entrada corresponden a un flujo másico con presión hidrostática, se obtuvo el balance de flujo másico satisfactorio (Tabla 5.3), por lo que las velocidades calculadas son correctas con variaciones de 4% hasta 17.9%. Este porcentaje de error corresponde a las velocidades calculadas en la simulación y las descritas por Flores y López (2012), y se debe principalmente a que el software considera la influencia de la velocidad del flujo del tanque en la velocidad de salida en los difusores.

La variación de los resultados obtenidos en los dos primeros casos fue de 10% mayor en cuanto al caudal calculado por el software y el presentado por dichos autores; en la simulación óptima (caso 2) fue menor a 1%. Los perfiles de velocidad presentan una variación máxima de velocidad de 1cm/s en algunos puntos, mientras que los contornos de velocidad difieren con valores no mayores de 2 cm/s. Los porcentajes de error son aceptables ya que la obtención de velocidades entre ambos trabajos es diferente, uno fue experimental y otro teórico-numérico. Con ello se asegura que los parámetros establecidos en el software para los 3 casos, son válidos para la posterior simulación del tanque de acuicultura caso de estudio “El Zarco”.

Tabla 5.2. Balance de flujo másico calculado en la simulación

Caudal						Observaciones
		Caso 1		Caso 2		
	Condición	\dot{m} (kg/s)	Q (lpm)	\dot{m} (kg/s)	Q (lpm)	
Difusor 1	entrada-in1	0.031	1.92	0.028	1.69	
Difusor 2	entrada-in2	0.033	2.00	0.029	1.79	
Difusor 3	entrada-in3	0.032	1.97	0.029	1.79	
Difusor 4	entrada-in4	0.034	2.09	0.031	1.91	
Difusor 5	entrada-in5	0.032	1.96	0.030	1.80	
Salida	outlet	-0.165	-9.96	-0.149	-9.006	Comparado con 9 lpm , (Flores y López, 2012), error del 10% y 1%, respectivamente.
	suma	2.61E-08		-2.7e-08		

Tabla 5.3. Variación de velocidades calculadas vs. experimentales para el Caso 3

		h_i (cm)	H (cm)	P		Q (lps)	\dot{m} (kg/s)	v_{orif} Calculada (cm/s)	v_{orif} Flores y López (cm/s)	% error
				(kg/cm ²)	(Pa)					
Difusor 1	in1	3.365	122.365	0.122	11999	1.8	0.149	445	465.52	4.61
Difusor 2	in2	9.865	128.865	0.128	12637	1.8	0.149	426	472.68	10.95
Difusor 3	in3	16.365	135.365	0.135	13274	1.8	0.149	432	477.60	10.55
Difusor 4	in4	22.865	141.865	0.141	13912	1.8	0.149	408	481.08	17.91
Difusor 5	in5	29.365	148.365	0.148	14549	1.8	0.149	434	483.16	11.32

En la Ilustración 5.3 y 5.4 se observan los vectores y contornos de velocidad obtenidos mediante la simulación del tanque a escala. El área punteada indica la zona de visualización dentro del tanque analizada por Flores y López (2012), además de las 7 alturas propuestas. La Ilustración 5.5 muestra los contornos de velocidad obtenidos por Flores y López (2012). Puede observarse claramente que los rangos de velocidades del flujo son muy similares, principalmente en la zona central del tanque (entre h_3 y h_6). Los campos de velocidad del flujo obtenidos con CFD describen más a detalle la dirección y magnitud de los vectores, ya que en la simulación se tomó en cuenta la velocidad vertical (v). Así mismo, el software contempla los fenómenos de turbulencia con las ecuaciones $k-\epsilon$ planteadas. Los campos de velocidad obtenidos por Flores y López (2012) fueron obtenidos únicamente en 2D, es decir, sólo tomaron en cuenta las componentes horizontales (tangencial y radial) de la velocidad. A ello se le atribuye la variación entre los resultados de Flores y López (2012) y los obtenidos con CFD, que aunque no son exactos, su comportamiento es muy similar.

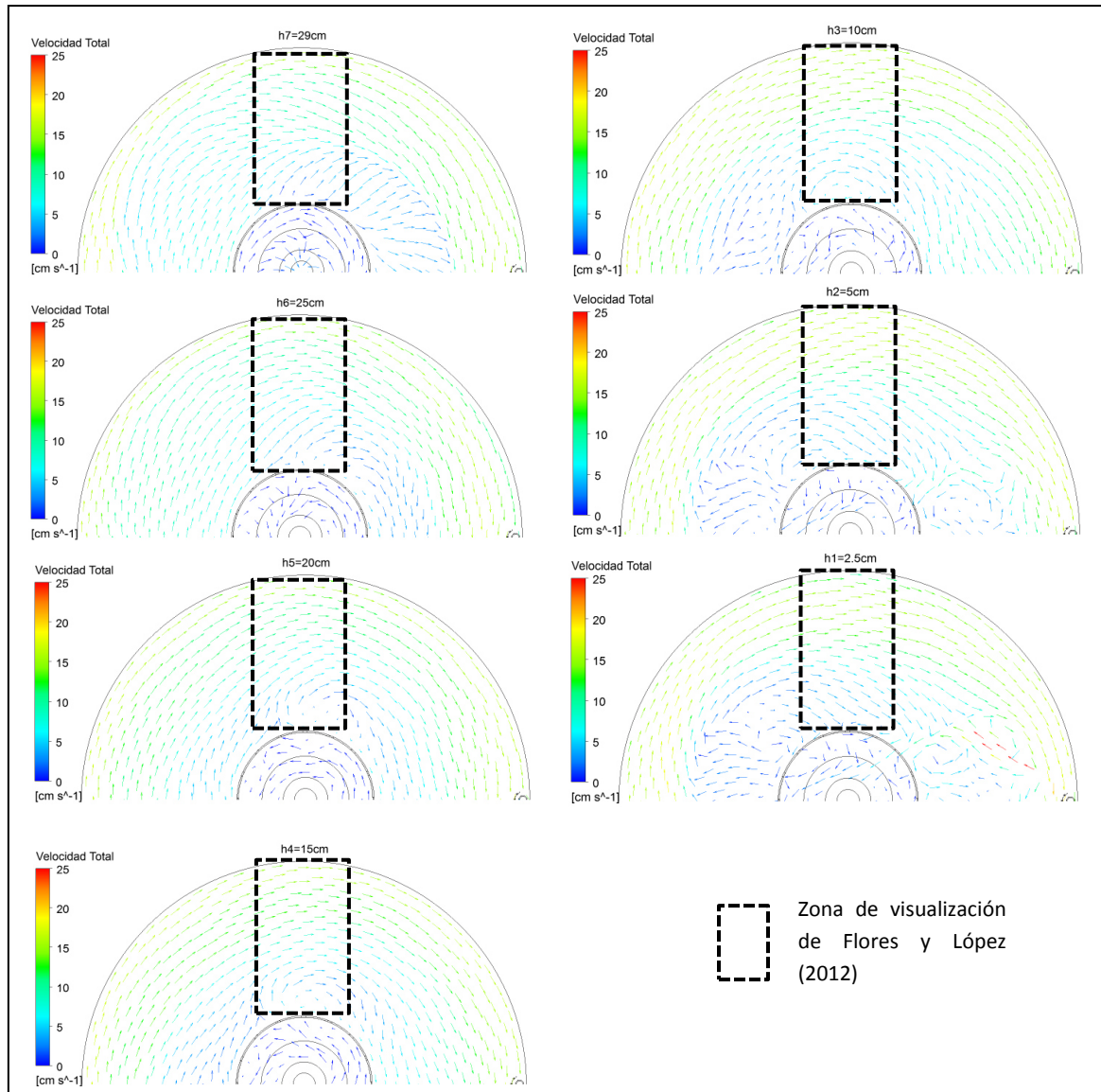


Ilustración 5.3. Vectores de velocidad total del tanque a escala, obtenidos en la simulación.

La Ilustración 5.6 muestra los perfiles verticales de velocidad obtenidos en la simulación del tanque a escala. De igual forma que los vectores y contornos de velocidad, se encuentran en la zona de análisis y las posiciones en x mostradas en los perfiles son en dirección radial (transversal) al flujo. Se muestran un solo perfil ubicado dentro de esta zona de análisis gracias a que el software permite esta opción. Además, se puede ver claramente la forma y tendencia del perfil, donde en toda la zona del tanque el flujo tiende a disminuir de velocidad cuanto más cerca se está del centro de tanque.

Esto comparado con los perfiles obtenidos por Flores y López (2012) es correcto, ya que en la misma zona, los perfiles que reportan tienen casi el mismo valor de velocidad del flujo (Ilustración 5.6). Los perfiles verticales de velocidad obtenidos con CFD son graficados tomando en cuenta únicamente la componente tangencial de la velocidad (dirección del flujo). Esto debido a que Flores y López (2012) reportan sus perfiles de igual manera.

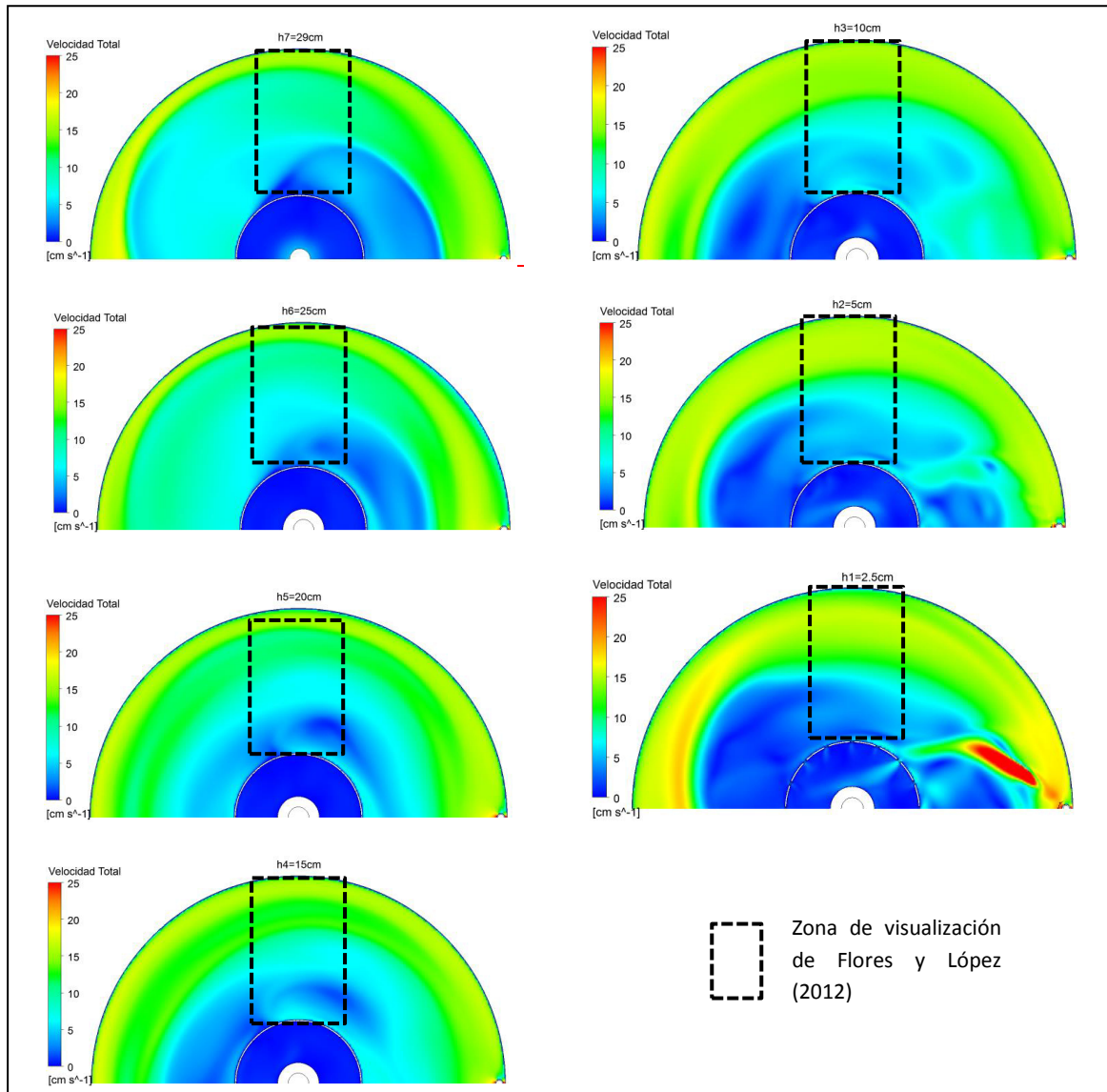


Ilustración 5.4. Contornos de velocidad total del tanque a escala, obtenidos mediante la simulación.

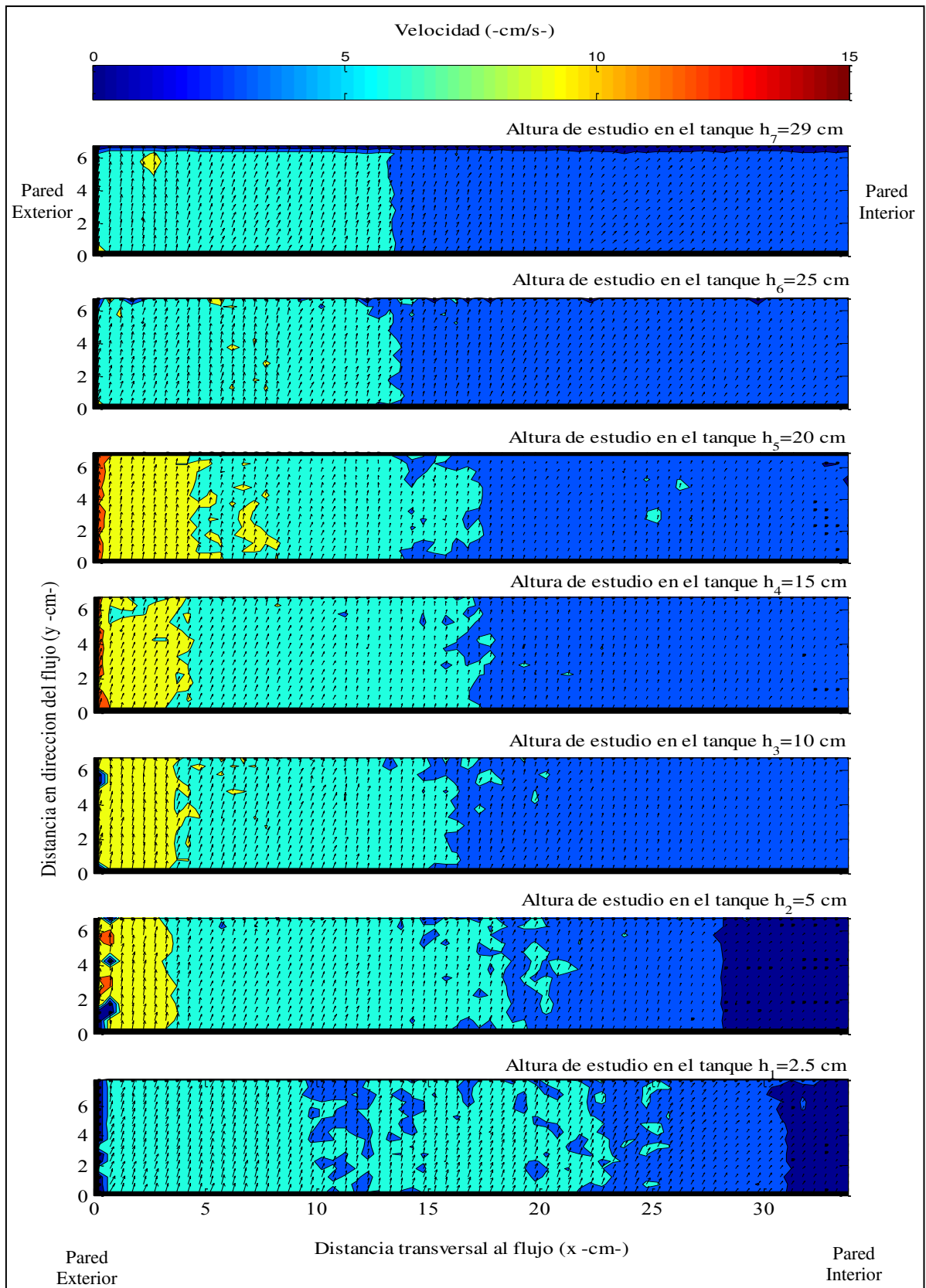


Ilustración 5.5. Campos de velocidad total del tanque a escala, de Flores y López (2012).

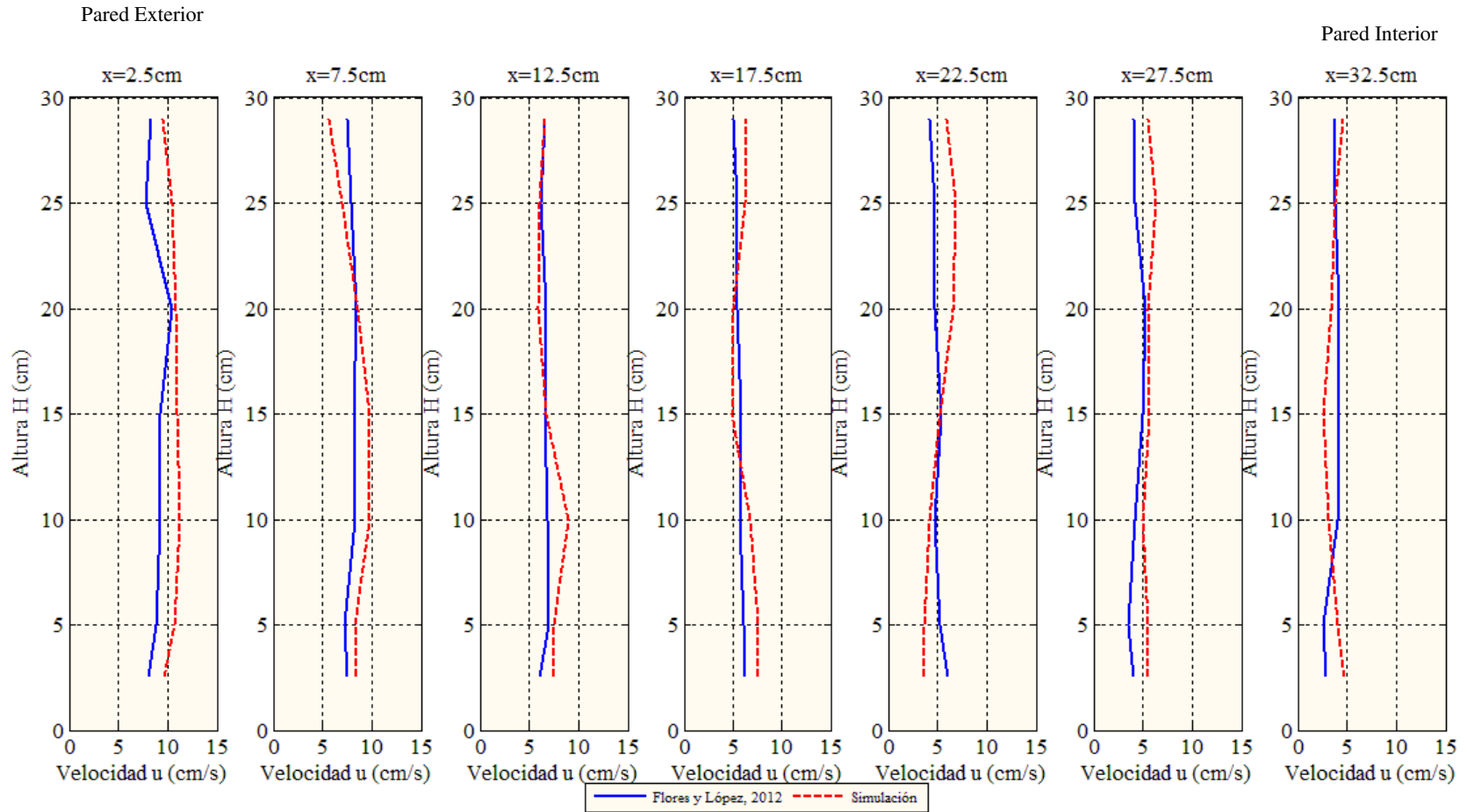


Ilustración 5.6. Perfiles de velocidad tangencial (u) del tanque a escala; comparativa con Flores y López (2012).

Como se observa en la ilustración 5.6, la semejanza entre los resultados obtenidos en la simulación y los obtenidos experimentalmente con la aplicación de la técnica óptica PIV, (Flores y López, 2012) es muy notoria, desde el punto de vista cualitativo. Cuantitativamente, la velocidad del flujo dentro del tanque en ambos casos resultó muy similar tanto en magnitud como en dirección. El error relativo promedio máximo fue de 15% en el perfil correspondiente a $x=12.5$ cm y el error promedio mínimo fue de 7% en los perfiles correspondientes a $x=17.5$ cm y $x=27.5$ cm. Si bien, la simulación es una aproximación teórica, el caso experimental es una aproximación cercana a la realidad. De lo anterior se establece que para el tanque a escala real caso de estudio “El Zarco” se utilizarán los mismos parámetros y ecuaciones para su simulación en ANSYS-FLUENT.

Aunado a los resultados de la simulación del tanque a escala, se pueden visualizar los campos y vectores de velocidad en la sección transversal del tanque. La Ilustración 5.7 muestra el comportamiento del flujo en un corte transversal, donde se observa la tendencia de los vectores de la velocidad dentro del tanque. Con ello, se puede visualizar de manera clara el comportamiento del flujo del tanque y principalmente dentro del sedimentador y así conocer la velocidad de ascenso del flujo hacia la salida, así como la turbulencia que se presenta. Como se muestra en la Ilustración 5.7, se presenta un flujo el cual se canaliza a la zona del sedimentador a través de las rejillas. Sin embargo, el flujo de ascenso dentro del sedimentador presenta un flujo turbulento y no homogéneo, lo que podría perjudicar la sedimentación de las partículas.

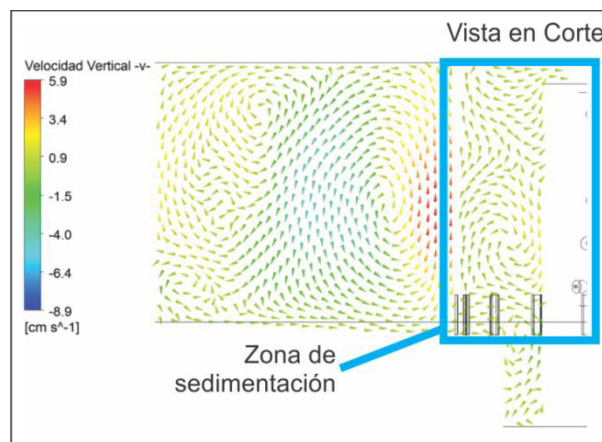


Ilustración 5.7. Vectores de velocidad vertical (v) del tanque a escala.

Con lo anterior, se puede optimizar el diseño del sedimentador para evitar flujos turbulentos que impidan la sedimentación de partículas.

5.2 Resultados del comportamiento actual del tanque caso de estudio “El Zarco”

En este apartado se muestran los resultados de la simulación del tanque caso de estudio “El Zarco”, en las condiciones de operación para el que fue diseñado. Para lograr un entendimiento del comportamiento del flujo tanto en el tanque como en el sedimentador, se muestran gráficos con vectores y contornos de velocidad, líneas de trayectoria y de corriente, así como contornos que muestran la energía cinética de turbulencia. Todo esto se muestra bajo distintas perspectivas visuales y en diferentes áreas de interés dentro del tanque. Las principales zonas de interés son las cercanas a las entradas del flujo (difusores), las cercanas a las rejillas del sedimentador y dentro del sedimentador.

Primeramente, se muestran los resultados numéricos calculados por el software ANSYS-FLUENT, concernientes a la convergencia de los modelos. Como se mencionó anteriormente, el número de iteraciones en donde se observó la inexistencia significativa de variación en los residuales fue de 200. Con dichas iteraciones se logró tener una convergencia satisfactoria para los términos de continuidad, momentum y energía cinética de cada ecuación planteada. En la Ilustración 5.8 se observa la tendencia de los valores residuales, donde para todos los términos de las ecuaciones se tienen valores menores a 1×10^{-3} , los cuales son aceptables según lo recomendado en ANSYS User Manual (2014). Si bien, el término de continuidad no alcanza éste valor de referencia, se acepta como válido ya que no existe variación significativa entre los valores residuales entre una iteración y la subsecuente, es decir, la gráfica presenta un comportamiento casi lineal con tendencia a disminuir gradualmente. Aunado a ello, con las condiciones iniciales y de frontera planteadas, se logró tener un balance de flujo másico satisfactorio (flujo de entrada igual al de salida) con valores similares a los que reportó Tenorio (2014), lo que justifica que el término de continuidad se cumplió en la simulación. En la Tabla 5.4 se muestran los resultados obtenidos en la simulación y su comparación con los reportados por Tenorio (2014).

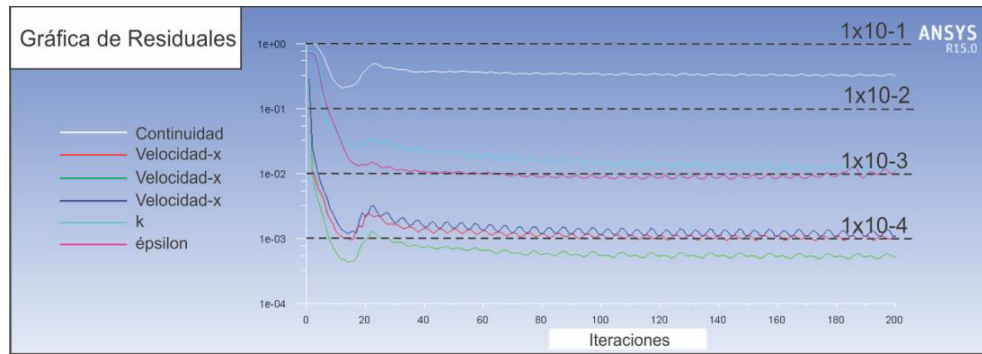


Ilustración 5.8. Gráfica de residuales de la simulación del tanque “El Zarco”

Tabla 5.4. Comparación del caudal en el sistema, calculado vs. experimental

	Q (lps)	Observaciones
Flujo de entrada promedio en cada difusor	0.395	Valores teóricos calculados con el software
Flujo de salida Total	7.11	
Flujo de salida reportado por Tenorio (2014)	7.00	Valor experimental medido en campo

A continuación se muestran los contornos y vectores de velocidad calculados por el software en la simulación correspondiente a las condiciones actuales del tanque, esto para distintas alturas (tirantes) de agua. En la Ilustración 5.9 se indica la referencia a partir de la cual se mide el tirante de agua dentro del tanque para identificar los distintos planos horizontales que muestran las velocidades en diferentes zonas del tanque.

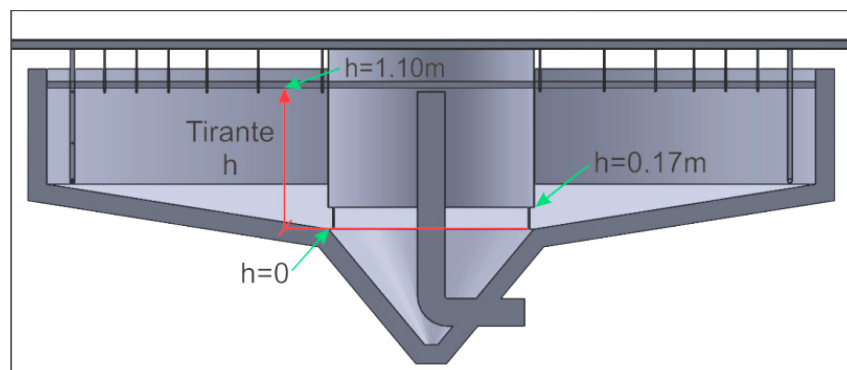


Ilustración 5.9. Referencia de tirantes de agua para el tanque “El Zarco”

La Ilustración 5.10 muestra los vectores y contornos de velocidad del tanque “El Zarco”. Las velocidades mostradas corresponden a la altura del flujo de 0.085m, ubicado a la mitad de las rejillas del sedimentador. Como se observa, el rango de velocidades en dicha zona es de **8 - 25 cm/s**, tanto en el tanque como dentro del sedimentador. De igual manera se puede observar que el comportamiento del flujo no es homogéneo, ya que la distribución de velocidades tiene variaciones significativas tanto en la zona del tanque como en el sedimentador.

Puede notarse que el flujo con mayor velocidad corresponde en su mayoría al flujo del tanque, sin embargo, dentro del sedimentador se tienen velocidades que oscilan entre 17-20 cm/s, lo cual no beneficia a la sedimentación de sólidos. Esta velocidad dentro del sedimentador se atribuye al tipo de rejilla existente, ya que el flujo del tanque tiende a impulsar al flujo dentro del sedimentador en la zona de la rejilla. Si bien, dentro del sedimentador se tiene un flujo con velocidades relativamente bajas de 8 cm/s, esto sólo se presenta en la mitad del área horizontal del sedimentador y a partir del tirante donde ya no hay rejilla, por lo que difícilmente se aprovecha toda el área del sedimentador para lograr una sedimentación natural de sólidos.

Las Ilustraciones 5.11 y 5.12 muestran los vectores y contornos de velocidad correspondientes a las alturas $h= 0.55$ m y $h= 1.05$ m, aproximadamente a la mitad del tirante de agua y cerca de la superficie libre del agua, respectivamente. En la Ilustración 5.11 puede observarse que la velocidad promedio en el tanque a una profundidad $h= 0.55$ m es de aproximadamente 17 cm/s aumentando en zonas perimetrales del tanque hasta 25 - 30 cm/s. Puede observarse que existe una velocidad en el sedimentador de aproximadamente 9 - 15 cm/s, sin embargo, se considera que esta velocidad es similar al flujo en el tanque, lo que no beneficia la sedimentación de sólidos.

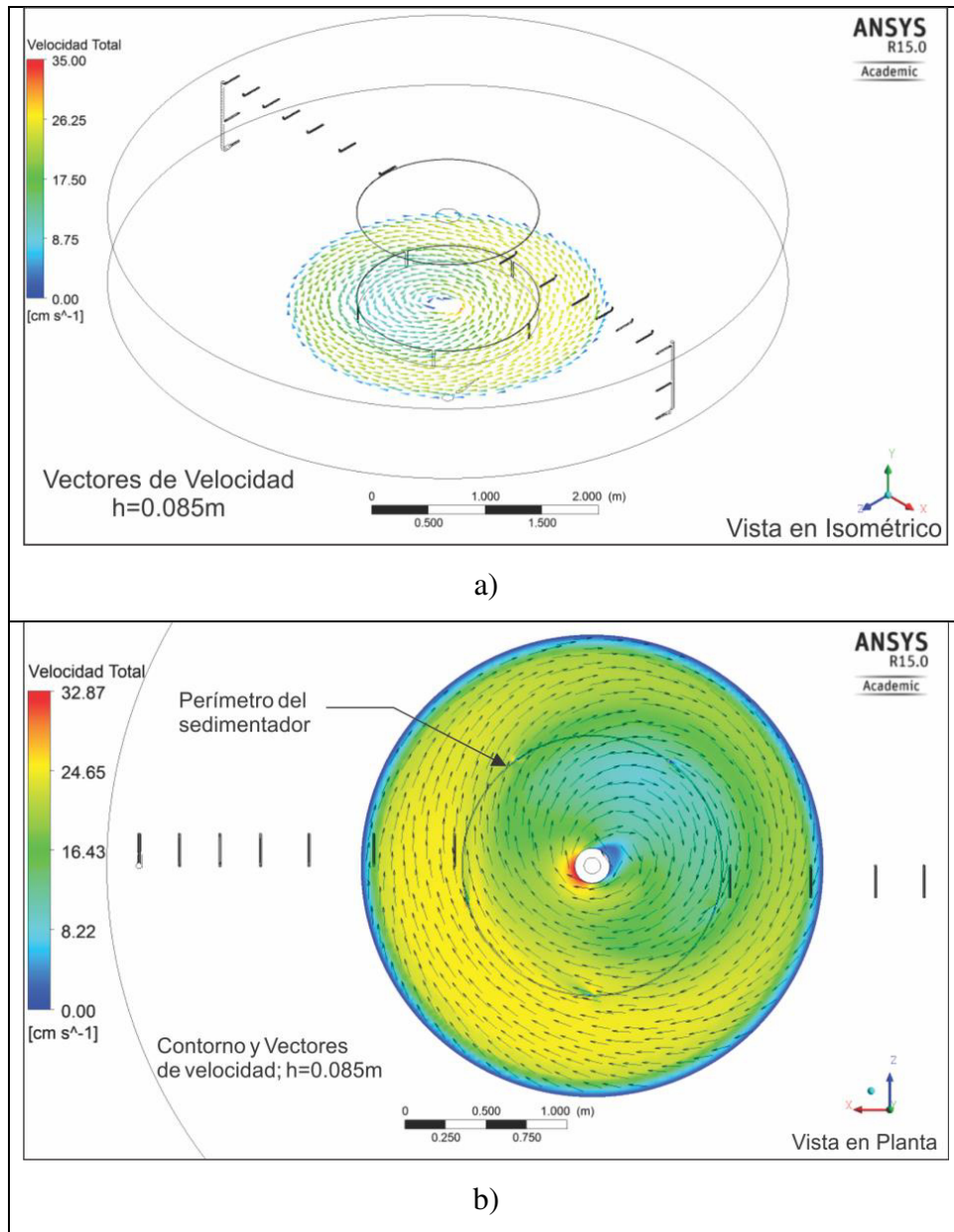


Ilustración 5.10. Vectores y contornos de velocidad escenario E0, h=0.085m; a) vista en isométrico, b) vista en planta.

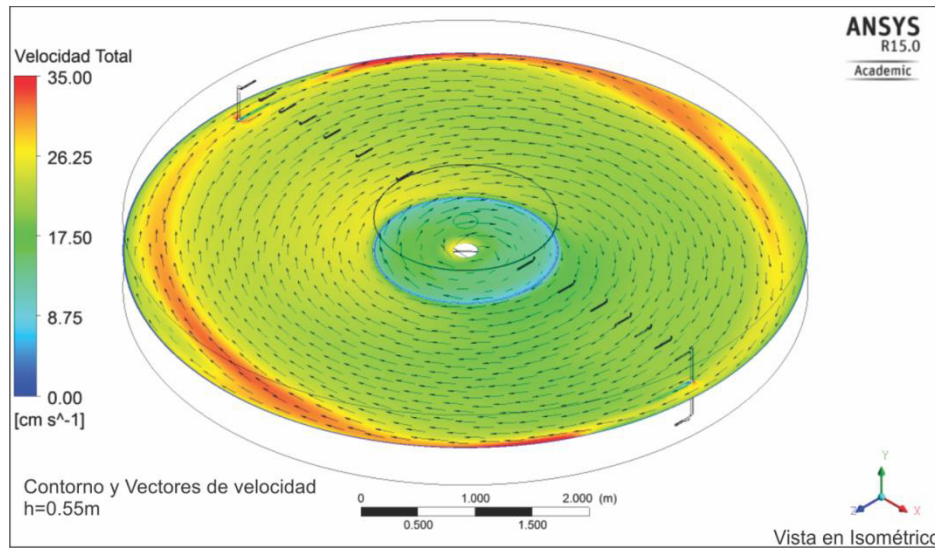


Ilustración 5.11. Vectores y contornos de velocidad, $h=0.55\text{ m}$; vista en isométrico.

La Ilustración 5.12 muestra el efecto que tiene el flujo que sale por los difusores y el impulso que genera en el tanque. Se observa que aunque el flujo cercano a los difusores supera los 35 cm/s, rápidamente se combina con la velocidad que tienen el flujo en el tanque, alcanzando velocidades de 17 - 26 cm/s. Estos valores se consideran correctos ya que la mayor velocidad del flujo se presenta precisamente cercana a la superficie por el efecto que provocan los difusores. De igual manera, se puede observar que el flujo en el sedimentador tiende a aumentar de 8 cm/s hasta 17 cm/s, debido al efecto de succión ocasionado por el vertido en la salida del flujo a través del tubo central del sedimentador.

La Ilustración 5.13 muestra las velocidades en planos transversales del tanque. Un plano está ubicado paralelo a la línea de los difusores de entrada y otro plano en posición perpendicular. Esto permite observar el comportamiento del flujo en todo el dominio del tanque.

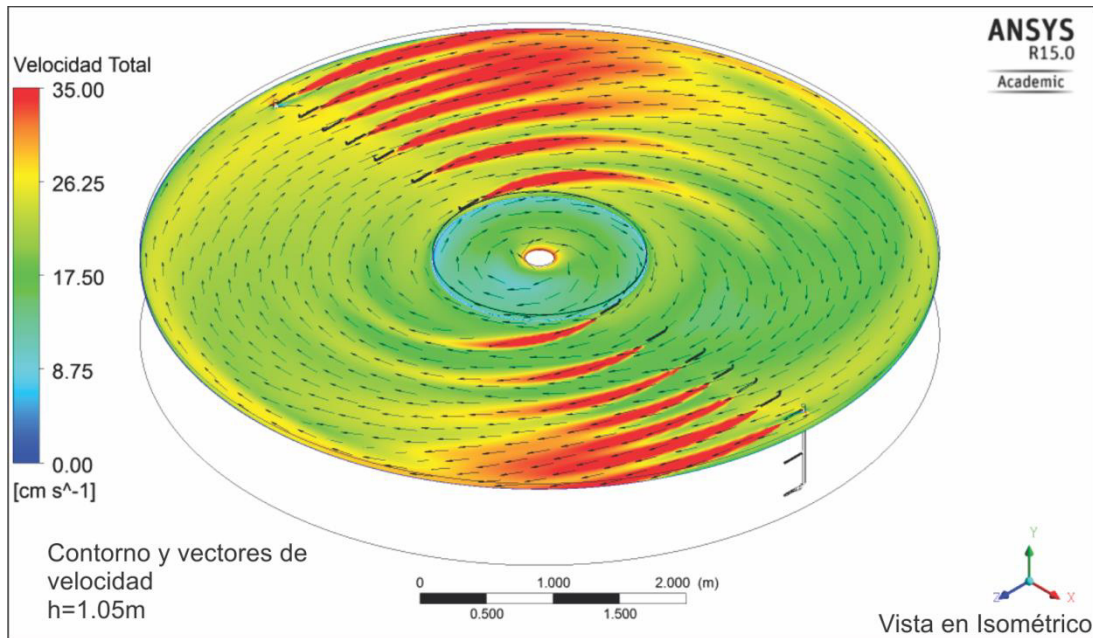


Ilustración 5.12. Vectores y contornos de velocidad, h=1.05 m; vista en isométrico.

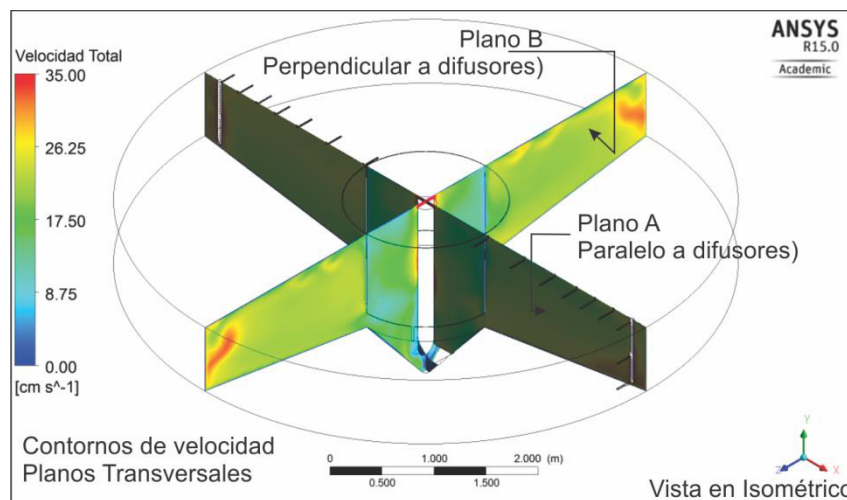


Ilustración 5.13. Contornos de velocidad en planos transversales; vista en isométrico.

En la Ilustración 5.14 se puede observar a detalle el contorno y vectores de velocidad en el plano A (paralelo a la línea de difusores). Puede observarse que el comportamiento del flujo en el lado izquierdo es homogéneo y la entrada del flujo hacia el sedimentador se efectúa de manera correcta. Sin embargo, en el lado derecho de la ilustración existe un flujo turbulento en toda la altura del flujo.

Así mismo, puede notarse que en dicha zona se presenta un retorno del flujo del sedimentador hacia la zona del tanque de cultivo a altas velocidades. Esto provoca la existencia de re-suspensión de sólidos y arrastre de los mismos dentro del tanque, evitando su sedimentación en el cono del sedimentador. Puede observarse el comportamiento del flujo dentro del sedimentador, donde se hace énfasis en la presencia de dos vórtices que generan un flujo turbulento dentro del sedimentador. Esto dificulta el proceso natural de sedimentación, ya que las partículas que logran entrar a la zona de sedimentación tienden a re suspenderse por el efecto de la turbulencia. También el comportamiento del flujo dentro del sedimentador no es homogéneo en toda la altura del tanque, ya que se tienen velocidades de 8 - 17 cm/s, lo que ocasiona la presencia de vórtices turbulentos.

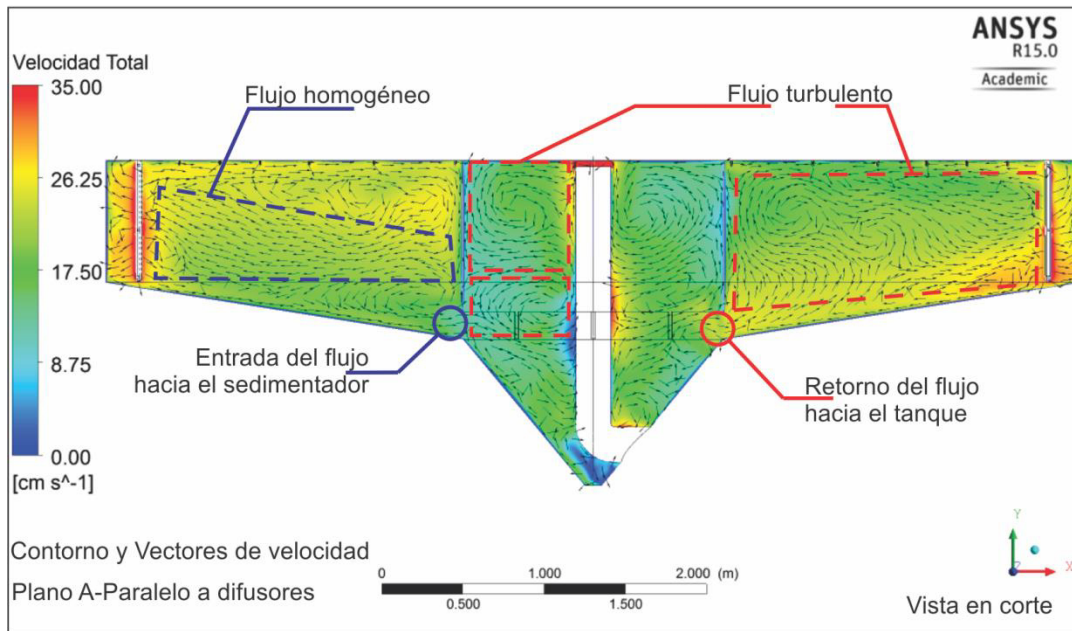


Ilustración 5.14. Contorno y vectores de velocidad en plano transversal A; vista en corte.

La Ilustración 5.15 muestra el contorno y vectores de velocidad en el plano transversal B (perpendicular a los difusores). Puede observarse que el comportamiento del flujo de manera general es uniforme y homogéneo en estas zonas, con la presencia de turbulencia leve a media altura del tanque. De igual manera que en el plano anterior, se presentan velocidades variables dentro del sedimentador, provocando flujo turbulento. Si bien, únicamente se presenta un vórtice dentro del sedimentador, éste presenta velocidades de hasta 17 cm/s (velocidad total), una velocidad muy alta respecto al flujo del tanque.

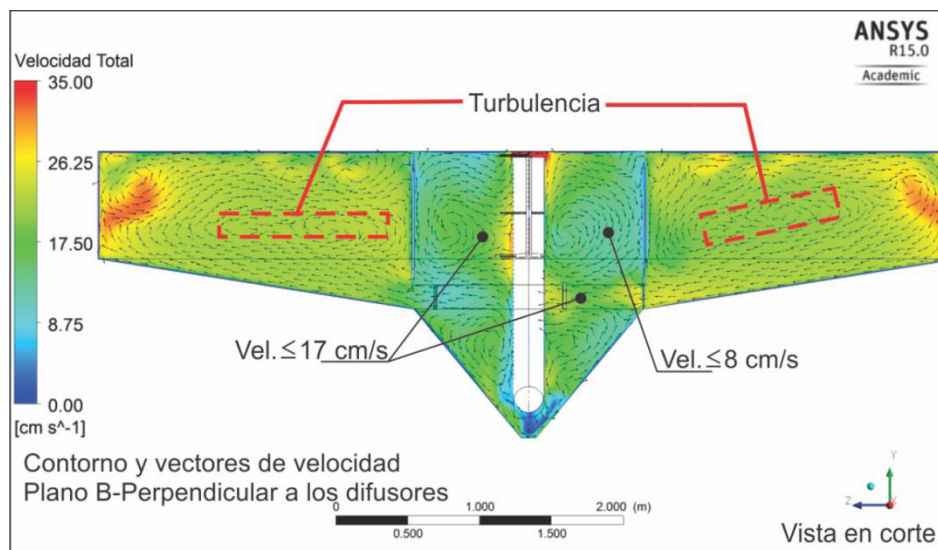


Ilustración 5.15. Contorno y vectores de velocidad en plano transversal B; vista en corte.

Es importante mencionar que las velocidades del flujo dentro del tanque cumplen con las velocidades de referencia para el sano crecimiento y desarrollo de los peces. Para el caso del comportamiento actual del tanque, según datos de Tenorio (2014), se deben tener velocidades no menores a **10.4 cm/s** dentro del tanque. Además, con las recomendaciones de diversos autores dichas velocidades no deben de exceder en este caso los **35 cm/s**. Así, se verifica que el comportamiento hidráulico del tanque en condiciones actuales, cumple con los requerimientos para el cultivo de peces. Además, la geometría del fondo del tanque beneficia la canalización de los sólidos hacia el sedimentador. Sin embargo, el deficiente diseño del sedimentador, especialmente la forma y distribución de las rejillas y placas, no es apto para lograr una eficiente sedimentación y remoción de sólidos de manera natural dentro del sedimentador.

En los apartados siguientes se muestran los resultados que se obtuvieron bajo los distintos escenarios de operación del sedimentador propuesto, bajo diferentes configuraciones de rejillas y diámetro del mismo. Se realiza la comparación del comportamiento del flujo de los distintos escenarios y el comportamiento del flujo en condiciones actuales de operación, mismos que se mostraron anteriormente en este apartado. Así, se podrá observar el impacto que tiene la geometría del sedimentador en el comportamiento del flujo en el tanque así como dentro del sedimentador.

Además de los contornos y vectores de velocidad, se mostrarán perfiles de velocidad vertical, líneas de corriente y trayectorias, entre otros gráficos que ayudarán al entendimiento del comportamiento del flujo dentro del tanque y del sedimentador.

5.3 Resultados de los escenarios planteados

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en la simulación de los escenarios de operación del tanque “El Zarco”, planteados y descritos en el capítulo anterior.

5.3.1 Escenarios con variación de rejilla del sedimentador

Como se describió en el capítulo anterior, se tuvieron un total de 9 escenarios correspondientes a la primera fase de simulación del tanque “El Zarco”, donde únicamente se modificó la forma y distribución de las rejillas del sedimentador. En las Ilustraciones siguientes, se muestran los contornos y vectores de velocidad para cada escenario. Así mismo, se muestra el efecto que tienen las rejillas en el comportamiento del flujo de entrada al sedimentador. Para fines prácticos, se muestran únicamente resultados en el plano vertical (corte transversal) y horizontal (plantas), para cada uno de los escenarios. Estos últimos planos se ubicaron en distintas alturas del tanque, donde se consideró significativo el comportamiento del flujo dentro del tanque y del sedimentador. La Ilustración 5.16 muestra la ubicación de los planos horizontales, donde el plano **P1** corresponde al plano horizontal que atraviesa las rejillas, el plano **P2** se ubica en la altura media del tanque y el plano **P3** corresponde a la zona cercana a la superficie libre del agua.

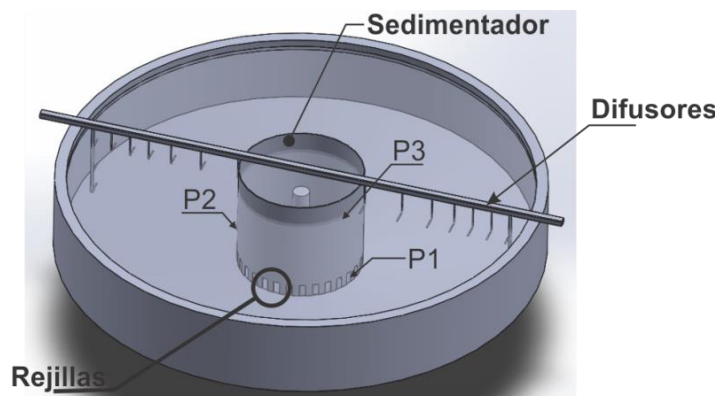


Ilustración 5.16. Ubicación de los planos horizontales de la velocidad dentro del tanque

En las Ilustraciones 5.17 – 5.25 se muestra primeramente un corte transversal del tanque, donde se puede observar la distribución de velocidades en dicha sección. Puede notarse claramente que en todos los casos la velocidad no sobrepasa el valor de 30 cm/s. Con ello se cumple con la velocidad máxima segura de nado y una mínima de 15 cm/s dentro del tanque. Además, puede notarse que la velocidad es homogénea y con pocas zonas de turbulencia en la mayoría de los escenarios, esto en la zona del tanque.

Sin embargo, en estos primeros nueve escenarios puede notarse que el flujo dentro del sedimentador (zona de sedimentación) presenta una velocidad de hasta 10 - 15 cm/s, lo que se considera una desventaja para la sedimentación de partículas. Si bien, se recomienda realizar un análisis de velocidad de caída de los sedimentos para estudiar la eficiencia del sedimentador, se buscó con la herramienta de simulación, disminuir la velocidad del flujo del sedimentador rediseñando y modificando la estructura del mismo.

La Ilustración 5.17 corresponde al escenario E1, con un diámetro del sedimentador de 1.6m con rejillas perimetrales de 17 x 8.5 cm, separadas a cada 8.5 cm siendo un total de 30 rejillas. La velocidad del flujo dentro del sedimentador es de 7 - 10 cm/s. La velocidad del flujo en el tanque es de 20 - 25 cm/s. En el plano P1 se observa una separación de flujos sin turbulencia, donde el flujo disminuye su velocidad al ingresar del tanque al sedimentador, de 25 cm/s a 7 - 10 cm/s. En el plano transversal se observa una velocidad vertical de descenso de hasta 2 cm/s en la zona central del sedimentador. Este escenario tiene comportamiento óptimo por lo que

fue seleccionado para la modificación del diámetro del sedimentador, para la siguiente fase de simulación.

La Ilustración 5.18 corresponde al escenario E2, con un diámetro del sedimentador de 1.6m con rejillas perimetrales de 17 x 8.5 cm, separadas a 17 cm siendo un total de 20 rejillas. La velocidad del flujo dentro del sedimentador es de 7 - 10 cm/s. La velocidad del flujo en el centro del tanque es de 24 - 28 cm/s. En el plano P1 se observa una separación de flujos con poca turbulencia, donde el flujo disminuye su velocidad al ingresar al sedimentador con velocidad de 7 - 10 cm/s. En el plano transversal se observa una velocidad vertical de descenso de hasta 2 cm/s en la zona central y cono del sedimentador. Este escenario tiene comportamiento óptimo y fue seleccionado para modificación de diámetro del sedimentador, para la siguiente fase de simulación.

La Ilustración 5.19 corresponde al escenario E3, con un diámetro del sedimentador de 1.6m con rejillas perimetrales de 17 x 8.5 cm, separadas a cada 34 cm siendo un total de 12 rejillas. La velocidad del flujo dentro del sedimentador es de 7 - 10 cm/s y pequeñas zonas de hasta 15 cm/s. La velocidad del flujo en el centro del tanque es de 25 - 30 cm/s. En el plano P1 se observa una separación de flujos con poca turbulencia, donde el flujo dentro del sedimentador cercano a las rejillas es de 15 cm/s y disminuye hasta 7 - 10 cm/s. En el plano transversal se observa una velocidad vertical de descenso de hasta 3 cm/s en la zona central y cono del sedimentador. Este escenario no resultó ser óptimo debido a que la velocidad en las rejillas es alta, con valores de 15 cm/s.

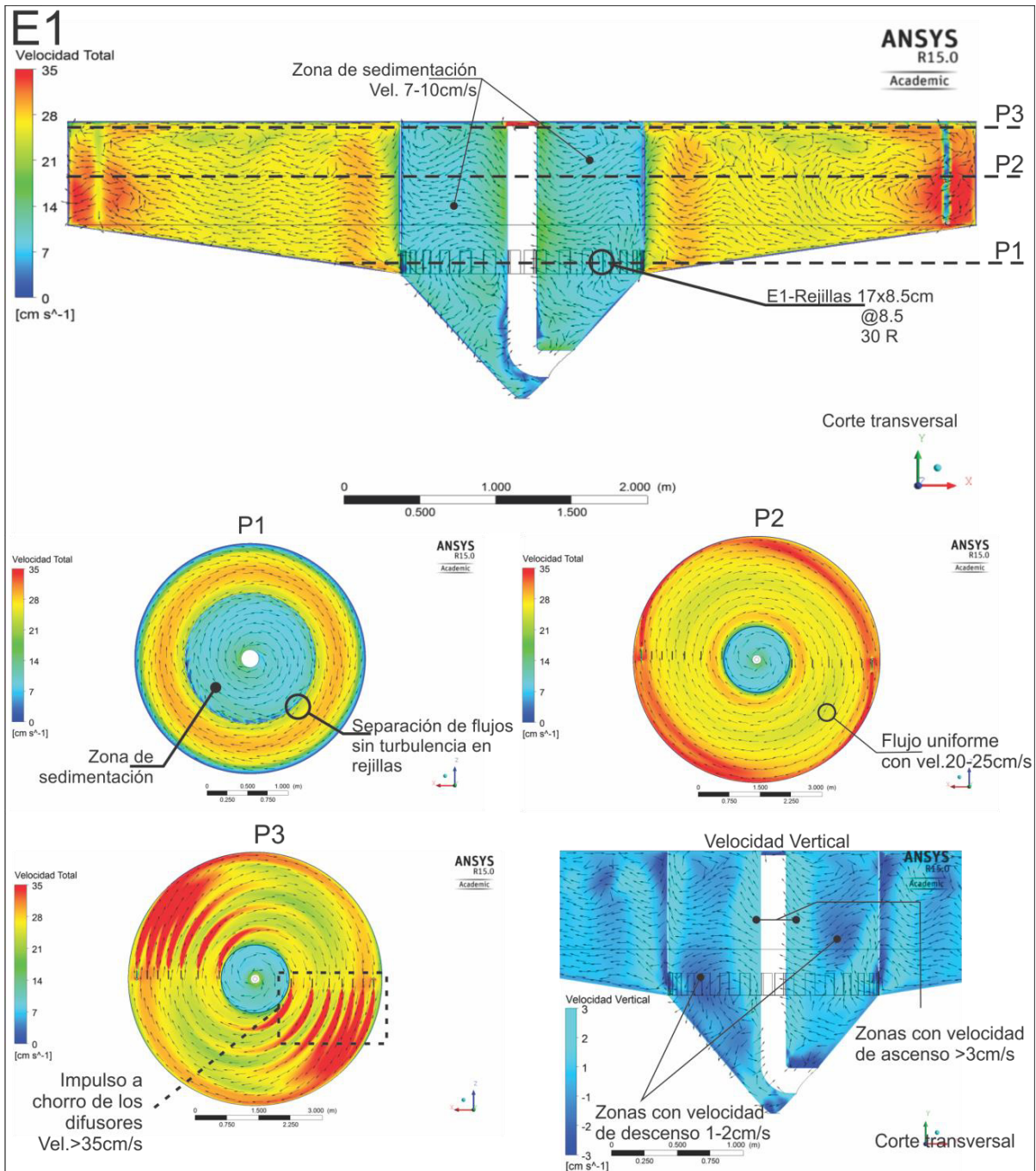


Ilustración 5.17. Contornos y vectores de velocidad, escenario E1.

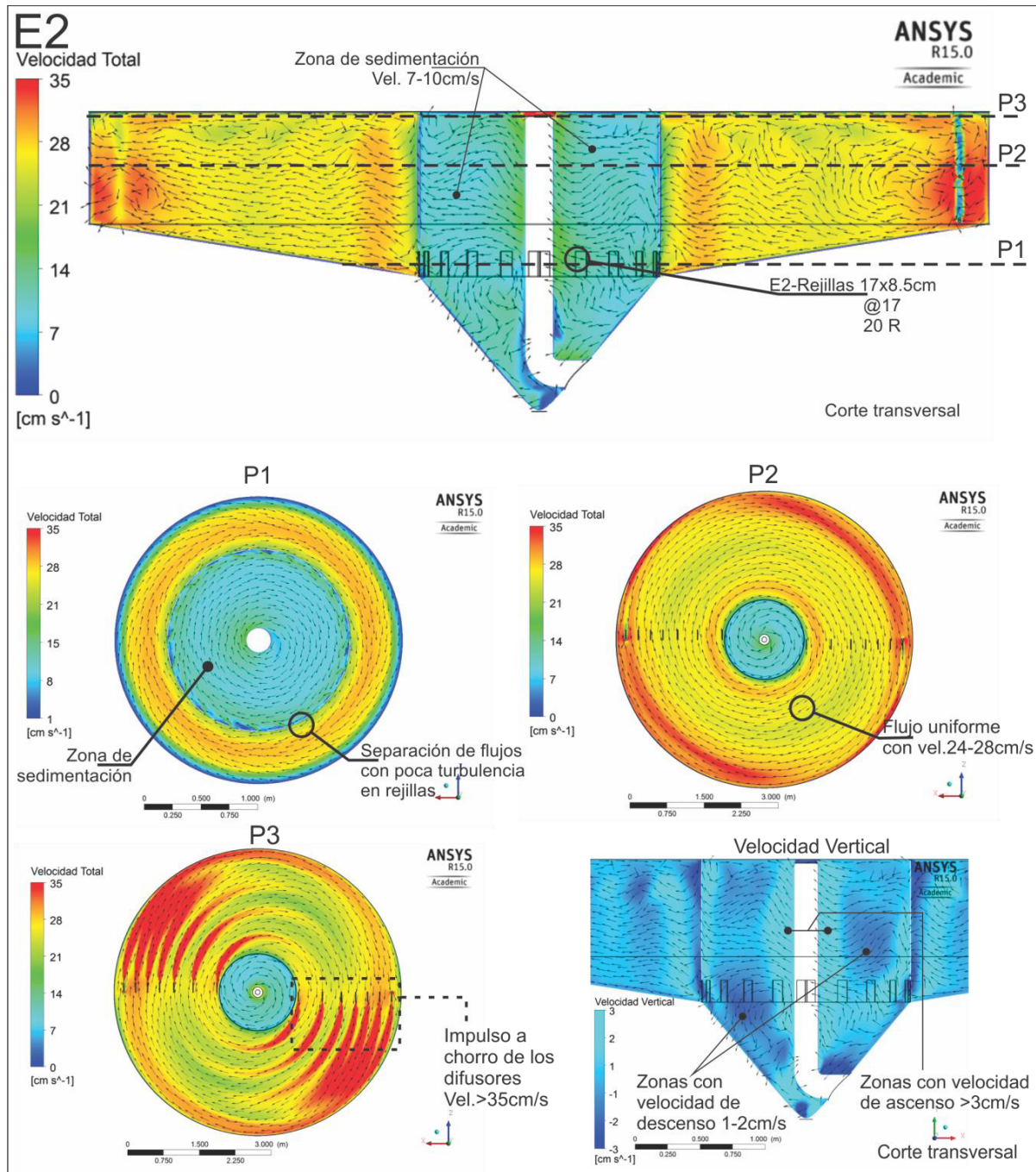


Ilustración 5.18. Contornos y vectores de velocidad, escenario E2.

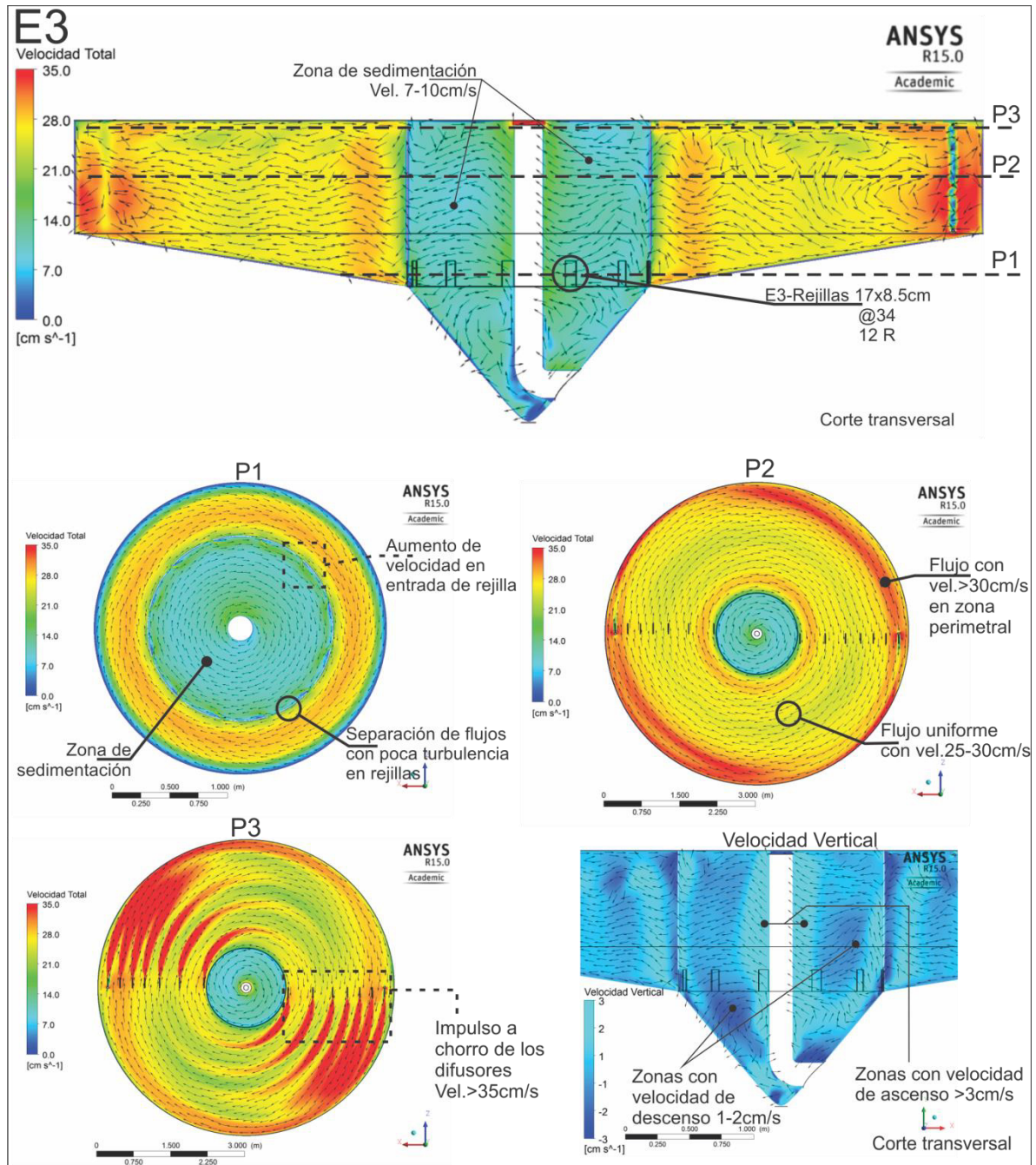


Ilustración 5.19. Contornos y vectores de velocidad, escenario E3.

La Ilustración 5.20 corresponde al escenario E4, con un diámetro del sedimentador de 1.6m con rejillas perimetrales de 17 x 17 cm, separadas a cada 8.5 cm siendo un total de 20 rejillas. La velocidad del flujo dentro del sedimentador es de 7 - 10 cm/s y pequeñas zonas de hasta 14 cm/s. La velocidad del flujo en el centro del tanque es de 25 - 30 cm/s. En el plano P1 se observa una separación de flujos con poca turbulencia en las rejillas, con velocidad de 15 cm/s y disminuye hasta 7 - 14 cm/s. En el plano transversal se observa una velocidad vertical de descenso de hasta 2 cm/s en la zona central y cono del sedimentador. Este escenario tiene comportamiento aceptable y fue seleccionado para modificación de diámetro del sedimentador.

La Ilustración 5.21 corresponde al escenario E5, con un diámetro del sedimentador de 1.6m con rejillas perimetrales de 17 x 17 cm, separadas a cada 17 cm siendo un total de 15 rejillas. La velocidad del flujo dentro del sedimentador es de 7 - 10 cm/s y pequeñas zonas de hasta 14 cm/s. La velocidad del flujo en el centro del tanque es de 23 - 28 cm/s. En el plano P1 se observa una separación de flujos con poca turbulencia en las rejillas, con velocidad de 15 cm/s y disminuye hasta 7 - 10 cm/s. En el plano transversal se observa una velocidad vertical de descenso de hasta 2 cm/s en la zona central y cono del sedimentador.

La Ilustración 5.22 corresponde al escenario E6, con un diámetro del sedimentador de 1.6m con rejillas perimetrales de 17 x 17 cm, separadas a cada 34 cm siendo un total de 10 rejillas. La velocidad del flujo dentro del sedimentador es de 7 - 10 cm/s y pequeñas zonas de hasta 14 cm/s. La velocidad del flujo en el centro del tanque es de 23 - 28 cm/s. En el plano P1 se observa una separación de flujos con poca turbulencia en las rejillas, con velocidad de 15 cm/s y disminuye hasta 7 - 10 cm/s. En el plano transversal se observa una velocidad vertical de descenso de hasta 2 cm/s en la zona central y cono del sedimentador.

Los escenarios E5 y E6 fueron descartados para la simulación bajo modificación del diámetro, debido a que no presentaron un comportamiento de flujo óptimo en la zona de las rejillas. Además, con las simulaciones realizadas se observó que aquellos escenarios con un número mínimo de 20 rejillas presentaron un mejor comportamiento del flujo en la zona de las rejillas y dentro del sedimentador. Estos escenarios tienen una relación de ancho de rejilla/diámetro de sedimentador $b_r/d = 0.05 - 0.1$.

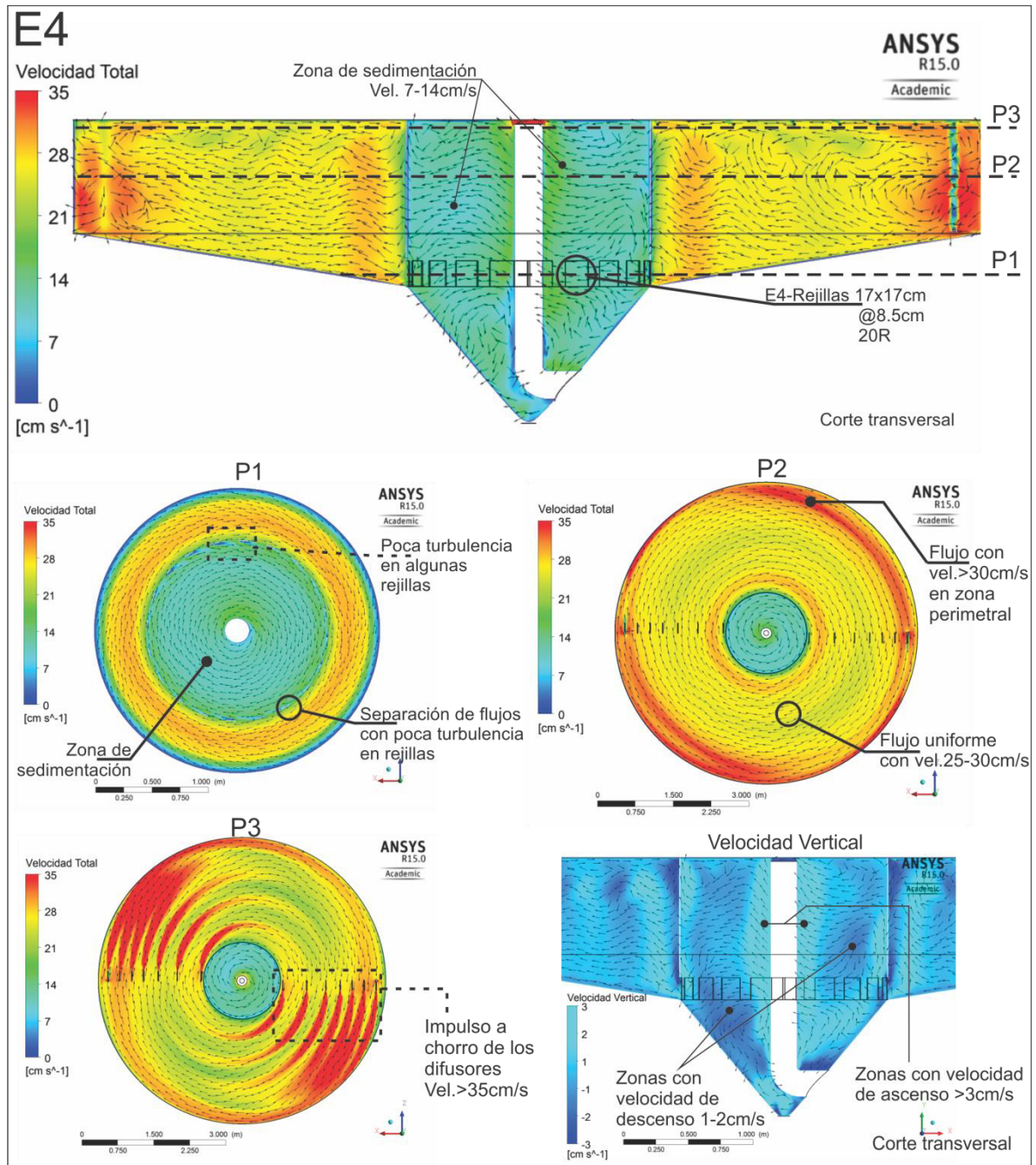


Ilustración 5.20. Contornos y vectores de velocidad, escenario E4.

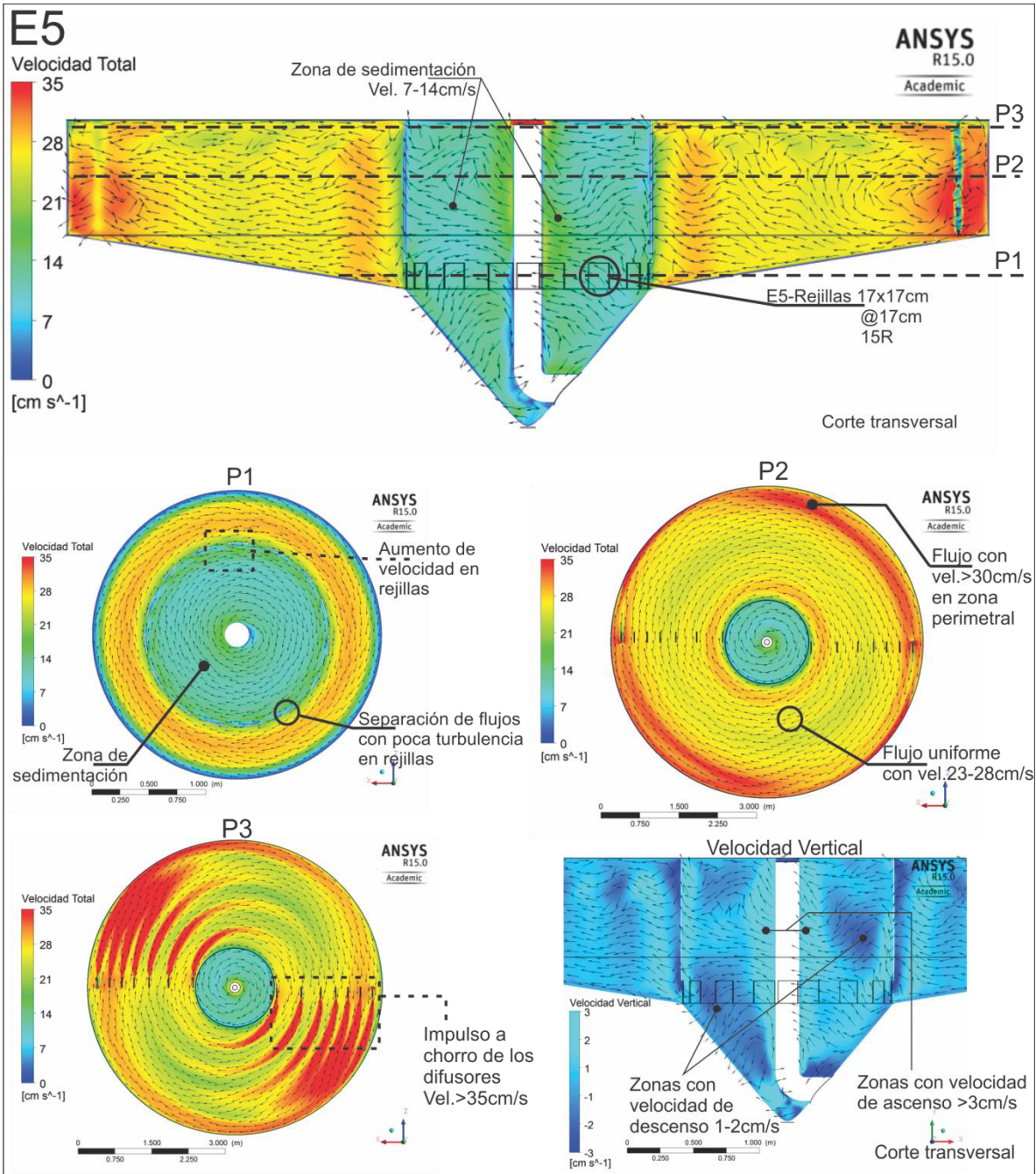


Ilustración 5.21. Contornos y vectores de velocidad, escenario E5.

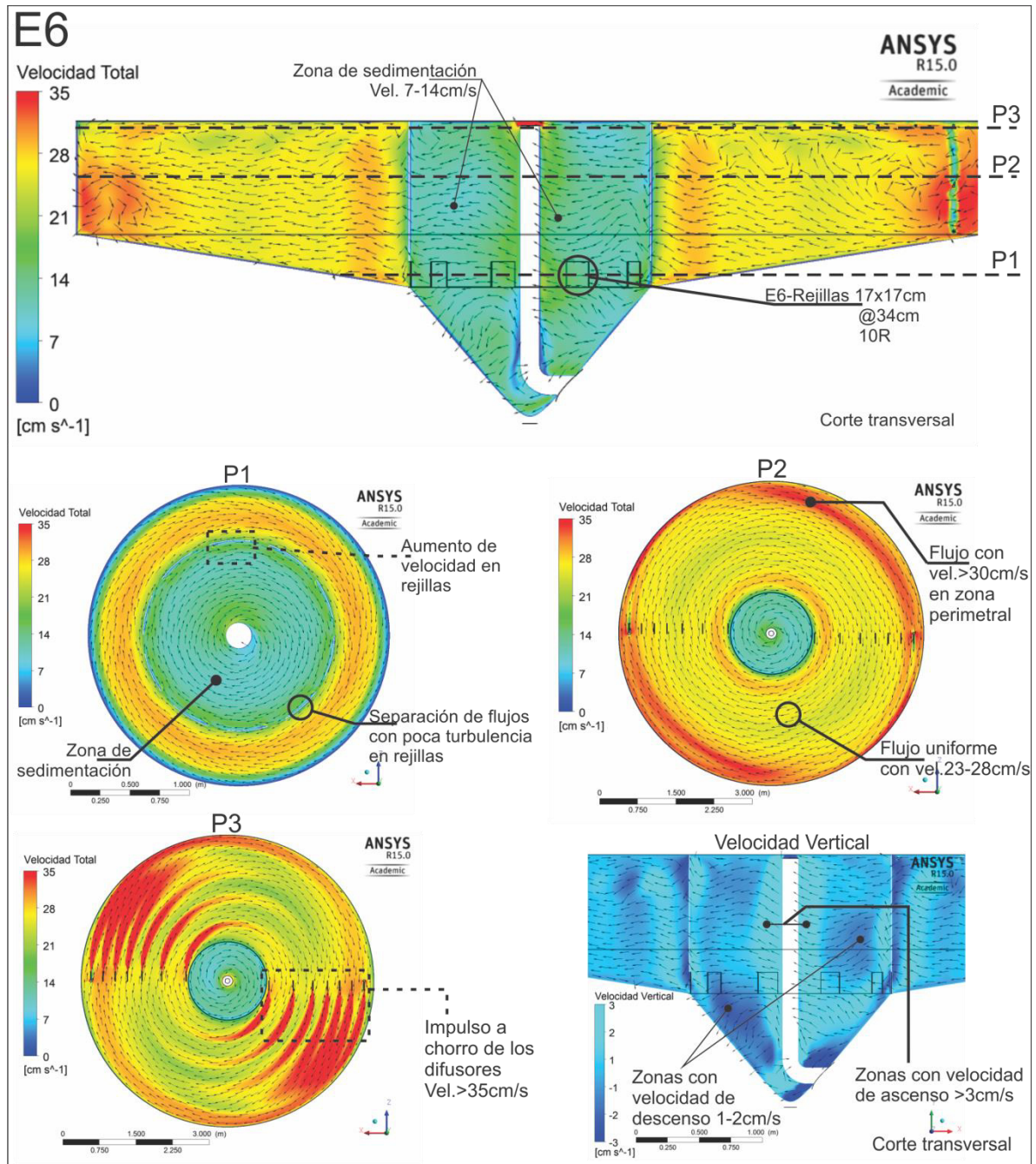


Ilustración 5.22. Contornos y vectores de velocidad, escenario E6.

La Ilustración 5.23 corresponde al escenario E7, con un diámetro del sedimentador de 1.6m con rejillas perimetrales de 17 x 34 cm, separadas a cada 8.5 cm siendo un total de 12 rejillas. La velocidad del flujo dentro del sedimentador es de 7 - 10 cm/s y pequeñas zonas de hasta 14 cm/s. La velocidad del flujo en el centro del tanque es de 23 - 28 cm/s. En el plano P1 se observa una separación de flujos sin turbulencia en las rejillas pero con velocidad de 15 cm/s dentro del sedimentador y disminuye hasta 7 - 10 cm/s. En el plano transversal se observa una velocidad vertical de descenso de hasta 2 cm/s en la zona central y cono del sedimentador.

La Ilustración 5.24 corresponde al escenario E8, con un diámetro del sedimentador de 1.6m con rejillas perimetrales de 17 x 34 cm, separadas a cada 17 cm siendo un total de 10 rejillas. La velocidad del flujo dentro del sedimentador es de 7 - 10 cm/s y pequeñas zonas de hasta 16 cm/s. La velocidad del flujo en el centro del tanque es de 23 - 28 cm/s. En el plano P1 se observa una separación de flujos sin turbulencia en las rejillas pero con velocidad de 15 cm/s dentro del sedimentador y disminuye hasta 7 - 10 cm/s. En el plano transversal se observa una velocidad vertical de descenso de hasta 2 cm/s en la zona central y cono del sedimentador.

La Ilustración 5.25 corresponde al escenario E9, con un diámetro del sedimentador de 1.6m con rejillas perimetrales de 17 x 34 cm, separadas a cada 34 cm siendo un total de 7 rejillas. La velocidad del flujo dentro del sedimentador es de 7 - 10 cm/s y pequeñas zonas de hasta 20 cm/s. La velocidad del flujo en el centro del tanque es de 22 - 27 cm/s. En el plano P1 se observa una separación de flujos sin turbulencia en las rejillas pero con velocidad de 18 cm/s dentro del sedimentador y disminuye hasta 7 - 15 cm/s. En el plano transversal se observa una velocidad vertical de descenso de hasta 2 cm/s en la zona central y cono del sedimentador.

Estos tres escenarios fueron descartados para su simulación de variación de diámetro del sedimentador, debido a que su distribución de rejillas no propició una disminución de velocidad en el sedimentador y en la zona cercana a las rejillas.

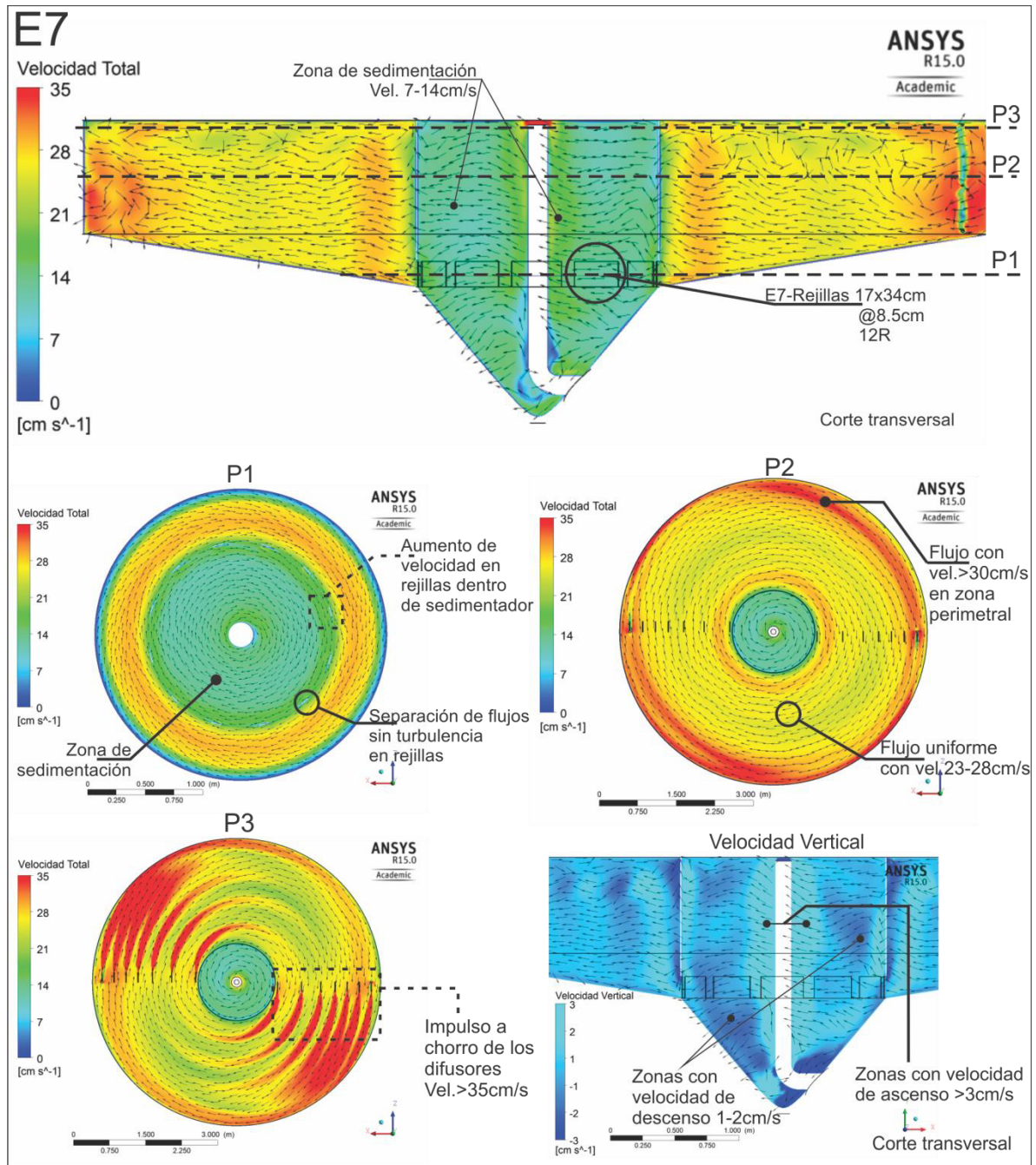


Ilustración 5.23. Contornos y vectores de velocidad, escenario E7.

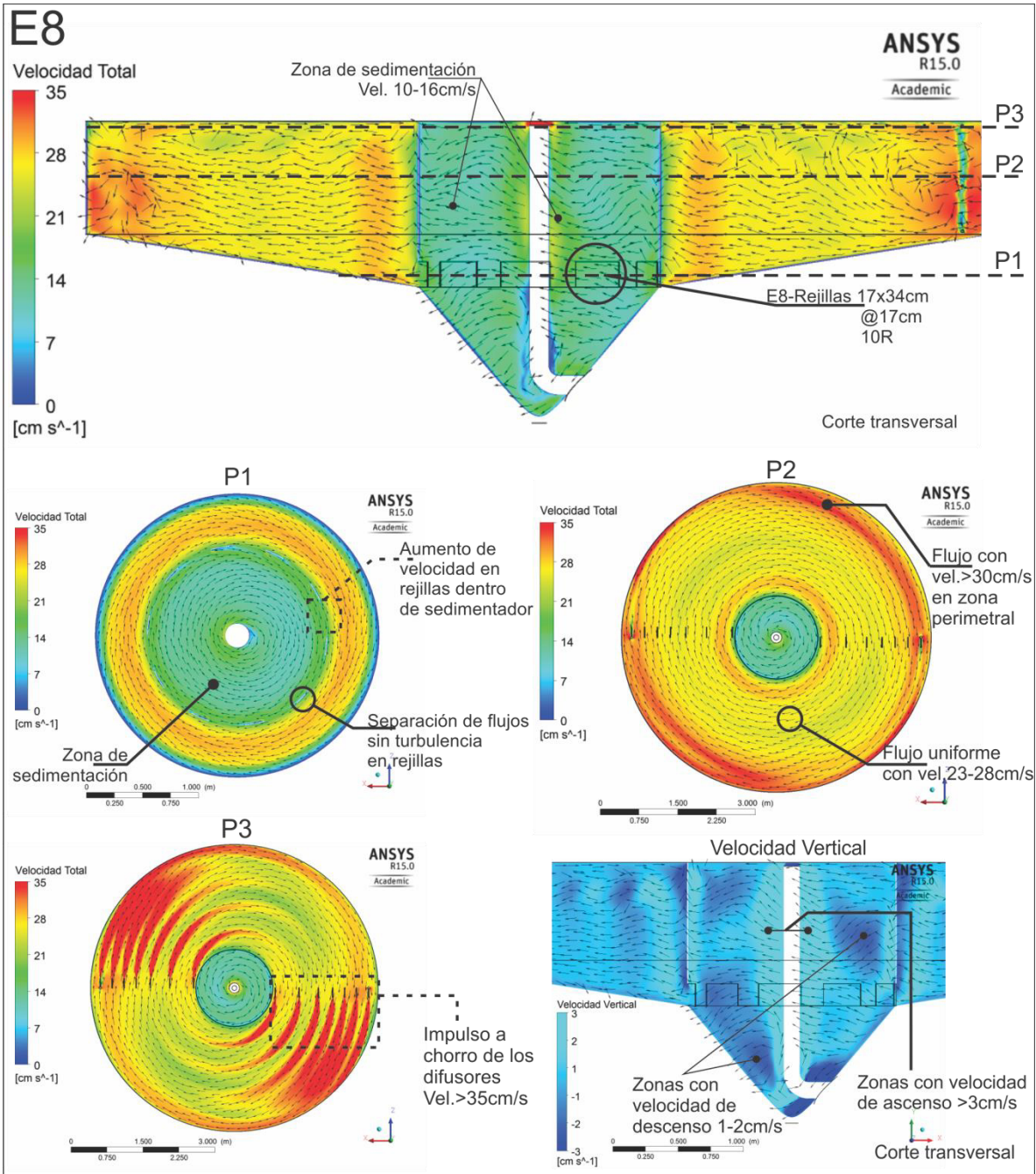


Ilustración 5.24. Contornos y vectores de velocidad, escenario E8.

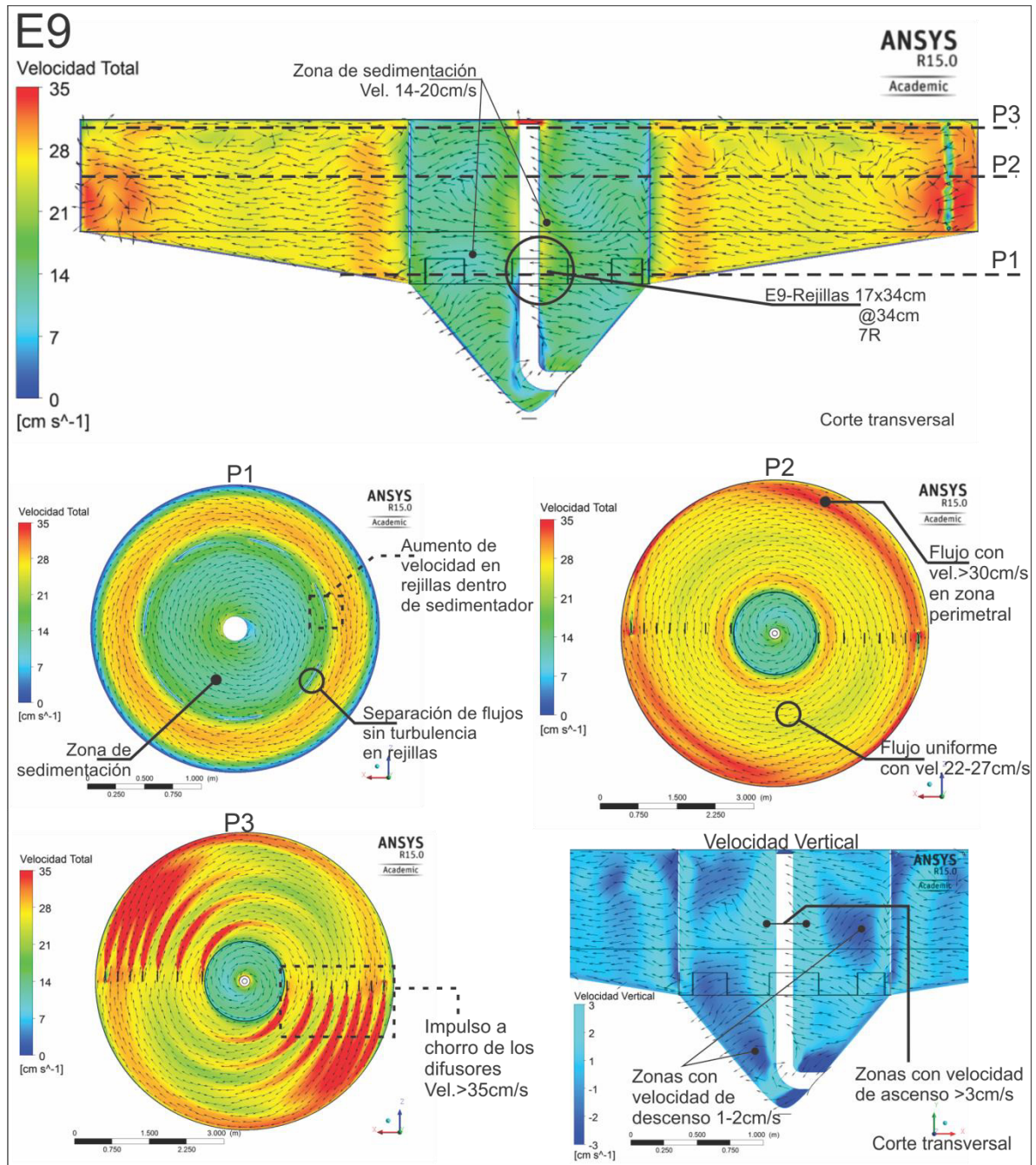


Ilustración 5.25. Contornos y vectores de velocidad, escenario E9.

5.3.2 Escenarios con variación de diámetro del sedimentador

En el presente apartado se mostrarán los resultados de la segunda fase de la simulación, la cual consistió en la selección de 3 escenarios de los 9 anteriores, que mejor comportamiento presentaron. A cada uno de esos 3 escenarios se les modificó el diámetro del sedimentador, siendo 1.6 m el diámetro original, bajo dos propuestas de relación: $D/d=3:1$ y $D/d= 2.5:1$, teniendo básicamente diámetros de **2 m y 2.4 m**, respectivamente. Así, se tuvo un total de 6 escenarios adicionales, de los cuales se muestran los contornos y vectores de velocidad en distintos planos verticales y horizontales.

Cabe mencionar que la selección de los siguientes escenarios se realizó bajo el sustento de los resultados anteriores, donde se pudo observar que el comportamiento del flujo dentro del sedimentador era más homogéneo y menos turbulento con la presencia de un mayor número de rejillas con mínima separación entre sí. Así, los escenarios con estas características son el E1, E2 y E4, en cuyo perímetro del sedimentador se tienen como mínimo 20 rejillas. Ésta recomendación también la sugieren Flores y López (2012), quienes de acuerdo a sus experimentos encontraron un mejor comportamiento del flujo del tanque con un mayor número de rejillas en el sedimentador. Así, los 6 escenarios con variación de diámetro son: E1d1, E1d2, E2d1, E2d2, E4d1 y E4d2.

La Ilustración 5.26 corresponde al escenario E1d1, con un diámetro del sedimentador de 2m (Rel. 3:1) con rejillas perimetrales de 17 x 8.5 cm, separadas a cada 8.5 cm siendo un total de 37 rejillas. La velocidad total del flujo dentro del sedimentador es de 2 - 3 cm/s. La velocidad del flujo en el centro del tanque es de 15 - 22 cm/s. En el plano P1 se observa una separación de flujos con poca turbulencia en las rejillas, con velocidad de 7 cm/s y disminuye hasta 2 - 3 cm/s. Este escenario resultó ser óptimo ya que en el plano transversal se observa una velocidad vertical de descenso de hasta 2 cm/s en la zona central y cono del sedimentador y en su mayoría se tiene velocidad vertical cercana a 1 cm/s, valor similar a lo recomendado por García-Aragón et al., (2014).

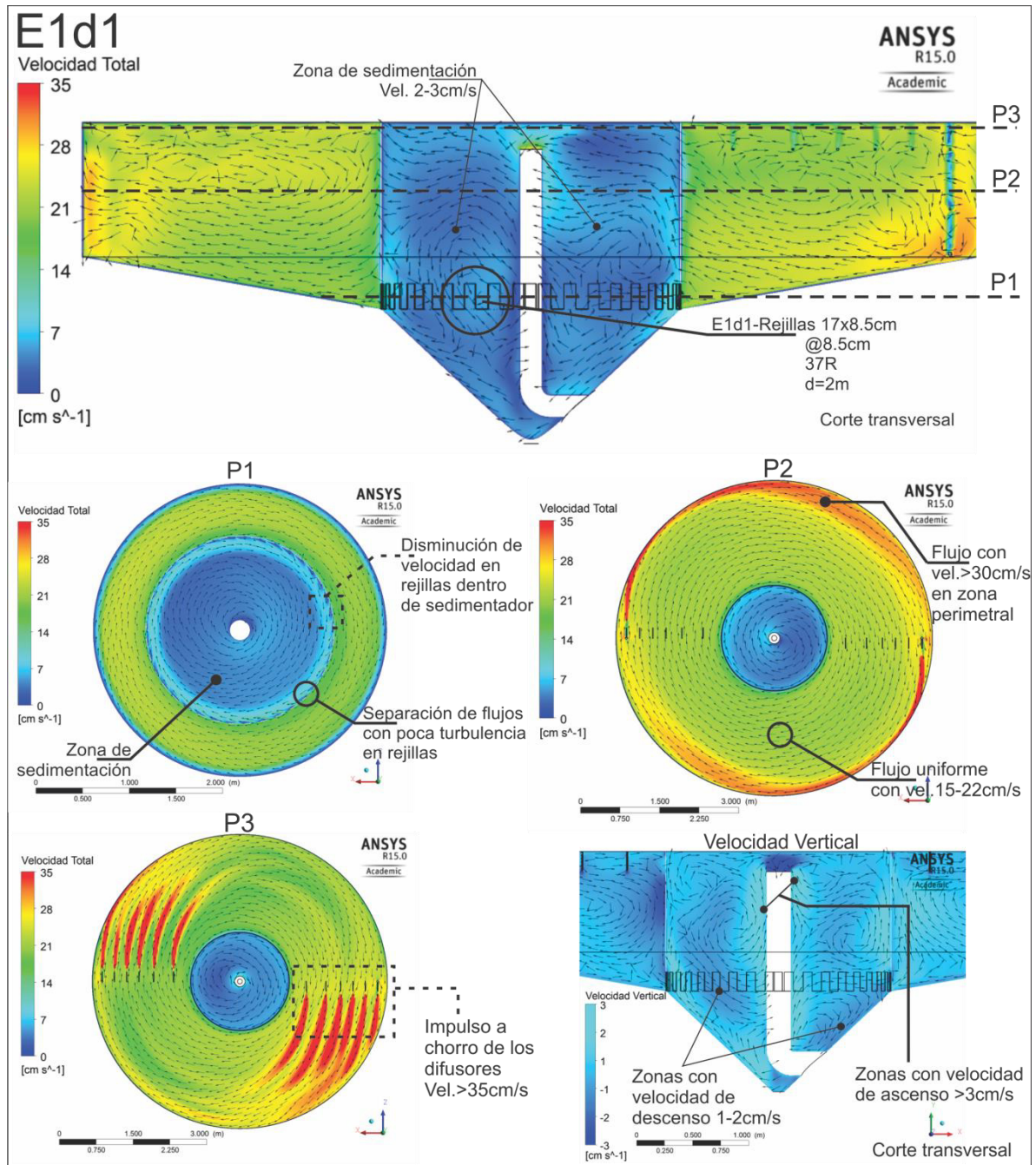


Ilustración 5.26. Contornos y vectores de velocidad, escenario E1d1.

La Ilustración 5.27 corresponde al escenario E1d2, con un diámetro del sedimentador de 2.4 m (Rel. 2.5:1) con rejillas perimetrales de 17 x 8.5 cm, separadas a cada 8.5 cm siendo un total de 44 rejillas. La velocidad del flujo dentro del sedimentador es de 2 - 3 cm/s. La velocidad del flujo en el centro del tanque es de 15 - 22 cm/s. En el plano P1 se observa una separación de flujos con poca turbulencia en las rejillas, con velocidad de 7 cm/s y disminuye hasta velocidades < 2 cm/s. Este escenario resultó ser óptimo ya que en el plano transversal se observa una velocidad vertical de descenso de hasta 2 cm/s en la zona central y cono del sedimentador y en su mayoría se tiene velocidad vertical < 1 cm/s, similar a lo recomendado por García-Aragón et al., (2014).

La Ilustración 5.28 corresponde al escenario E2d1, con un diámetro del sedimentador de 2m (Rel. 3:1) con rejillas perimetrales de 17 x 8.5 cm, separadas a cada 17 cm siendo un total de 25 rejillas. La velocidad del flujo dentro del sedimentador es de 3 - 5 cm/s. La velocidad del flujo en el centro del tanque es de 25 - 30 cm/s. En el plano P1 se observa una separación de flujos con poca turbulencia en las rejillas, con velocidad de 3 - 5 cm/s. En el plano transversal se observan zonas inestables con una velocidad vertical de descenso de hasta 3 cm/s en la zona central y cono del sedimentador, así como en el tanque.

La Ilustración 5.29 corresponde al escenario E2d2, con un diámetro del sedimentador de 2.4 m (Rel. 2.5:1) con rejillas perimetrales de 17 x 8.5 cm, separadas a cada 17 cm siendo un total de 30 rejillas. La velocidad del flujo dentro del sedimentador es de 2 - 4 cm/s. La velocidad del flujo en el centro del tanque es de 25 - 30 cm/s. En el plano P1 se observa una separación de flujos sin turbulencia en las rejillas, con velocidad de 2 - 4 cm/s. En el plano transversal se observan zonas inestables con una velocidad vertical de descenso de hasta 3 cm/s en la zona central y cono del sedimentador, así como en el tanque.

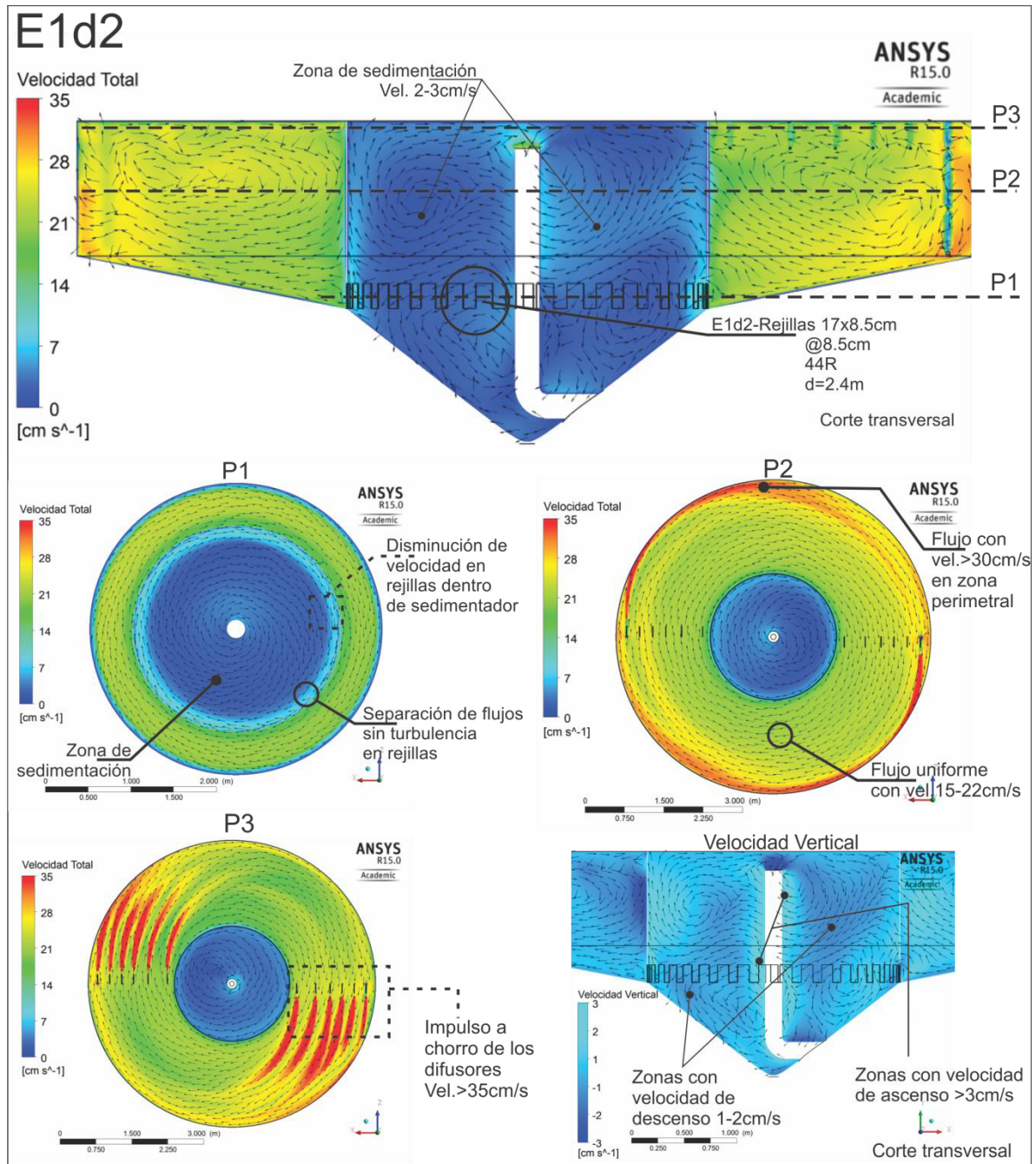


Ilustración 5.27. Contornos y vectores de velocidad, escenario E1d2.

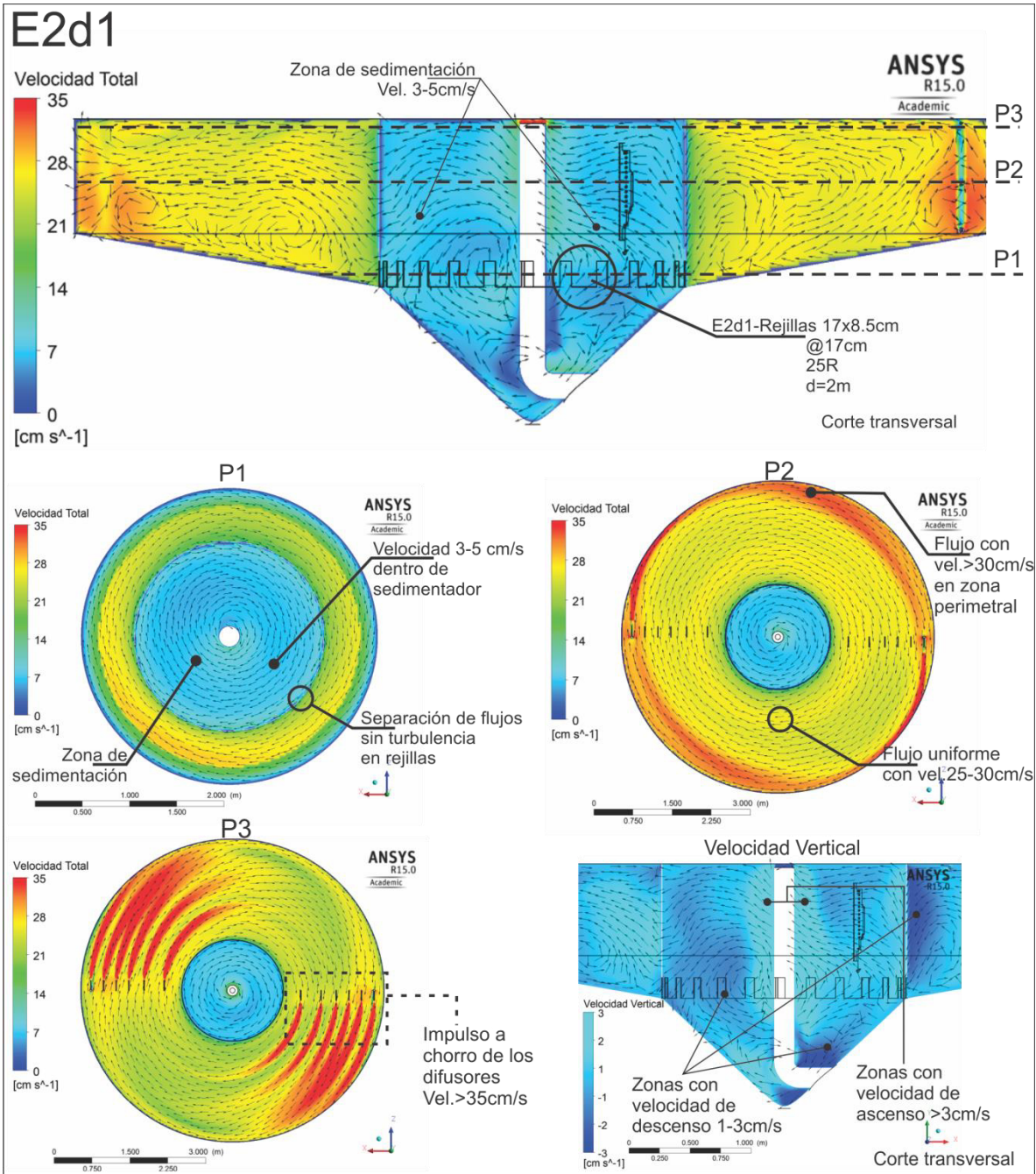


Ilustración 5.28. Contornos y vectores de velocidad, escenario E2d1.

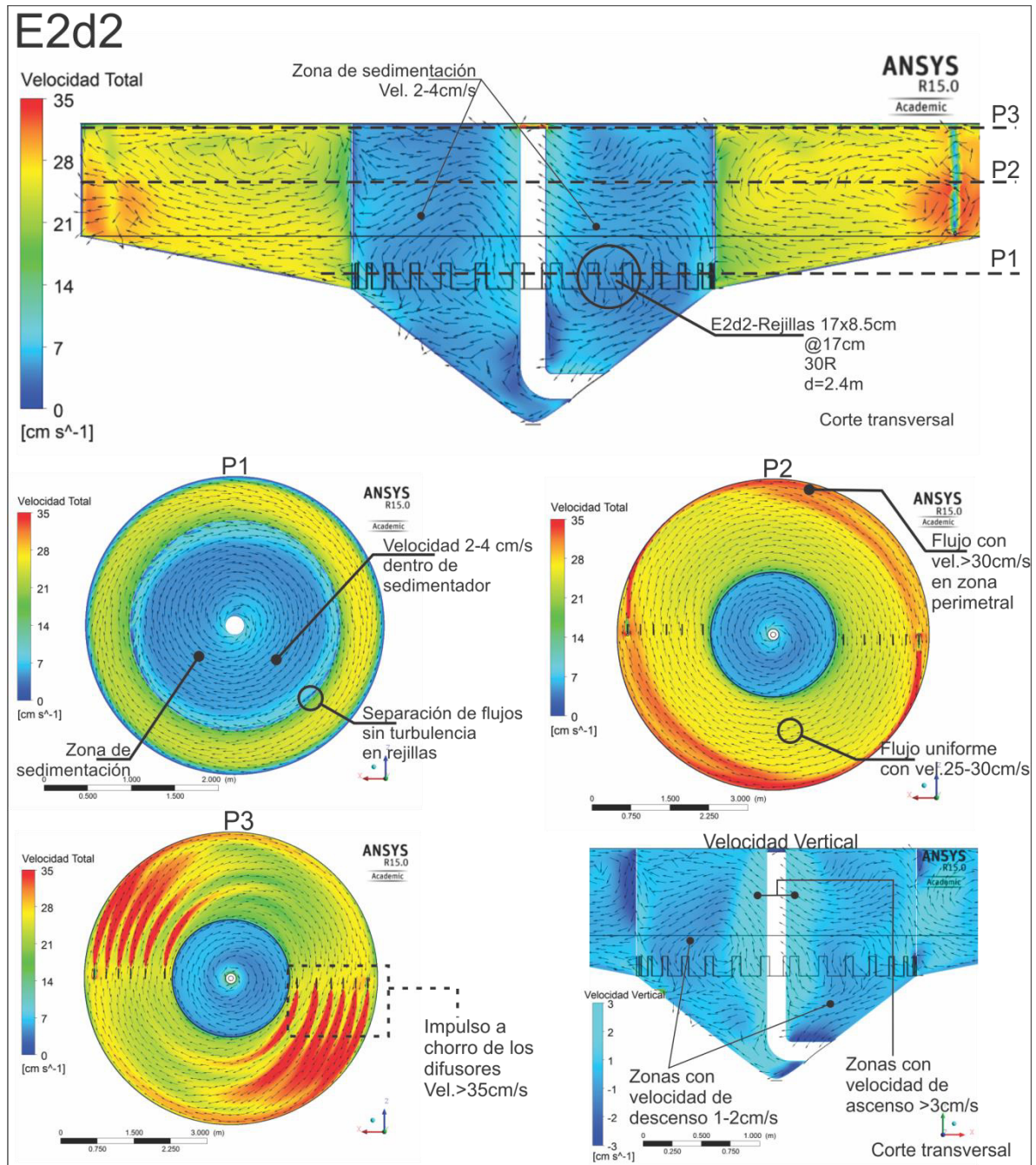


Ilustración 5.29 Contornos y vectores de velocidad, escenario E2d2.

La Ilustración 5.30 corresponde al escenario E4d1, con un diámetro del sedimentador de 2m (Rel. 3:1) con rejillas perimetrales de 17 x 17 cm, separadas a cada 8.5 cm siendo un total de 25 rejillas. La velocidad del flujo dentro del sedimentador es de 3 - 5 cm/s. La velocidad del flujo en el centro del tanque es de 25 - 30 cm/s. En el plano P1 se observa una separación de flujos sin turbulencia en las rejillas, con velocidad de 3 - 5 cm/s. En el plano transversal se observan zonas inestables con una velocidad vertical de descenso de hasta 3 cm/s en la zona central y cono del sedimentador, así como en el tanque.

La Ilustración 5.31 corresponde al escenario E4d2, con un diámetro del sedimentador de 2.4 m (Rel. 2.5:1) con rejillas perimetrales de 17 x 17 cm, separadas a cada 8.5 cm siendo un total de 30 rejillas. La velocidad del flujo dentro del sedimentador es de 2 - 4 cm/s. La velocidad del flujo en el centro del tanque es de 25 - 30 cm/s. En el plano P1 se observa una separación de flujos sin turbulencia en las rejillas, con velocidad de 2 - 4 cm/s. En el plano transversal se observan zonas inestables con una velocidad vertical de descenso de hasta 3 cm/s en la zona central y cono del sedimentador, así como en el tanque.

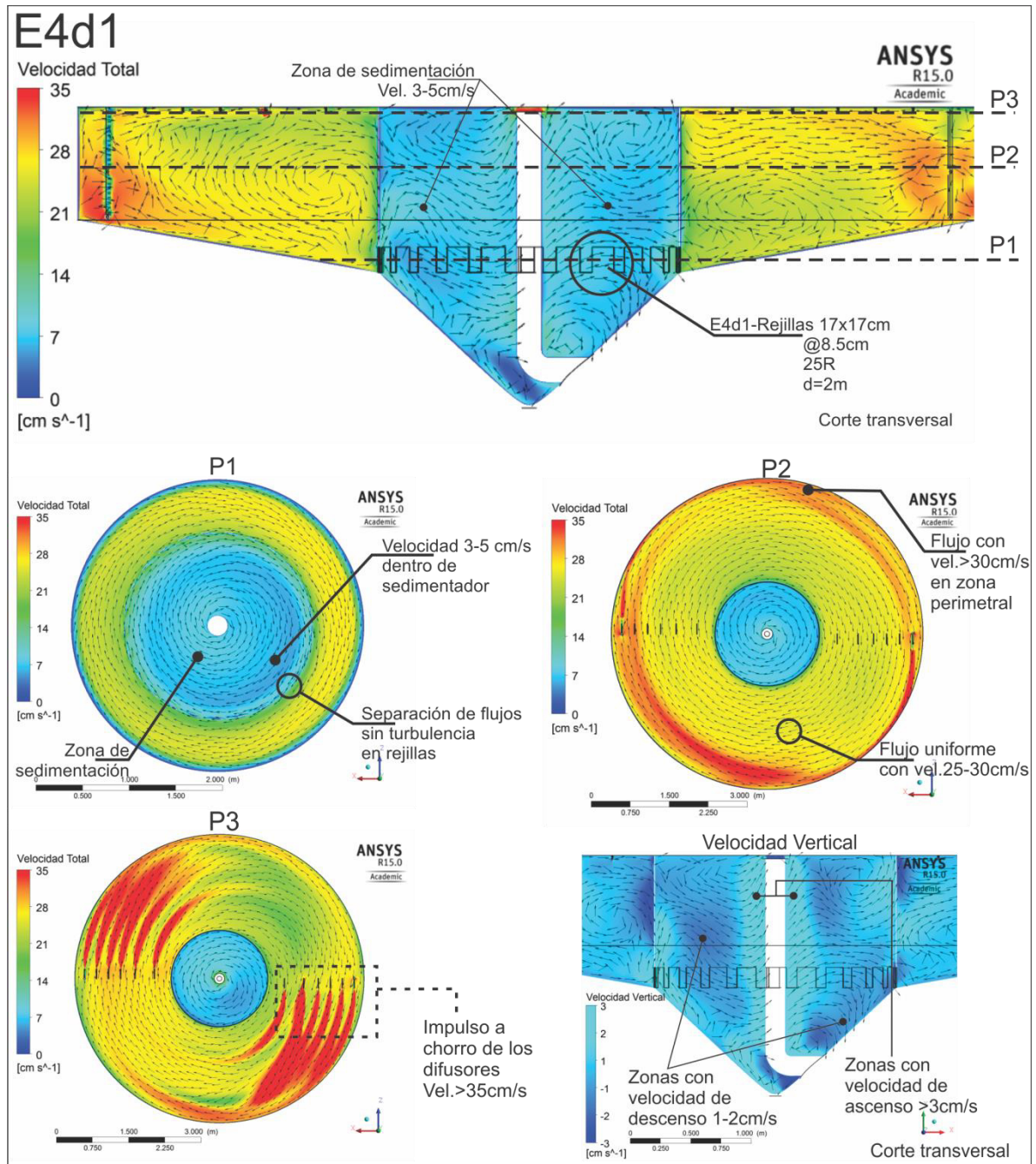


Ilustración 5.30 Contornos y vectores de velocidad, escenario E4d1.

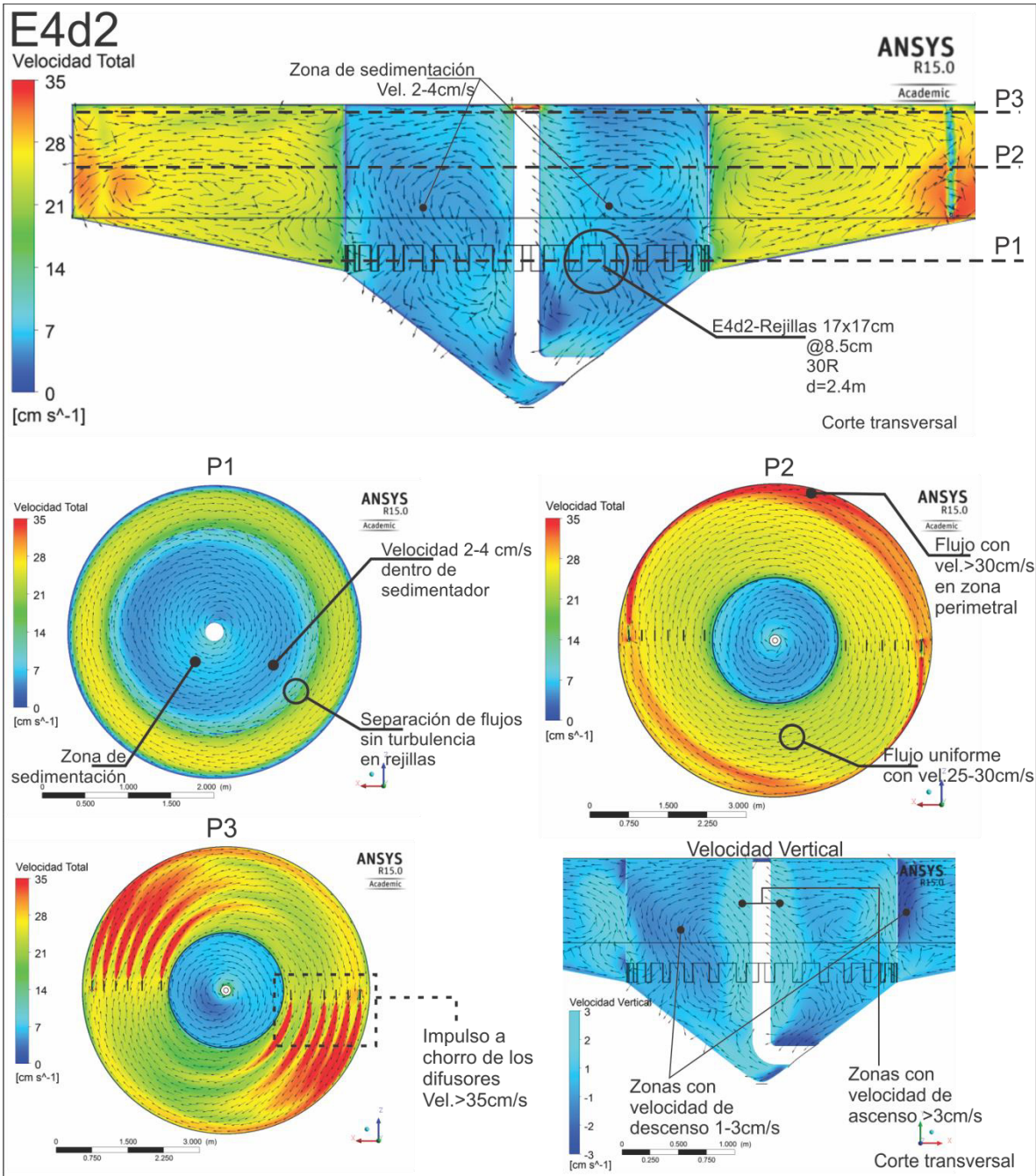


Ilustración 5.31 Contornos y vectores de velocidad, escenario E4d2.

5.4 Análisis de los resultados

En la primera etapa de simulación de los primeros 9 escenarios de operación del tanque, donde se tuvo distintos arreglos de rejillas del sedimentador, se pudo observar la influencia de estas en el comportamiento de flujo, principalmente en la zona de las rejillas donde el flujo del tanque entra a la zona del sedimentador. Con la variación del tamaño y distribución de rejillas se logró en primera instancia, disminuir significativamente la turbulencia en la zona de las rejillas y principalmente la velocidad dentro del sedimentador.

La Ilustración 5.32 muestra la diferencia del comportamiento del flujo que existe entre los 9 escenarios planteados y el escenario E0 (correspondiente a la estructura actual del sedimentador, sin rejillas), en el plano horizontal que atraviesa la zona de las rejillas. Puede notarse que en los escenarios E1 al E9 existen una separación de flujos, donde el flujo del tanque tiene velocidades de 20 - 30 cm/s, la cual disminuye significativamente dentro del sedimentador, alcanzando valores de 10 - 15 cm/s. Con ello se garantiza que al colocar una óptima distribución de rejillas al sedimentador se logra disminuir la velocidad del flujo dentro del sedimentador.

De igual manera, puede observarse que en los escenarios E1 - E4 de la Ilustración 5.32 existe poca o nula turbulencia en la zona de las rejillas. Esto se debe gracias a que las rejillas son pequeñas al igual que la separación entre ellas. Esto ayuda a romper la velocidad del flujo en el tanque de manera instantánea y sin turbulencia. Así, el flujo que ingresa por dichas rejillas a la zona del sedimentador ya entra con una velocidad relativamente baja y tiende a conservar dicha velocidad dentro del sedimentador, en un orden de los 7 - 10 cm/s.

Por otro lado, los escenarios E5 - E9 presentan una disminución gradual de la velocidad del flujo, y esta tiende a disminuir un poco más dentro del sedimentador. Sin embargo, en estos escenarios se presenta un poco de turbulencia ya que las rejillas son de tamaño relativamente grande, lo que provoca que no exista una separación del flujos de manera instantánea. Esto propicia que dentro del sedimentador se tengan velocidades relativamente altas, que aunque tienden a disminuir, se mantienen en un rango superior a los 10 cm/s.

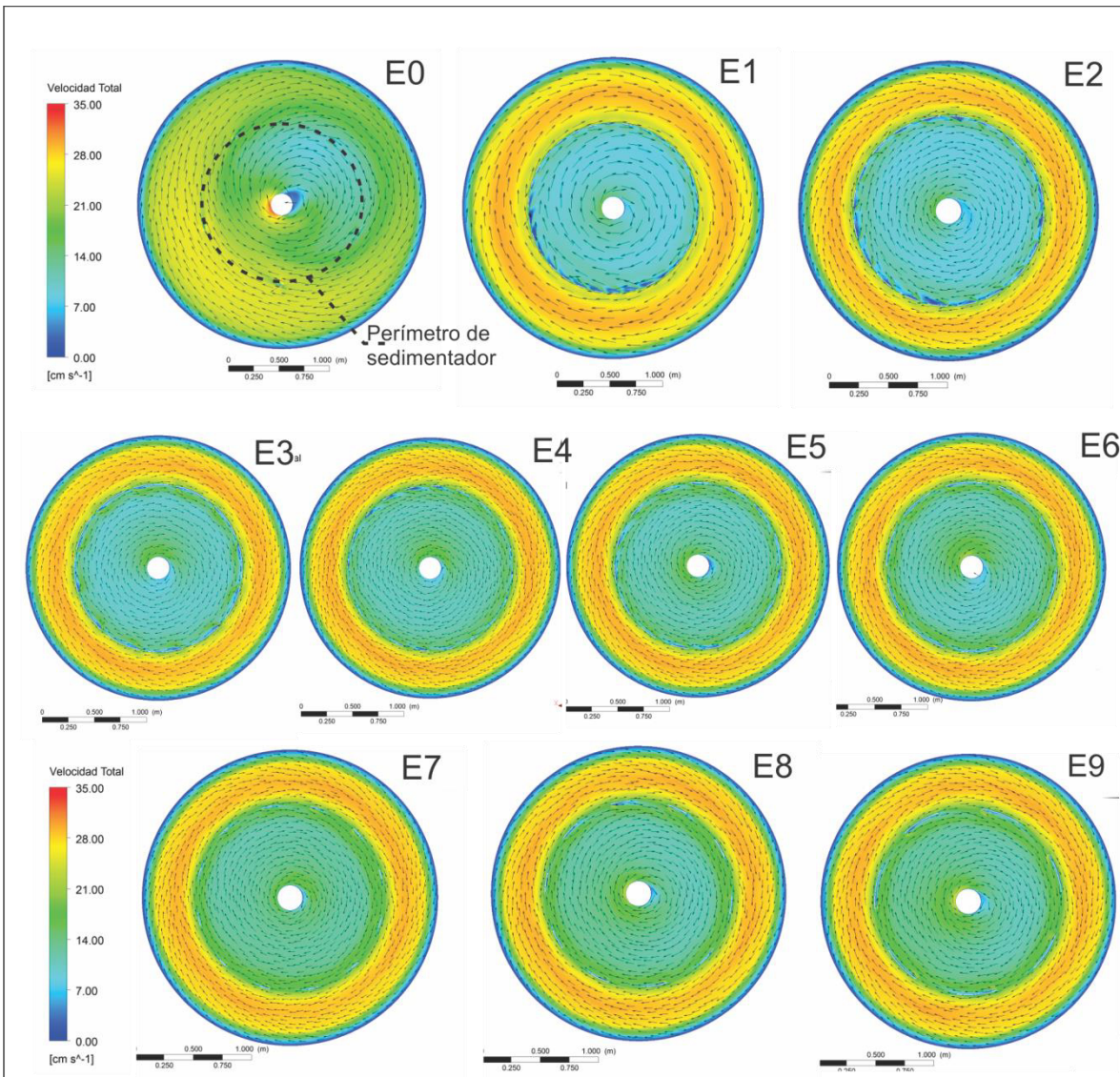


Ilustración 5.32 Comparativa del comportamiento del flujo en sedimentador para cada escenario, en la zona de rejillas.

Flores y López (2012) recomiendan un sedimentador con mayor número de rejillas para tener un flujo no turbulento y homogéneo dentro del sedimentador. Partiendo de ello y de lo observado en las primeras 9 simulaciones de escenarios planteados, se seleccionaron los escenarios E1, E2 y E4 para llevar a cabo la segunda fase de simulación. Estos escenarios cuentan con un número mínimo de 20 rejillas.

Así, para dichos escenarios se propuso la modificación del diámetro del sedimentador, aumentándolo de 1.6m (diámetro actual) a $d_1= 2.0$ y $d_2= 2.4$ m, teniendo así los 6 escenarios etiquetados como: E1d1, E1d2, E2d1, E2d2, E4d1 y E4d2. Al aumentar el diámetro del sedimentador para cada escenario, se mantuvo la distribución de las rejillas (tamaño y separación), por lo que únicamente aumentó el número de rejillas en el perímetro del sedimentador para cada escenario.

La Tabla 5.5 muestra las velocidades medias en el tanque y en el sedimentador, para cada uno de los 15 escenarios. Se muestra el aumento que se tuvo en la velocidad dentro del tanque, para cada escenario respecto a la velocidad presente en el escenario original E0. También se muestra la disminución de la velocidad dentro del sedimentador para cada escenario, respecto a la velocidad presente en el escenario original E0. Así mismo, se muestra el porcentaje equivalente de la velocidad dentro del sedimentador (VS) a la velocidad del tanque (VT). Es decir, entre menor sea este porcentaje, la velocidad del flujo en el sedimentador tiende a ser menor al de la velocidad del flujo en el tanque, siendo un parámetro idóneo para promover la eficiencia de sedimentación de partículas dentro del sedimentador.

Con lo descrito en la Tabla 5.5 se puede verificar que **los escenarios óptimos son el E1d1 y E1d2**. Esto debido a que la velocidad en el tanque es muy similar al del escenario E0, con valores medios de 25 cm/s. Estas velocidades aseguran un sano desarrollo y supervivencia de los peces, ya que se encuentran en un rango óptimo de velocidad de flujo para el nado de peces con tamaño de 10 - 20 cm de longitud, como lo describe Tenorio (2014), Summerfelt (2004) y Flores y López (2012).

Además, dichos escenarios fueron los que presentaron la menor velocidad total del flujo dentro del sedimentador de 2 - 3 cm/s y sin fenómenos de turbulencia. La velocidad vertical presente en los escenarios E1d1 y E1d2 es 1 – 2 cm/s. Este rango de velocidades promueve la sedimentación de partículas de forma natural en toda la sección y área del sedimentador, evitando el arrastre y re-suspensión de sólidos (García-Aragón et al., 2014).

Tabla 5.5. Variación de velocidades medias en el tanque y sedimentador, para cada escenario respecto al escenario original E0.

Escenario	Vel. Media en tanque (cm/s)	Variación de Vel. en tanque Respecto a E0	Vel. Media en sedimentador (cm/s)	Variación de Vel. en Sedimentador Respecto a E0	Relación VS/VT
E0	25	-	17	-	68%
E1	25	0%	8.5	50%	34%
E2	26	4%	8.5	50%	33%
E3	27.5	10%	8.5	50%	31%
E4	27.5	10%	10.5	38%	38%
E5	25.5	2%	10.5	38%	41%
E6	25.5	2%	10.5	38%	41%
E7	25.5	2%	10.5	38%	41%
E8	25.5	2%	13	24%	51%
E9	25	0%	17	0%	68%
E1d1	25	0%	2.5	85%	10%
E1d2	25	0%	2.5	85%	10%
E2d1	27.5	10%	4	76%	15%
E2d2	27.5	10%	3	82%	11%
E4d1	27.5	10%	4	76%	15%
E4d2	27.5	10%	3	82%	11%

La Ilustración 5.33 muestra la comparación de la velocidad media del tanque (VT), cuyo valor oscila entre 25 - 30 cm/s, y la velocidad media en el sedimentador (VS), con valores de 2.5 - 7 cm/s. Así mismo, se muestra de manera gráfica la relación VS/VT, esto para cada escenario en función del número de rejillas del sedimentador.

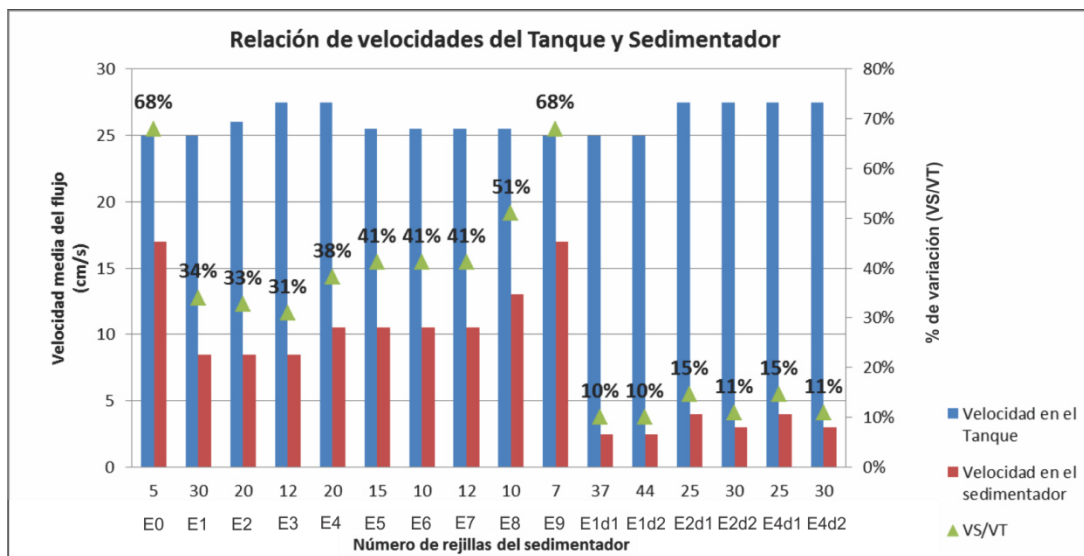


Ilustración 5.33 Relación de velocidad del flujo en el tanque y sedimentador

La Ilustración 5.34 muestra el comportamiento de la gráfica que describe la influencia del número de rejillas del sedimentador en la velocidad media (V_m) del flujo del sedimentador. Se observa que al tener un mayor número de rejillas, la velocidad media del flujo dentro del sedimentador tiende a disminuir significativamente. Esto corrobora lo propuesto por Flores y López (2012).

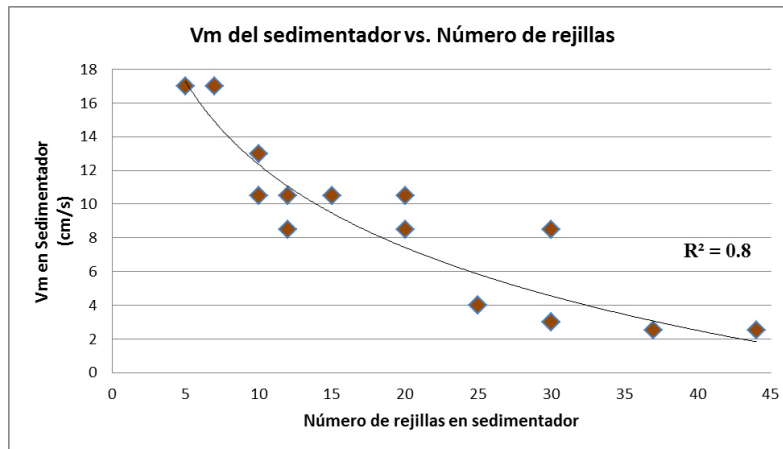


Ilustración 5.34. Comportamiento de la velocidad del flujo en el sedimentador, en función del número de rejillas.

Por otra parte, la Ilustración 5.35 muestra que no existe un impacto significativo de las rejillas en la velocidad media del flujo dentro del tanque. Con ello se establece que aunque exista una variación de rejillas en el sedimentador, el flujo dentro del tanque se mantiene en un rango óptimo para el desarrollo de los peces, que en este caso fue de 10-35 cm/s.

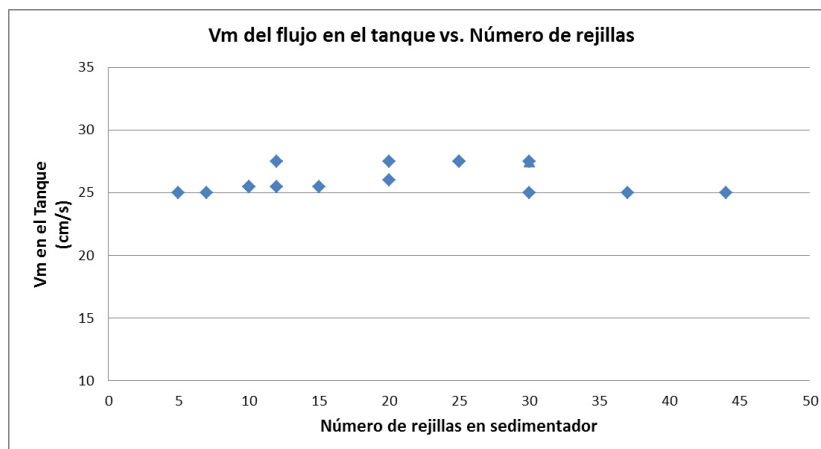


Ilustración 5.35. Comportamiento de la velocidad del flujo en el tanque, en función del número de rejillas

De lo anterior, se observa un cambio muy notorio y significativo en el comportamiento del flujo, principalmente dentro del sedimentador. La Ilustración 5.36 muestra el comportamiento del flujo en el plano vertical (corte) y horizontal (planta), para el escenario E1 bajo sus modificaciones realizadas (E1d1 y E1d2) y su comparación con el escenario original E0. La influencia de las rejillas entre el escenario E0 y E1 es muy notoria, ya que existe un gran cambio en la velocidad del flujo dentro del sedimentador. Sin embargo, el cambio más notorio se presentó el aumentar el diámetro del sedimentador para dicho arreglo de rejillas. En los escenarios E1d1 y E1d2 existe una velocidad máxima de 2 – 3 cm/s dentro del sedimentador. Esta velocidad se considera como aceptable, ya que es relativamente baja en comparación con la existente en el escenario actual E0. Además, tomando en cuenta la velocidad del flujo en el tanque de 15 - 25 cm/s, la velocidad dentro del sedimentador disminuye hasta en un 90% con la ayuda de las rejillas y el aumento de diámetro del sedimentador.

Los resultados obtenidos en los escenarios E1d1 y E1d2 son muy similares entre ellos, por lo que se podría decir que el diámetro del sedimentador de 2.4 m no tuvo un impacto significativo, tomando como referencia el escenario E1. Además, el escenario E1d1 con diámetro de sedimentador de 2 m, tienen una mayor área en el tanque, lo que beneficia a tener una mayor cantidad de peces en el tanque, no así con el escenario E1d2.

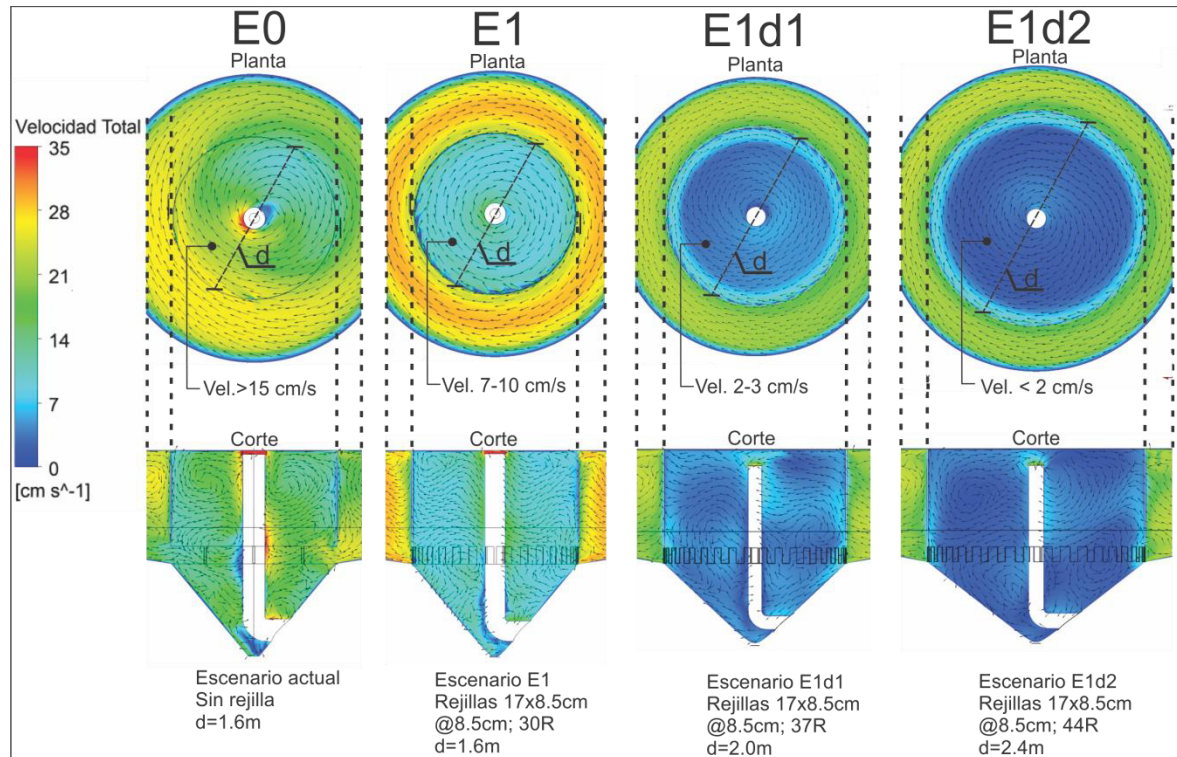


Ilustración 5.36 Comparativa del comportamiento del flujo en el tanque y sedimentador, escenarios E0 vs. E1; E1d1; E1d2.

Complementando los resultados del **escenario óptimo E1d1**, a continuación se muestran contornos, vectores y perfiles de velocidad en distintos planos dentro del tanque y del sedimentador. Esto con el fin de verificar y asegurar que dicho escenario presenta características hidráulicas ideales que beneficien en sano crecimiento y desarrollo de los peces, así como un ambiente idóneo que favorezca la remoción y sedimentación de partículas de manera natural principalmente dentro del sedimentador. Además, se muestra la comparación de éste escenario óptimo con el escenario adicional **E1d1a**, el cual se planteó suprimiendo el cono sedimentador con el fin de visualizar su efecto en el comportamiento del flujo dentro del sedimentador desde un punto de vista hidrodinámico.

Verificando lo recomendado por García-Aragón et al. (2014), la Ilustración 5.37 muestra la velocidad de ascenso presente dentro del sedimentador del escenario E1d1. Los contornos de velocidad se muestran en planos horizontales ubicados a cada 25 cm en la zona del cono y 20 cm en la zona del cilindro, medidos a partir del fondo del cono sedimentador.

Estos contornos de velocidad corresponden a la magnitud de la componente $-v$ - (en dirección vertical) de la velocidad total, ya que ésta representa la velocidad de ascenso y descenso del flujo. Puede observarse claramente que en ninguna zona del sedimentador la velocidad de ascenso rebasa los 2 cm/s, valor máximo con el cual las partículas logran sedimentar (García-Aragón et al., 2014). Además, en todos los planos mostrados existe velocidad de descenso de hasta 1 cm/s, lo cual beneficia en gran manera a la canalización de sedimentos a la zona del cono sedimentador.

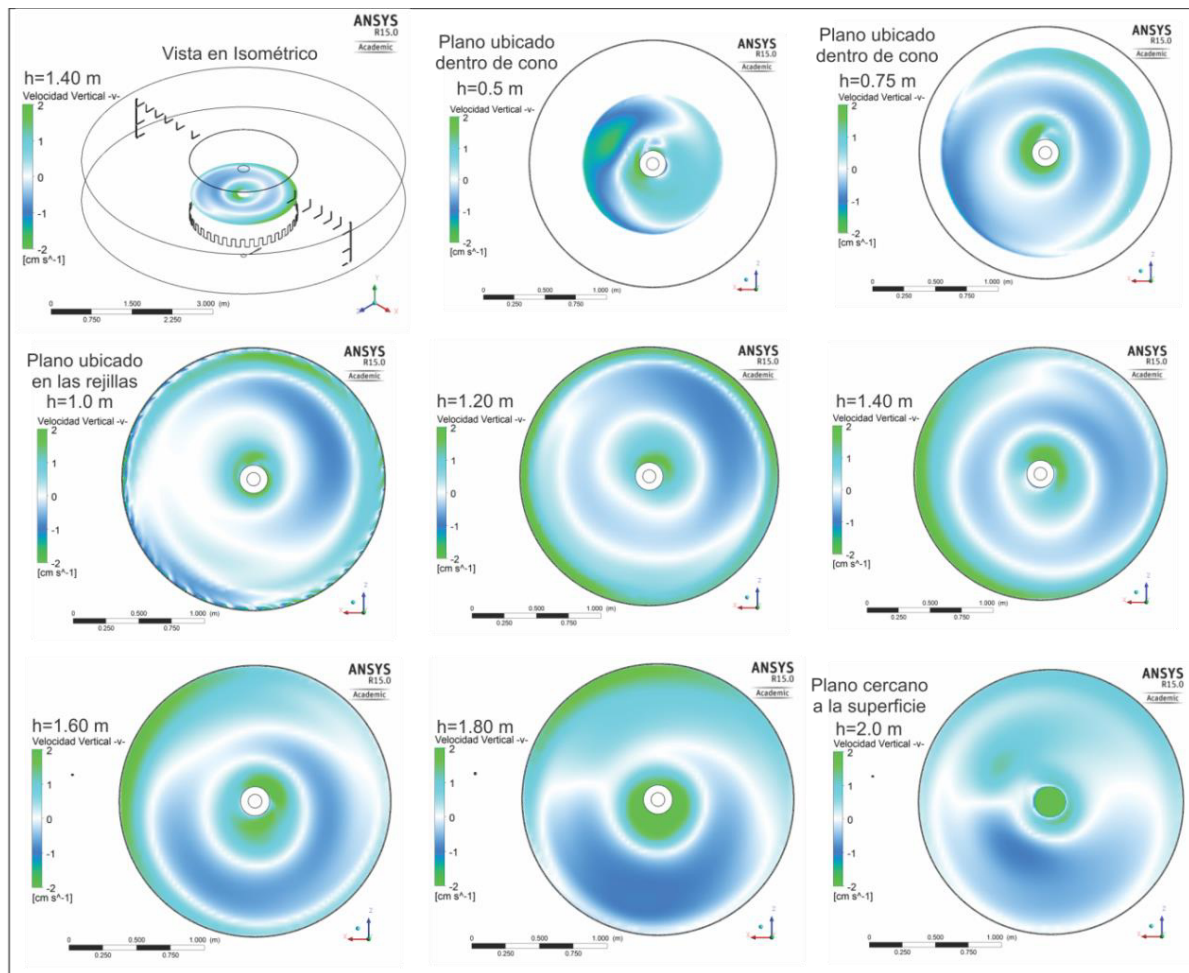


Ilustración 5.37 Comportamiento de la velocidad vertical $-v$ - en distintas alturas del sedimentador, escenario E1d1.

La Ilustración 5.38 muestra un plano cilíndrico vertical dentro en la zona central del sedimentador, donde se observa que la velocidad predominante del flujo es de 2.5 - 3 cm/s.

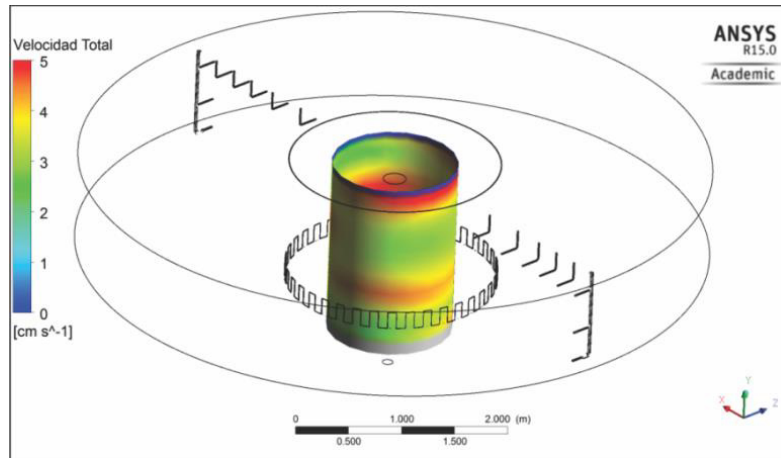


Ilustración 5.38 Contorno de velocidad, plano vertical al interior de sedimentador, E1d1.

La Ilustración 5.39 muestra un plano cilíndrico vertical dentro del tanque cercano a la zona periferal del sedimentador, donde puede observarse que la velocidad del flujo es de 15-25 cm/s.

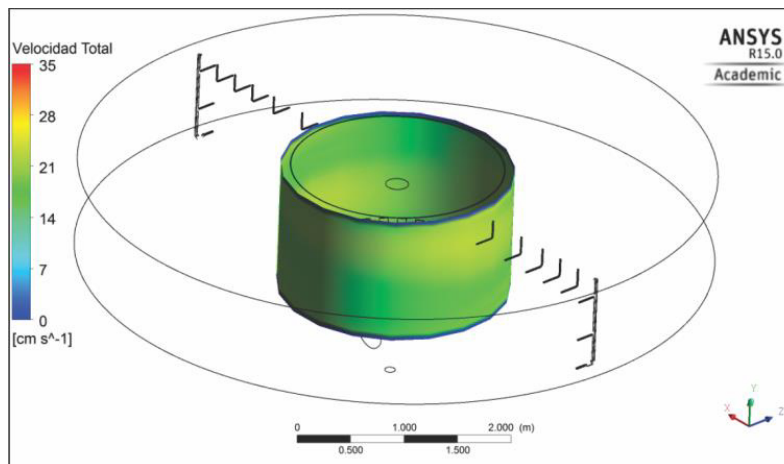


Ilustración 5.39 Contorno de velocidad, plano vertical en periferia externa de sedimentador, E1d1.

La Ilustración 5.40 muestra un plano cilíndrico vertical ubicado en la parte central del tanque, donde puede observarse que la velocidad del flujo es de 20-28 cm/s, con pequeños efectos de turbulencia provocados por los difusores.

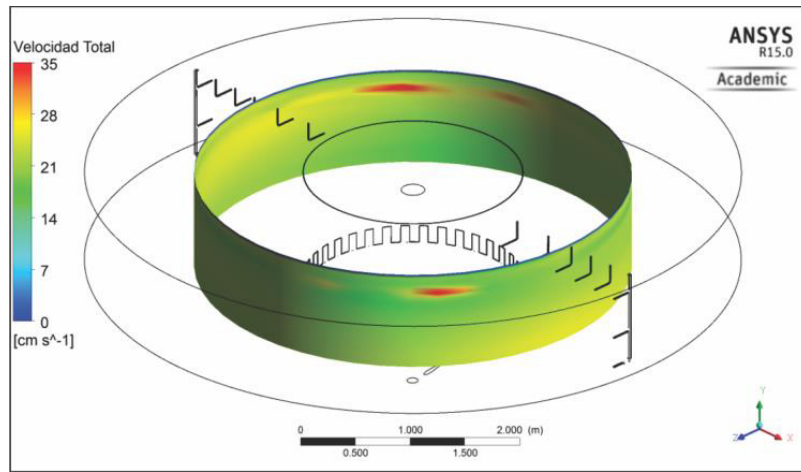


Ilustración 5.40 Contorno de velocidad, plano vertical al interior de sedimentador, E1d1.

La Ilustración 5.41 muestra un plano cilíndrico vertical ubicado cerca de la pared del tanque, donde se observan los patrones del flujo con velocidades de 25 - 35 cm/s, con efectos de turbulencia provocados por los difusores.

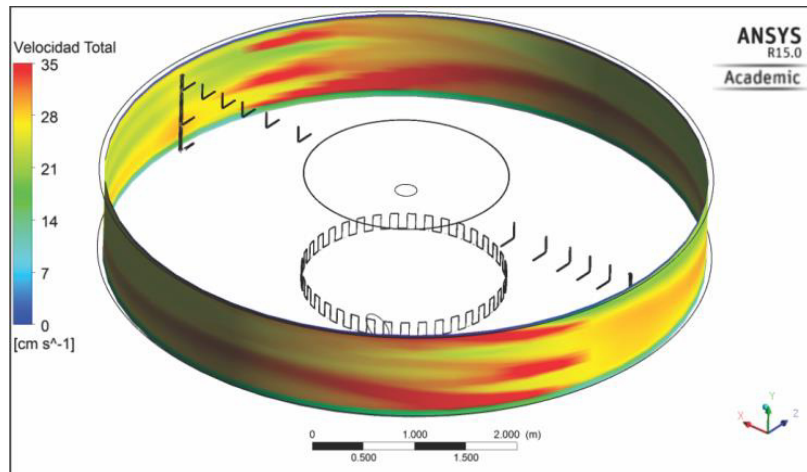


Ilustración 5.41 Contorno de velocidad, plano vertical al interior de sedimentador, E1d1.

La Ilustración 5.42 muestra los perfiles de velocidad en los planos ubicados en el interior del tanque y del sedimentador. Puede observarse los flujos de ascenso y descenso en cada zona.

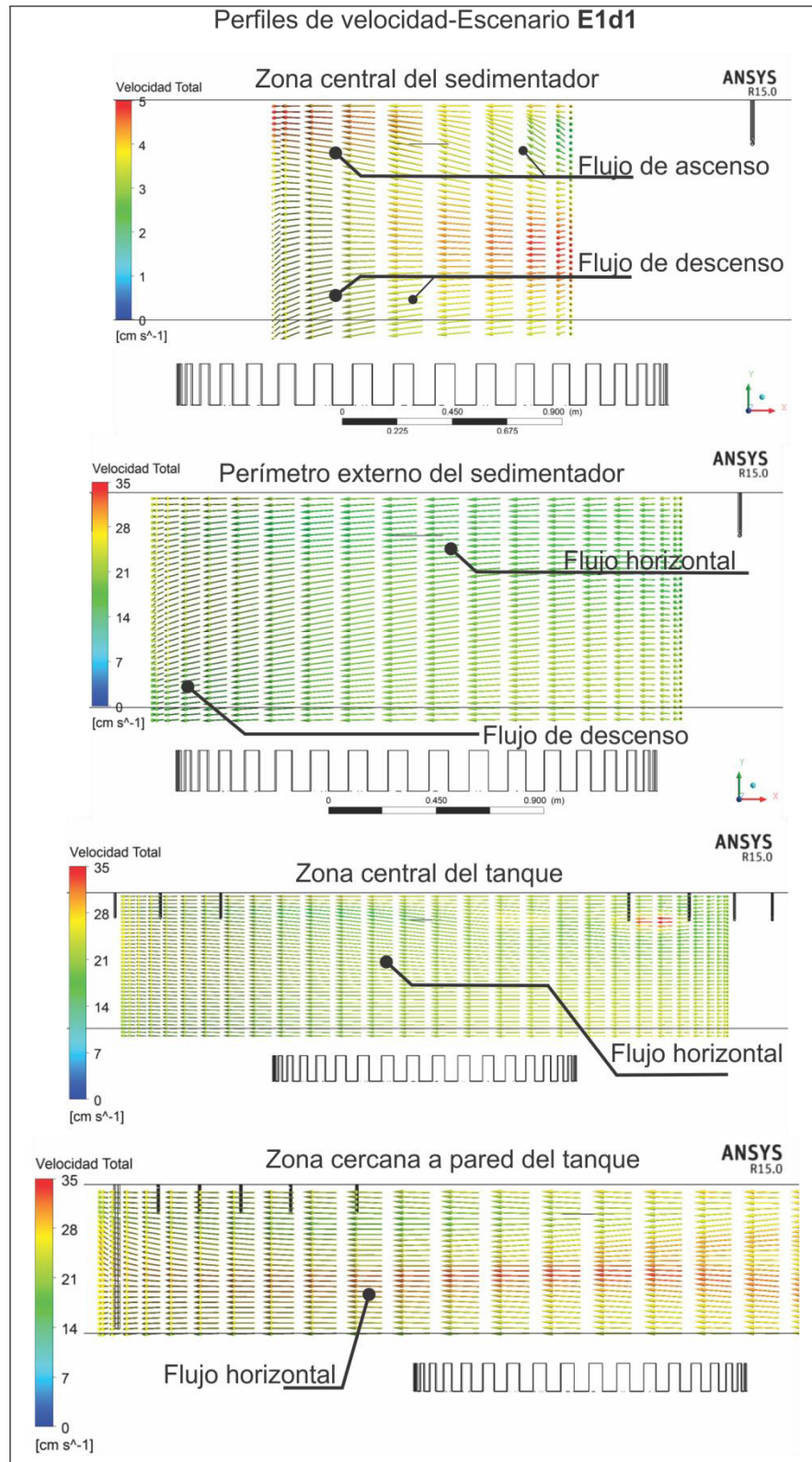


Ilustración 5.42 Perfiles de velocidad, planos vertical al interior del tanque y sedimentador, E1d1.

La Ilustración 5.43 muestra los contornos de la Energía Cinética, correspondiente a la turbulencia presente dentro del tanque, principalmente en el sedimentador. Puede observarse que para el escenario original E0 no existe gran turbulencia dentro del sedimentador. Esto es correcto ya que como se mostró en ilustraciones anteriores, en dicha zona se tiene una velocidad de flujo muy similar a la del tanque, del orden de los 15 cm/s, la cual se consideró un flujo no apto para la sedimentación de partículas.

Por otro lado, el escenario E1d1 presentó una disminución de velocidad inmediata en la entrada al sedimentador, como lo muestran las ilustraciones anteriores. Esto se justifica con lo mostrado en la Ilustración 5.43, donde se observa la disipación de la energía en la zona de las rejillas. Si bien, se tiene un flujo turbulento en esas pequeñas zonas, esto provoca la disminución de la velocidad dentro del sedimentador, hasta en un orden de 2 - 5 cm/s. Así, se garantiza que las rejillas sirven como disipadores de energía sin generar turbulencia significativa, promoviendo la disminución de la velocidad del flujo.

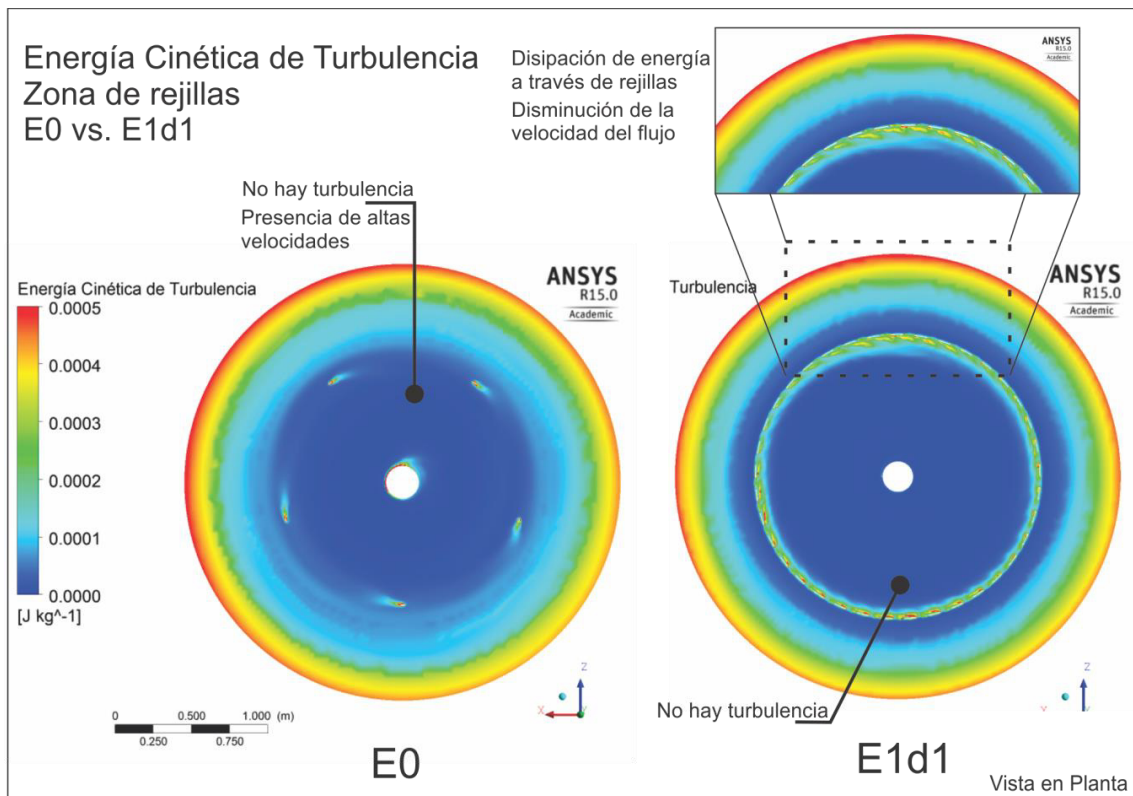


Ilustración 5.43 Contornos de Energía Cinética de Turbulencia, planos horizontales al interior del sedimentador, E0 vs. E1d1.

La Ilustración 5.44 muestra el cambio del comportamiento del flujo dentro del tanque y sedimentador, donde se hace notoria la mejoría en el escenario óptimo E1d1, cuyo sedimentador reporta energía de turbulencia cercana a cero. Mientras que en el escenario original E0 se tiene zonas con mayor turbulencia tanto en el tanque como dentro del sedimentador.

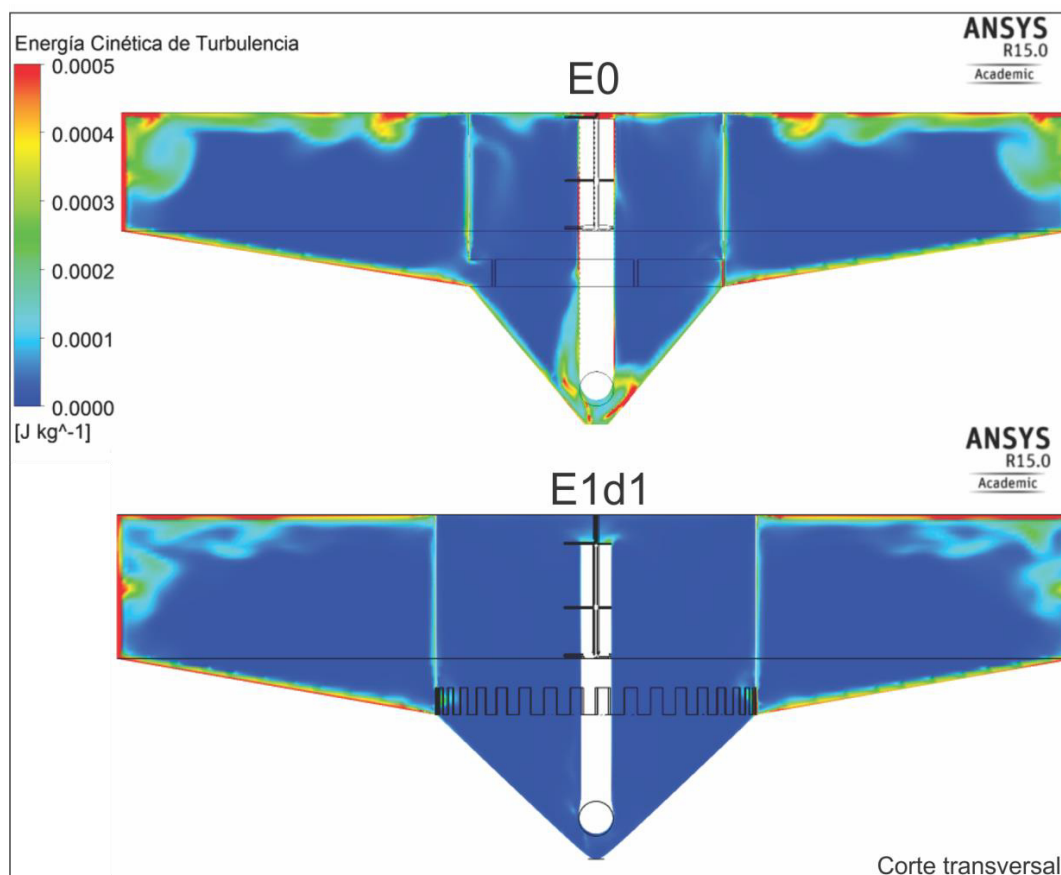


Ilustración 5.44 Contornos de Energía Cinética de Turbulencia, Cortes transversales del tanque y sedimentador, E0 vs. E1d1.

Como se describió anteriormente, el tanque de cultivo de “El Zarco” está conformado por un sedimentador cuyo fondo cónico permite la captación de sedimentos, evitando su recirculación dentro del tanque de cultivo. Para fines de comparación y para demostrar la importancia que tiene el cono sedimentador, se simuló un escenario adicional **E1d1a (sin cono sedimentador)**. Se realizó una comparación entre los patrones del flujo del escenario óptimo E1d1 y del **E1d1a (sin cono sedimentador)** (Ilustración 5.45).

Desde el punto de vista hidrodinámico, el cono beneficia significativamente a la reducción de velocidad dentro del sedimentador y por ende la captura de sedimentos. Puede notarse que en el tanque sin cono sedimentador se presentan velocidades de 5 – 7 cm/s dentro de sedimentador, la cuales no ayudan a la sedimentación de sólidos. No así en el escenario con cono sedimentador, donde se tiene una velocidad total de 1 – 2 cm/s. Además, el escenario E1d1a al no contar con el -cono sedimentador, las partículas que logran ingresar al sedimentador estarían en constante arrastre o re-suspensión provocado por el flujo que ingresa por las rejillas. Por otro lado, en el escenario con cono sedimentador presenta zonas con flujo de descenso, propiciando la canalización de partículas hacia el cono, el cual sirve como depósito de sedimentos para su posterior extracción.

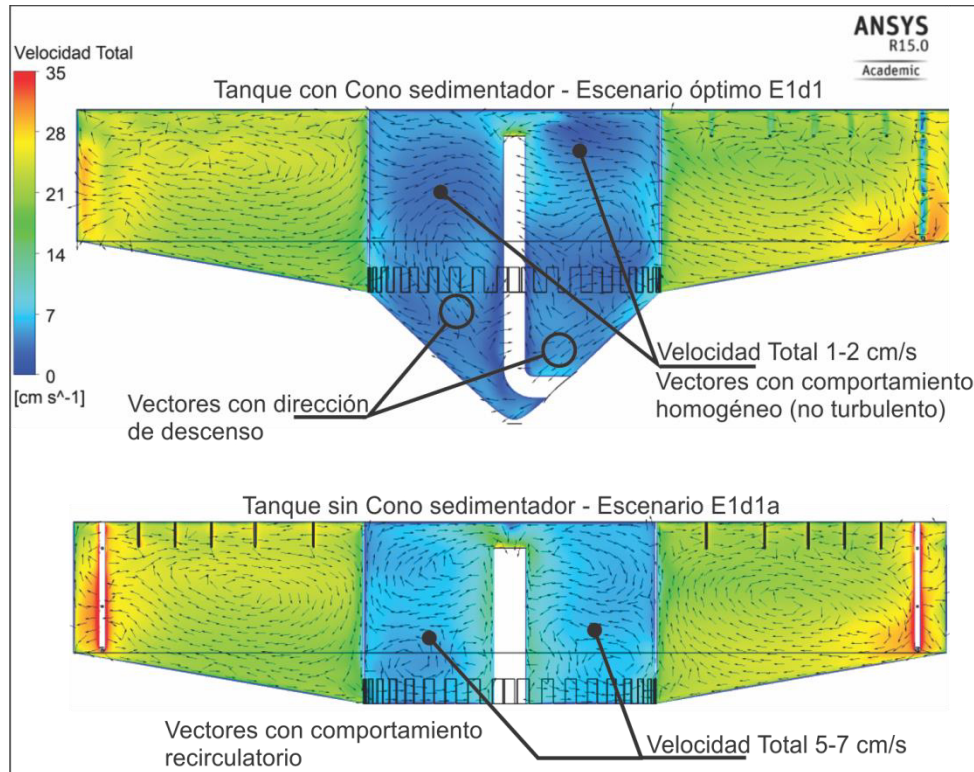


Ilustración 5.45 Velocidad total, cortes transversales del tanque y sedimentador, E1d1 vs. E1d1a.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con los resultados obtenidos en la simulación del tanque de cultivo de peces con recirculación de agua del caso de estudio “El Zarco”, se demuestra la importancia que tiene el uso de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en el análisis y evaluación hidrodinámica del tanque de recirculación, bajo condiciones de operación de diseño, a escala real. También se demostró el potencial y la importancia que tiene la aplicación de CFD, con el objetivo de optimizar y en su caso proponer alternativas de solución que mejoren el comportamiento del flujo del tanque en estudio.

CONCLUSIONES

Las conclusiones más relevantes de esta investigación son las siguientes:

- La aplicación de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) al estudio hidrodinámico de un tanque de recirculación de agua para su uso en acuicultura a escala real (caso de estudio “El Zarco”), permitió identificar de manera económica y factible, las características que debe cumplir la entrada de flujo (rejillas) al sedimentador, resultado de la simulación de diversos escenarios de operación. Y los resultados obtenidos se consideran de gran utilidad para el diseño de tanques de acuicultura. Demostrando así la importancia de uso de CFD en el diseño y/o evaluación de sistemas hidráulicos.

- La validación de los resultados obtenidos con CFD, es una etapa que garantiza la confiabilidad de su uso en la simulación de sistemas a escala real. En esta investigación se validó el software de CFD, con un modelo a escala con datos experimentales obtenidos con el sistema óptico de PIV (Flores y López (2012), obteniendo una diferencia máxima del 15% entre los datos experimentales y los calculados en la simulación.
- El análisis paramétrico realizado con CFD, de la relación entre las diferentes variables consideradas en el análisis hidrodinámico resultó de gran utilidad ya que se logró observar que existe un efecto significativo del flujo del tanque sobre el flujo en el sedimentador tipo hidrociclón, ocasionado principalmente por la relación de diámetros (tanque/sedimentador) y del tamaño y número rejillas en el sedimentador, fenómeno que se debe considerar en el diseño de tanques de cultivo con recirculación de agua.
- Para identificar las características hidrodinámicas idóneas del tanque de cultivo es importante considerar el tipo de sedimento y tamaño de partículas, para que la velocidad vertical en el sedimentador sea menor a la velocidad de caída de los sedimentos. En el caso de la presente investigación la velocidad obtenida fue ≤ 2 cm/s en el escenario óptimo, cumpliendo con la velocidad de caída de partículas recomendada por García-Aragón et al. (2014) para diámetros medios de partículas de hasta 300 micrones presentes dentro de los tanques de acuicultura de las mismas características.
- Para garantizar un adecuado funcionamiento hidrodinámico del tanque con características adecuadas para el cultivo de los peces y con condiciones que garanticen una buena sedimentación en el sedimentador central, se obtuvo que la relación óptima de diámetros tanque/sedimentador (D/d) es de 3:1.

- En la simulación del tanque de cultivo “El Zarco”, se demostró que las rejillas perimetrales en el sedimentador actúan como disipadoras de energía, por lo que es importante definir su distribución óptima que permitan disminuir la velocidad del flujo en el sedimentador. En caso de estudio se logró reducir la velocidad del sedimentador hasta en un 90% respecto a la velocidad del flujo dentro del tanque.

- Para garantizar la sedimentación de sólidos dentro del tanque sedimentador, la velocidad de ascenso del agua debe ser menor a 2 cm/s, esto se logra con un arreglo óptimo de las rejillas perimetrales en el sedimentador, considerando como recomendación, que se cumpla que el ancho de rejilla (b_r) sea 0.5 veces la altura de rejilla (h_r) y que la separación entre rejillas (S_r) sea igual al ancho de rejilla (b_r). Siempre que la altura de rejilla h_r no exceda el 20% de la altura del agua en el tanque.

- El escenario óptimo E1d1, fue el que mejor comportamiento del flujo presentó. Dicho escenario se propuso con un diámetro del sedimentador de 2.0 m, y rejillas perimetrales de 17 x 8.5 cm, separadas entre sí a cada 8.5 cm. Con dichas modificaciones se logró tener un flujo en el tanque con velocidades de 15 - 25 cm/s, ideales para el sano crecimiento y desarrollo de los peces. Además, dentro del sedimentador se presentaron velocidades en un rango de 1 - 2 cm/s, mucho menores a las presentes en el escenario actual del tanque mayores a 10 cm/s. Así, con las velocidades de hasta 2 cm/s dentro del sedimentador, se propicia un flujo que promueve la sedimentación de partículas, evitando la re-suspensión y arrastre de las mismas.

RECOMENDACIONES

Realizar una simulación del escenario óptimo aplicando flujo bifásico y rastreo de partículas por medio de CFD, para estimar las concentraciones y trayectorias de los sólidos dentro del tanque, principalmente en el sedimentador, estimando la tasa de transporte y la eficiencia de sedimentación. Dentro de la simulación se debe considerar que las partículas representen a los sedimentos producto de los restos de alimentos, heces fecales, etc. Esto con el fin de analizar su arrastre dentro del tanque y/o su deposición en el fondo y zona del sedimentador.

Mediante un análisis paramétrico con CFD, realizar un estudio hidrodinámico de tanques de cultivo de peces con recirculación, considerando la variación del diámetro de los difusores de entrada del flujo. Con ello, analizar la tasa de intercambio de agua dentro del tanque, para optimizar el caudal de entrada al sistema logrando mantener las condiciones idóneas para el desarrollo de los peces con el mínimo volumen de agua utilizado.

Realizar un análisis hidrodinámico del tanque mediante CFD, considerando diferentes relaciones de diámetro/tirante (D/h) y distintos ángulos de inclinación del fondo del tanque. Con el fin de generalizar los parámetros de diseño, así como el impacto que tienen en el comportamiento del flujo dentro del tanque y en los procesos de sedimentación y remoción de sólidos.

BIBLIOGRAFÍA

- Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), NPARC Alliance Verification and Validation, archivo electrónico de www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/archive.html
- ANSYS, Inc. Fluid Dynamics Manual (2014). Manual de Usuario ANSYS R15.
- Boussinesq, J. (1868). Memories sur l'influence des drottements dans les mouvements reguliers des fluids, J. Math Oures Appl., 13:377.
- Brown, L. and Jacobsen, F. (2009, 3 de septiembre). Optimise tank design using CFD. Investigación presentada en 72nd Annual Water Industry Engineers and Operators' Conference. Resumen recuperado el 15 de noviembre de 2013, de <http://www.openfoam.com/>
- Burrows, R., Chenoweth, H., (1955). Evaluation of Three Types of Fish Rearing Ponds, Research Report 39. US Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, Washington, DC, pp. 29.
- Burrows, R.E., Chenoweth, H.H. (1970). The rectangular circulating pond. The Progressive Fish-Culturist 32 (2), pp. 97-80.
- Camp, T.R. (1936). A study of the rotational design of settling tanks. Sewage Work Journal, 742-758.
- Chen, S., Timmons, M. B., Aneshansley, D. J. and Bisogni, J. J. (1993). Suspended solids characteristics from recirculating aquacultural systems and design implications. Aquaculture, 112, 143-155.
- Cripps, S.J. and Bergheim, A. (2000). Solids Managment and removal for intensive land-based aquaculture production systems. Aquacultural Engineering, 22, 33-56.
- Davidson, J. and Summerfelt, S. (2004). Solids flushing, mixing, and water velocity profiles within large (10 and 150 m³) circular "Cornell-type" dual-drain tanks. Aquacultural Engineering, 32, 245-271.
- Ebeling, J.M., Timmons, M.B., Joiner, J.A. and Labatut, R.A., (2005). Mixed-Cell Raceway: Engineering Design Criteria, Construction, Hydraulic Characterization. In Press: North American Journal of Aquaculture.

- Flores Gutiérrez, L.M. y López Rebollar, B.M. (2012). Análisis Hidrodinámico de un sistema de recirculación de agua para uso en acuicultura, utilizando técnicas ópticas, PIV y PTV. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Centro Interamericano de Recursos del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, Estado de México.
- Gallego Alarcón, I. (2010). Evaluación y modelación de un tren de tratamiento de agua residual acuícola con recirculación y del cultivo de trucha arco iris alimentado por cosecha pluvial. Tesis de doctorado. CIRA, Facultad de Ingeniería, UAEM. México.
- García-Aragón, J.A., Salinas-Tapia, H., Díaz-Palomares, V., López-Rebollar, B.M., Moreno-Guevara, J. y Flores-Gutierrez, L.M, (2014). Criterios hidrodinámicos para el diseño de sistemas de recirculación en acuicultura. *Tecnología y Ciencias del Agua*. Vol. 5, núm. 5, pp. 63-76.
- García P.D. (1999). Planta experimental de tratamiento de aguas residuales por medios biológicos”. Tesis para la obtención de grado de maestría. CIRA, Facultad de Ingeniería, UAEM. México
- Goula, A.M., Kostoglou, M., Karapantsios, T.D. and Zouboulis, A.I. (2008). A CFD methodology for the design of sedimentation tanks in potable wáter treatment Case study: The influence of a feed flow control baffle. *Chemical Engineering Journal*, 140, 110-121.
- Hazen, A. (1904). On sedimentation. *Transaction. American Society of Civil Engineers (ASCE)*, 53, 45-71.
- Hydraulic Design Criteria de la U.S (1961). Army Engineer Waterways Experiment Station. Vickburg, Mississippi.
- Jer-Vui, L., Joo-Ling, L., Yea-DatChuah, Pek-Yee, T., Young-Chai, T. and Chen-How, W. (2013). The design of a culture tank in an automated recirculating aquaculture system. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2 (2).
- Kubitza, F. (2006). Sistemas de recirculación cerrada. Recuperado el 15 de noviembre de 2013, del sitio Web del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina: <http://www.minagri.gob.ar/SAGPyA/pesca/acuicultura/>
- Labatut, R.A., Timmons, M.B., Ebeling, J.M. and Bhaskaran, R., (2006). Experimental Evaluation of the Effects of Nozzle Diameter and Effluent Withdrawal Strategy on Tank Hydrodynamics in a Large-Scale Mixed-Cell Raceway (MCR). In press: *Aquacult. Eng.*

- Larmoyeux, J.D., Piper, R.G., Chenoweth, H.H. (1973). Evaluation of circular tanks for salmonid production. *The Progressive Fish-Culturist* 35 (3), pp. 122-131
- Larsen, P. (1977). On the hydraulics of rectangular settling basins, Report No. 1001, Department of Water Research Engineering, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.
- Lauder, B.E., Spalding, D.B. (1974). The numerical computation of turbulent flows, *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, 3:269-289.
- Liu, X. and García, H. M. (2011). Computational Fluid Dynamics Modeling for the Design of large Primary Settling Tanks. American Society of Civil Engineers.
- Losordo, T.M. and Westers, H. (1994). System carrying capacity and flow estimation. En: Timmons, M.B., Losordo, T.M. (Eds.), *Aquaculture Water Systems: Engineering Design and Management*. Elsevier, New York, 9-60.
- Losordo, T.M., Hobbs, A.O., DeLong, D.P. (2000). The design and operational characteristics of the CP&L/EPRI fish barn: a demonstration of recirculating aquaculture technology. *Aquaculture Engineering*, 22, 3–16.
- Lunger, A., Rasmussen, M.R., Laursen, J., and McLean, E., (2006). Fish stockin density impacts tank hydrodynamics. *Aquacult. Eng.* 254, pp. 370-375
- Maher, A.R. Sadiq Al-Baghdali (2011). “Engineering Applications of Computational Fluid Dynamics, Volume 1”. Energy Environment. International Energy and Environment Foundation.
- Mäkinen, T., Lindgren, S., Eskelinen, P., (1988). “Sieving as an effluent treatment method for aquaculture”. *Aquaculture Engineering* 7, pp. 367–377.
- Nicholas, A. P., and Smith, G. H. S. (1999). “Numerical Simulation of three dimensional flow hydraulics in a braided channel”. *Hydrological processes* (13), pp. 913-929.
- Oca, J., Masaló, I., (2007). “Design criteria for rotating flow cells in rectangular aquaculture Tanks”. *Aquacult. Eng.* 36, pp. 36–44.
- Paul, T. C., Sayal, S. K., Sakhuja, V. S., Dhillon, G. S. (1991) Vortex-settling basin design considerations. *J. Hydraulic Eng.* 117, pp. 172–189.
- Peterson, E.L., Harris, J.A., Wadhwa, L.C. (1999). CFD modelling pond dynamic processes. *Aquaculture Engineering* 23 (2000), pp. 61-93. School of Engineering and the Cooperative Research Centre for Aquaculture, James Cook University, Townsville, Australia.

- Potter, M. C. y Wiggert, D. C., (2002). “Mecánica de fluidos”, 3ª Ed. México. Thompson, pp. 769.
- Rasmussen, M.R., Laursen, J., Craig, S.R. and McLean, E., (2005). Do fish enhance tank mixing. *Aquacult. Eng.* 250, pp. 162-174.
- Salinas-Tapia, H., Flores-Gutierrez, L. y López-Rebollar, B.M. (2012). Aplicación de Técnicas no Invasivas, para determinar el Comportamiento Hidráulico de un Tanque de Recirculación de Agua. *Memorias de Congreso. XXII Congreso Nacional de Hidráulica. Acapulco, Gro, Noviembre de 2012.*
- Shamber, D.R., Larock, B.E. (1981). Numerical analysis of flow in sedimentation basins, *Hydraulic Division ASCE*, 107 (5), 575–591.
- Summerfelt, S., Wilton, G., Roberts D., Rimmer, T. y Fonkalsrud, K. (2004). Developments in recirculating systems for Arctic char culture in North America. *Aquacultural engineering*, 30, 31–71.
- Tenorio Zolá, M.R. (2014). Evaluación de la eficiencia de un sedimentador de alta tasa inserto en el estanque de cultivo en un sistema de recirculación acuícola (SRA). Tesis de Maestría. CIRA, Facultad de Ingeniería, UAEM. México.
- Timmons, M.B. and W.D. Youngs. (1991). “Considerations on the design of raceways”, from ASAE Special Publication #701: *Aquaculture Systems Engineering*, Proceedings from World Aquaculture Society, World Aquaculture 91, June, San Juan, Puerto Rico, pp. 15-22.
- Timmons, M.B. and Losordo, T.M. (1994). *Aquaculture Water Reuse Systems: Engineering Design and Management (1ª Ed)*. Cornell University, Ithaca, NY, USA: Elsevier Science.
- Timmons, M. B., Summerfelt, S. T. and Vinci, B. J. (1998). Review of circular tank technology and management. *Aquacultural Engineering*, 18, 51-69.
- Tu, Jiyun, Yeoh, Guan-Heng and Liu, Chaoqun (2013). “Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach, 2nd Edition”. Elsevier. Butterworth-Heinemann. ISBN: 978-0-08-098243-4.
- Tvinnereim, K., Skybakmoen, S. (1989). “Water exchange and self-cleaning in fish rearing tanks”. In: *Aquaculture – A Biotechnology in Progress*, European Aquaculture Society, Bredene, Belgium.
- Watten, B.J., Honeyfield, D.C., Schawartz, M.F. (2000). Hydraulic characteristics of a rectangular mixed-cell rearing unit. *Aquacult. Eng.* 24, pp. 59-73.

- Wheaton, F.W., (1977). *Aquaculture Engineering*. New York: Wiley-Interscience.
- Wu, W., Rodi, W., and Wenka, T. (2000). 3D Numerical modeling of flow and sediment transport in open channels. *Journal of hydraulic engineering* (126), pp. 4-15.
- Xu, Qing (2010). *Internal Hydraulics of baffled disinfection contact tanks using Computational Fluid Dynamics*. Thesis of Master of Science degree. Fort Collins, Colorado, Summer 2010.
- Yoon, H.T. and Lee, O.S. (2000). Hydraulic Behavior and Removal Efficiency of Settling Tanks. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 4 (1), 53-57.