



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL - HIDRÁULICA

EVALUACIÓN DE UN SEDIMENTADOR DE ALTA TASA CON UN MODELO DE
DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (DFC).

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA.

PRESENTA

ING. ALEJANDRO ORDOÑEZ SÁNCHEZ

TUTOR PRINCIPAL

DR. ARIOSTO AGUILAR CHÁVEZ
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

MÉXICO, D.F. OCTUBRE 2015

JURADO ASIGNADO:

Presidente	M.I. José Alfredo González Verdugo
Secretario:	M. I. Edmundo Pedroza González
1er. Vocal:	Dr. Ariosto Aguilar Chávez
2do. Vocal	Dr. Víctor Manuel Arroyo Correa
3er. Vocal:	Dra. Sofía Esperanza Garrido Hoyos

Lugar donde se realizó la tesis:

Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería UNAM.
Campus Morelos-IMTA.
Jiutepec, Morelos.

Tutor de la tesis:

Dr. Ariosto Aguilar Chávez

Firma

AGRADECIMIENTOS

Δ

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

Por brindarme la oportunidad de realizarme como Maestro en el área de la ingeniería Civil/Hidráulica. Por estar al servicio del país y de la humanidad.

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

Por proporcionar apoyo educativo y económico mediante sus programas de becas nacionales, que motivan a los estudiantes de nivel licenciatura, a continuar con su desarrollo profesional y tecnológico.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)

Por facilitar a la UNAM sus instalaciones para que se mantenga el Campus Morelos. Por ser el recinto de especialistas-profesores que hacen posible la transmisión del conocimiento.

Dr. Ariosto Aguilar Chávez

Por aceptar, ser mi tutor principal. Por su paciencia, esfuerzo, tiempo, dedicación y excelente disposición para que un servidor lograra terminar en tiempo y forma el presente documento. Excelente tutor.

Ing. Nicolás Corte Trujillo

*De quien recibí las primeras clases de álgebra,
Quien me recuerda que el éxito es proporcional al esfuerzo,
De quien he recibido apoyo moral y académico para concluir este ciclo profesional,
Quien me mostró que el conocimiento es una buena manera comprender los aspectos fundamentales de la vida. Por esto y más, gracias Tío.*

DEDICATORIA

CON TODO EL AMOR Y CARIÑO PARA:

*MIS PADRES Y HERMANA,
MI ESPOSA E HIJOS*

QUIENES SON TODO PARA MI

CONTENIDO

RESUMEN	12
Capítulo 1 . INTRODUCCIÓN	13
1.1 Planteamiento del problema	19
1.2 Justificación	20
1.3 Antecedentes	21
Capítulo 2 . TEORIA DE TANQUES SEDIMENTADORES	23
2.1 Tanque ideal de sedimentación	23
2.2 Tanque Circular	25
2.3 Tanque sedimentador de alta tasa o de flujo laminar	26
2.4 Indicadores fundamentales para el diagnóstico hidráulico	27
2.4.1 Tiempo de residencia τ	28
2.4.2 Velocidad del fluido v_f	28
2.4.3 Número de Reynolds (Re)	28
2.4.4 Carga superficial CS	29
2.4.5 Carga superficial para tanques de alta tasa (v_{sc})	29
2.2 Tipos de flujo en las unidades de tratamiento	32
2.2.1 Flujo Pistón	32
2.2.2 Flujo mezclado	33
2.2.3 Flujo no ideal	33
2.3 Criterios de diseño	34
Capítulo 3 . CONFIGURACIÓN Y EVALUACIÓN DEL SEDIMENTADOR DE ALTA TASA	36
3.1 Diseño actual	36
3.1.2 Zona de entrada	37
3.1.3 Zona de sedimentación	39
3.1.4 Zona de lodos	40
3.1.5 Zona de salida	41
3.2. Evaluación teórica	42
3.2.1 Revisión del sistema convencional	43
3.2.2 Revisión del sistema de alta tasa	44
3.3 Determinación de eficiencia de un sedimentador	45

3.3.1 Metodología en campo.....	47
Capítulo 4 . MODELACION CON DINÁMICA DE FLUIDOS (DFC)	50
4.1 Pre-proceso	50
4.1.1 Elaboración de archivo STL.....	50
4.1.2 Origen y ejes referencia para modelación.....	51
4.1.3 Entrada al sedimentador	52
4.1.4 Salida del sedimentador	52
Capítulo 5 . RESULTADOS DE MODELACION	53
5.1 Prototipo original	53
5.2 Zonas muertas en la entrada	54
5.3 Zonas muertas en placas.....	56
5.3.1 Número de Reynolds en placas	57
5.4 Tiempo de residencia global	61
5.5 Tiempo de residencia en elementos inclinados.....	64
5.5 Análisis de velocidades en muro difusor (orificios)	67
Capítulo 6 . PROPUESTA DE MEJORA AL DISEÑO ORIGINAL.....	71
6.1 Escenarios de modelación	72
Capítulo 7 . RESULTADOS.....	89
7.1 Escenario propuesto como mejora al sistema	89
CONCLUSIONES	97
RECOMENDACIONES PARA SIGUIENTES EVALUACIONES.....	98
ANEXO A. Isocontornos de velocidades entre placas.	99
ANEXO B. Isocontornos de velocidades en orificios de entrada.	102
BIBLIOGRAFÍA	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Resumen de las plantas potabilizadoras municipales en operación por proceso (CONAGUA, 2011).	13
Tabla 1.2. Ventajas y desventajas del DFC.	18
Tabla 1.3. Estado del arte en modelación de DFC.....	21
Tabla 2.1. Parámetros y ecuaciones principales de tanques sedimentadores comunes.	31
Tabla 2.2. Criterios de diseño para tanque rectangular convencional	34
Tabla 2.3. Criterios de diseño para tanque rectangular de alta tasa.	35
Tabla 4.1. Coordenadas del vértice superior derecho, de vertedores de salida. .	52
Tabla 5.1. Condiciones iniciales para simulación del fluido.....	53
Tabla 5.2. Repetitividad de números de residencia en segundos, diseño original.	63
Tabla 7.1. Identificadores para escenario.	89
Tabla 7.2. Desempeño laminar por escenario.....	90
Tabla 7.3. Revisión de la mediana por escenario.	91
Tabla 7.4. Revisión de desviación estándar por escenario.	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Resumen de plantas potabilizadoras, por caudal potabilizado; CONAGUA (2011).....	14
Figura 1.2. Tren convencional de tratamiento.....	14
Figura 1.3. Clasificación general de sedimentadores.	16
Figura 1.4. Visualización de trayectorias del flujo mediante DFC.	17
Figura 2.1. Tanque ideal de sedimentación.	24
Figura 2.2. Trayectoria de partícula discreta en zona de sedimentación, tanque ideal.	24
Figura 2.3. Sedimentador circular, vista en planta.	25
Figura 2.4. Trayectoria de partícula discreta en sedimentador circular.	25
Figura 2.5. Relaciones geométricas en un sedimentador inclinado.	27
Figura 2.6. Representación gráfica de flujo pistón.	32
Figura 2.7. Representación gráfica del flujo mezclado.	33
Figura 2.8. Representación gráfica del flujo no ideal.	33
Figura 3.1. Isométrico del sedimentador de alta tasa.	37

Figura 3.2. Sección transversal del sedimentador.	38
Figura 3.3. Configuración del muro difusor (orificios) vista frontal.....	38
Figura 3.4. Vista en planta de la zona de placas.	39
Figura 3.5. Configuración zona de placas, vista frontal.	39
Figura 3.6. Soportes para placas.....	40
Figura 3.7. Vista en planta de la zona de lodos (tolvas).	40
Figura 3.8. Vista frontal de sedimentador.	41
Figura 3.9. Vista en planta de canaleta de salida o efluente del sedimentador....	41
Figura 3.10. Corte transversal de la zona de vertedores de salida.	42
Figura 3.11. Modelo físico de sedimentador de alta tasa.....	45
Figura 3.12. Organigrama para determinar eficiencia de sedimentador.....	46
Figura 3.13. Curvas típicas de concentración en el tiempo de sustancia trazadora.	47
Figura 3.14. Concentración de trazador en el efluente de un sedimentador.	48
Figura 4.1. Formato Stereo Lithography (STL), vista frontal.	51
Figura 4.2. Sistema coordinado para simulación.	51
Figura 5.1. Entrada prototipo original, vista en planta.....	54
Figura 5.2. Campos de flujo, plano z (vista en planta), prototipo original;.....	55
Figura 5.3. Zonas muertas en la entrada (vista en planta).....	56
Figura 5.4. Zonas muertas en placas (isocontornos)	57
Figura 5.5. Zonas muertas en placas (vectores).....	57
Figura 5.6. Campos de flujo entre placas.	58
Figura 5.7. Matriz origen.....	59
Figura 5.8. Representación gráfica del Número de Reynolds.....	59
Figura 5.9. Secuencia de los campos de flujo.	59
Figura 5.10. Número de Reynolds diseño original.	60
Figura 5.11. Análisis tiempo de residencia diseño original.....	62
Figura 5.12. Análisis de frecuencias de tiempos de residencia original.	64
Figura 5.13. Módulos de alta tasa tubulares.	65
Figura 5.14. Tiempo de residencia en placas.	66
Figura 5.15. Secuencia de análisis de evaluación del ingreso en los orificios.	67
Figura 5.16. Sentido de análisis de orificios de entrada.....	68
Figura 5.17. Curva de velocidades máximas en entrada	69

Figura 6.1. Escenarios de modelación, vista en planta.	72
Figura 6.2. Evaluación de comportamiento hidráulico del diseño original.	73
Figura 6.3. Número de Reynolds entre placas campo 10 y 70 (diseño original). .	75
Figura 6.4. Centros de clase, diseño original.	76
Figura 6.5. Evaluación del comportamiento hidráulico escenario 05 grados.	77
Figura 6.6. Centros de clase, escenario 05 grados.	79
Figura 6.7. Evaluación del comportamiento hidráulico escenario 07 grados.	80
Figura 6.8. Número de Reynolds entre placas campo 10 y 70 (07 grados).	81
Figura 6.9. Centros de clase, escenario 07 grados.	82
Figura 6.10. Evaluación del comportamiento hidráulico escenario 10 grados.	83
Figura 6.11. Centros de clase, escenario 10 grados.	84
Figura 6.12. Evaluación del comportamiento hidráulico escenario 15 grados.	85
Figura 6.13. Centros de clase, escenario 15 grados.	86
Figura 6.14. Evaluación del comportamiento hidráulico escenario alabiado.	87
Figura 6.15. Centros de clase, escenario alabiado.	88
Figura 7.1.- Revisión de escenarios por número de Reynolds.	90
Figura 7.2. Revisión de la mediana por escenario.	91
Figura 7.3. Valoración de la desviación estándar por escenario.	92
Figura 7.4. Mejora en por ciento del número de Reynolds por escenario, (relacionado con la característica de flujo laminar).	94
Figura 7.5. Mejora en por ciento de la aproximación mediana- τ teórico.	95
Figura 7.6. Análisis de frecuencia todos los escenarios, (relacionado con la repetitividad de cada tiempo de residencia analizado).	96

Nomenclatura

ρ	densidad del fluido	kg/m^3
ϕ	propiedad intensiva	<i>adim.</i>
u	vector velocidad	m/s
<i>div</i>	Operador divergencia	<i>adim.</i>
<i>grad</i>	Operador gradiente	<i>adim.</i>
S_ϕ	Término de creación y destrucción	<i>adim.</i>
τ	Tiempo de residencia	s
D	Profundidad del tanque	m
W	Ancho del tanque	m
L	Longitud del tanque	m
Q	Caudal	m^3/s
V	Volumen del tanque	m^3
v_f	Velocidad del flujo	m/s
A_t	Área transversal del tanque	m^2
Re	Número de Reynolds	<i>adim.</i>
R_h	Radio hidráulico	m
ν	viscosidad cinemática	m^2/s
V_{sc}	velocidad crítica de sedimentación	m/d
CS	Carga superficial	m/d
r_i	Radio interior	m
R	Radio exterior	m
r	Radio	m
d	Espaciamiento entre placas	m
l	Longitud de las placas	m
θ	Angulo de inclinación con respecto a la horizontal	<i>adim</i>
P	Partícula sólida	<i>adim</i>
V_R	Velocidad resultante	m/s
V_{Rx}	Componente en eje x de la velocidad resultante	m/s
V_{Ry}	Componente en eje y de la velocidad resultante	m/s
$V_{f\theta}$	Velocidad del fluido entre elementos inclinados	m/s
Re_θ	Número de Reynolds en elementos inclinados	<i>adim</i>

L_c	Longitud efectiva relativa	m
L'	Longitud de transición de flujo	m
τ_θ	Tiempo de residencia en elementos inclinados	seg
C_o	Concentración de la sustancia trazadora inicial	mg/l
Δt	Intervalo de tiempo de dosificación	seg
t_i	Tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente	seg
t_p	Tiempo modal correspondiente a la presentación de la máxima concentración	seg
t_m	Tiempo mediano, correspondiente al paso del 50% de la cantidad del trazador.	seg
t_o	Tiempo medio de residencia o tiempo teórico de residencia= V/Q	seg
t_f	Tiempo que transcurre hasta que atraviesa la totalidad del trazador al sedimentador.	seg
C_p	Concentración máxima a la salida	mg/l
e	excentricidad de la curva	$adim$

RESUMEN

El presente estudio, consiste en la aplicación de una metodología alterna a la de sustancias trazadoras, siendo ésta, la más usual para evaluar hidráulicamente las unidades de tratamiento llamadas *sedimentadores de alta tasa*; dichas unidades forman parte de un sistema conocido como tren de tratamiento, mismo que genera agua con calidad para uso y consumo humano. Mediante la curva tiempo-concentración de una sustancia de traza, se determinan los parámetros tales como: tiempo de residencia, zonas muertas y cortocircuitos.

El *tiempo de residencia*, es aquel que tarda el agua a tratar, en atravesar la unidad de sedimentación. Las *zonas muertas* son aquellas que se encuentran alejadas de la corriente principal del flujo (trayecto del flujo entrada-salida). Se denomina *cortocircuito* cuando el tiempo de residencia medido, es menor al calculado mediante el cociente de la capacidad de la unidad de sedimentación entre el caudal de ingreso.

La técnica alterna utilizada fue la *modelación numérica* que consistió en la evaluación de los parámetros de flujo con un modelo de dinámica de fluidos computacional (DFC), utilizando un software que se fundamenta en las ecuaciones generales del flujo resueltas con el método de volumen finito. Ésta herramienta permitió obtener la dinámica del fluido en los diferentes sitios del sedimentador. Para la interpretación de los datos obtenidos mediante el DFC, se utilizó la estadística, calculando: media, mediana, desviación estándar así como el uso de histogramas de frecuencia.

Los resultados de la modelación numérica del *diseño original* mostraron deficiencias importantes en la zona de entrada, se identificaron zonas muertas en los orificios más próximos a la sección de ingreso del flujo. Se observó desigualdad en las longitudes de desarrollo de los chorros correspondientes a cada orificio en el muro difusor. De forma global el sedimentador tiene un funcionamiento tipo cortocircuito.

Para mejorar el comportamiento hidráulico del diseño original, se propusieron cinco geometrías diferentes de la zona de entrada; la modificación principal consistió en reubicar el canal de ingreso del extremo izquierdo al centro del sedimentador, así como el incremento del ángulo de los muros entre 1 y 15°. Los resultados de este trabajo recomiendan algunos escenarios que mejoran el funcionamiento global del sedimentador, principalmente en la disminución del tiempo de residencia (menos flujo en cortocircuito). Con base en esto, se observa que la técnica de modelación de DFC es una herramienta práctica, para el mejoramiento de los diseños de este tipo de estructuras.

CAPÍTULO 1 . INTRODUCCIÓN

En México las acciones a realizar para obtener agua con calidad para uso y consumo humano se encuentran establecidas en la (NOM-127-SSA1-1994). En ella se dan a conocer los procesos de tratamiento necesarios a los que se debe someter el agua para lograr en ella propiedades aceptables para los consumidores, es decir, potable.

La selección de los procesos de tratamiento necesarios o potabilización, serán los que resulten de las pruebas de tratabilidad, cuando los contaminantes microbiológicos, las características físicas y los constituyentes químicos del agua, excedan los límites permisibles establecidos en la norma mencionada. Debido a lo anterior cada fuente de abastecimiento tiene un sistema de potabilización específico y que se diseña en función de sus características particulares.

Clarificación tipo convencional es el medio de potabilización más utilizado en las fuentes de abastecimiento del país, según, lo emitido por la CONAGUA en el documento "*Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación (2011)*". La magnitud del caudal nacional potabilizado hasta la fecha mencionada es 94,647.20 l/s, mediante un total de 653 plantas potabilizadoras instaladas en el territorio nacional, como se muestra en la **Tabla 1.1**.

Tabla 1.1. Resumen de las plantas potabilizadoras municipales en operación por proceso (CONAGUA, 2011).

Proceso	Número de plantas	Caudal potabilizado (l/s)
Clarificación convencional	202	68,175.40
Filtración directa	62	14,077.80
Clarificación de patente	141	5,006.10
Remoción de Hierro-Manganeso	15	4,202.00
Ósmosis inversa	184	1,134.90
Adsorción	13	1,128.00
Ablandamiento	19	469.00
Filtración lenta	10	402.60
Otro	6	26.40
Filtro de carbón activado	1	25.00
Total Nacional	653	94,647.20

Como se observa en la **Figura 1.1**, el 72.03% del caudal total nacional es potabilizado por medio de clarificación convencional, seguido por el proceso de filtración directa con un 14.87% y en tercer lugar se puede destacar la clarificación de patente con 5.29%. Cabe destacar que el proceso en punta, supera considerablemente a los otros dos mencionados.

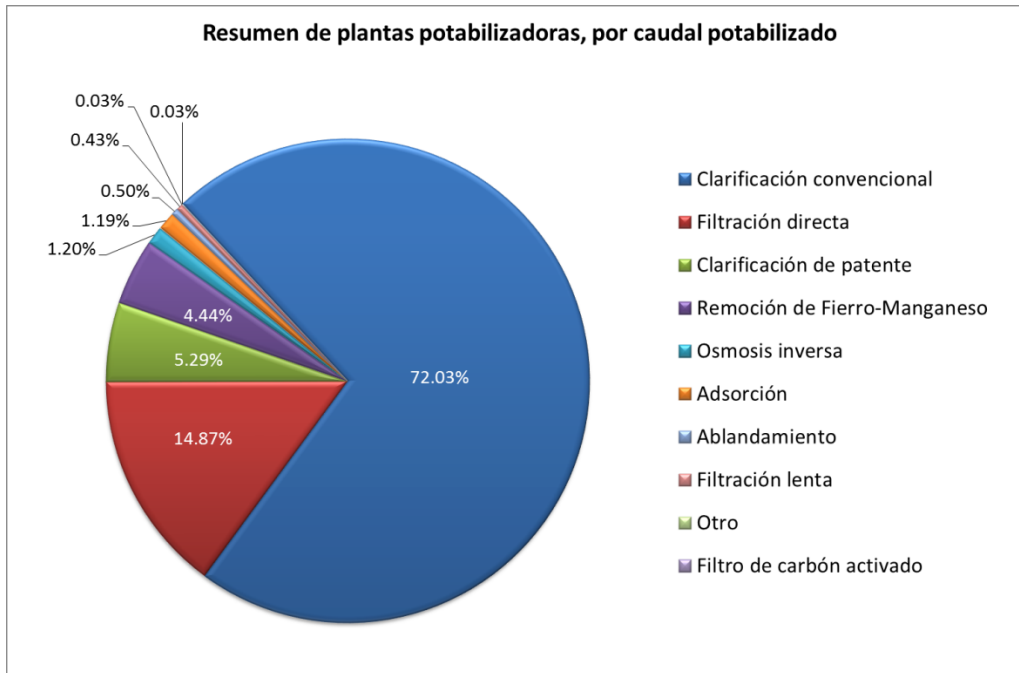


Figura 1.1. Resumen de plantas potabilizadoras, por caudal potabilizado; CONAGUA (2011).

La presente investigación se dirige en particular, al análisis hidrodinámico de una estructura (obra civil) donde se lleva a cabo el proceso de *sedimentación* y que forma parte de un tren de tratamiento tipo convencional. Dicho tren se integra por los procesos de coagulación, floculación, sedimentación, filtración granular y desinfección, principalmente (Crittenden, 2012), como se muestra en la **Figura 1.2**.

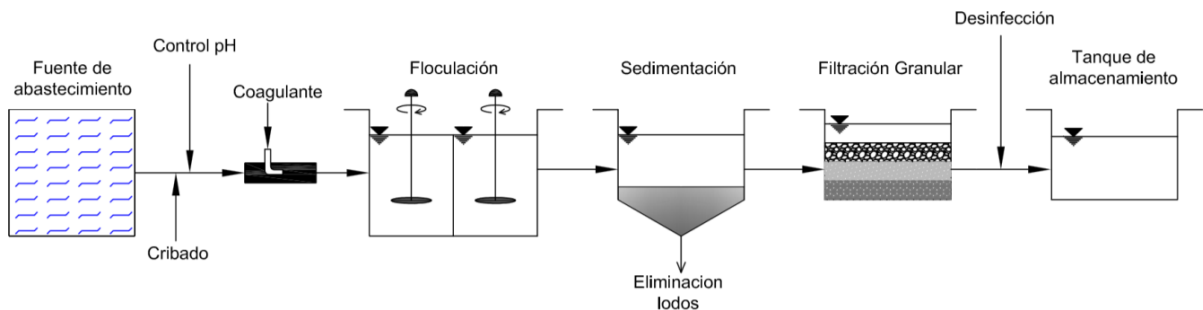


Figura 1.2. Tren convencional de tratamiento.

Sedimentador, decantador o clarificador, es el nombre que se le asigna a la unidad de tratamiento donde se remueven las partículas sólidas de una suspensión mediante la fuerza de gravedad (Romero J. , 2000). Estas unidades pueden clasificarse en función de su *geometría* y por el *sentido del flujo*, principalmente.

Por geometría, los sedimentadores se pueden clasificar en *rectangulares* y *circulares*. Los primeros se caracterizan por conducir el flujo en una sola dirección (unidireccionales) en el sentido de mayor longitud de la unidad de tratamiento y se utilizan con mayor frecuencia en plantas de tratamiento de agua potable. Los sedimentadores circulares se usan preferentemente en el tratamiento de aguas residuales y en el de agua potable para unidades de manto de lodos, por su facilidad para instalarle brazos rotatorios para recolección de sedimentos (Arboleda, 2000). Las unidades de este tipo son de flujo radial, es decir, el agua puede ingresar por el centro y fluir hacia el perímetro exterior o viceversa.

Debido al sentido del flujo los sedimentadores pueden clasificarse como de *flujo horizontal* o convencional, *flujo inclinado* y *flujo vertical*. Por lo regular los de flujo horizontal son denominados tanques de pre-sedimentación y son utilizados principalmente cuando se tiene presencia de arena en el agua, dicho mineral precipita en ella únicamente mediante la fuerza de gravedad debido a su propio peso. Las unidades de flujo inclinado son aquellas donde se han instalado elementos de poca profundidad como pueden ser: placas planas paralelas, módulos de tubos: circulares, cuadrados, hexagonales, octogonales, entre otros. Todos ellos colocados a un ángulo de 60° principalmente, para su auto limpieza. Finalmente los decantadores de flujo vertical son aquellos donde el agua ingresa por la parte inferior y hace el recorrido de manera ascendente hasta el elemento colector de salida. Estas unidades de tratamiento promueven la formación de un manto de lodos y a su vez funge como medio filtrante del agua para favorecer a la clarificación de la misma.

Por lo regular los sedimentadores rectangulares con flujo horizontal, manejan Número de Reynolds menor 20,000 (Crittenden, 2012) y los de flujo inclinado o de alta tasa deben mantenerse por debajo de 200, preferiblemente alrededor de 50 (Kawamura, 2000).

A continuación se presentan esquemas generales de sedimentadores tipo, para reafirmar el concepto de los mismos y para su mayor comprensión, **Figura 1.3**.

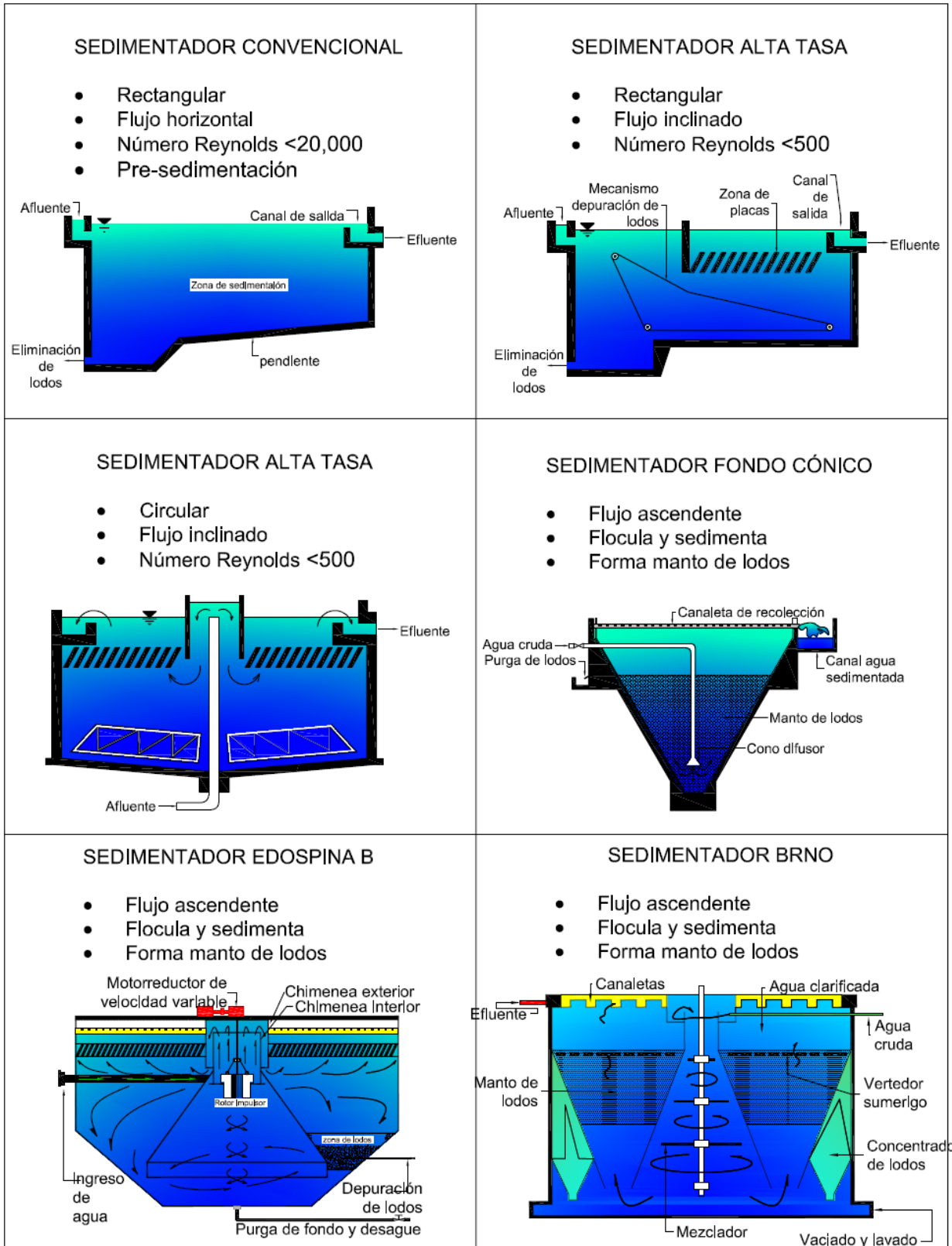


Figura 1.3. Clasificación general de sedimentadores.

Para los casos presentados en la **Figura 1.3**, la eficiencia del funcionamiento hidráulico puede ser monitoreada por indicadores tales como: tiempo de residencia (τ) y número de Reynolds (R_e), principalmente.

El Manual III: Evaluación de Plantas de Tecnología Apropiada, Capítulo 2: Análisis de Flujos y Factores que Determinan Los Periodos de Residencia (CEPIS, 2005), señala que las pruebas con trazadores en plantas de tratamiento son muy útiles para determinar la distribución del flujo en unidades de tratamiento y evaluar las condiciones hidráulicas. En la actualidad estos ensayos se utilizan principalmente para determinar los tiempos reales de residencia y sus principales características como son: tipo de flujo (pistón, mezclado, no ideal), espacios muertos y cortocircuitos hidráulicos en unidades de tratamiento como mezcladores rápidos, floculadores, sedimentadores, en etapa de diseño para conocer su comportamiento hidráulico y deficiencias en forma previa a su construcción, lo cual es de enorme utilidad práctica. Es importante recalcar que este tipo de análisis no determina las trayectorias de las partículas del flujo o de cómo éste se distribuye en el reactor, indica el tiempo de permanencia pero no su trayectoria.

A diferencia de la técnica de trazadores, el uso de computadores y técnicas numéricas que dan solución a las ecuaciones matemáticas que rigen el movimiento de los fluidos, hacen más asequible la visualización de las trayectorias del fluido en el interior del sedimentador mediante la interfaz gráfica del software.

Figura 1.4.

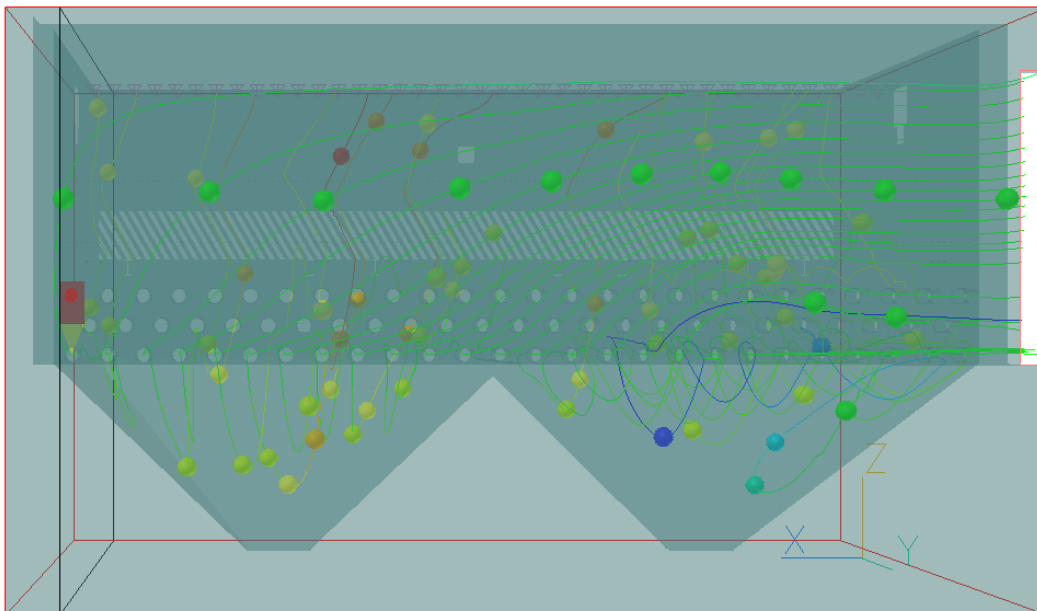


Figura 1.4. Visualización de trayectorias del flujo mediante DFC.

Los software de dinámica de fluidos computacional o DFC permiten un número considerable de cálculos por unidad de tiempo que facilitan la solución de problemas físicos relacionados con el movimiento de los fluidos, algunas ventajas y desventajas de estas herramientas según (Fernández, 2012) se presentan en la **Tabla 1.2.**

Tabla 1.2. Ventajas y desventajas del DFC.

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reducción sustancial de tiempo y costes en los nuevos diseños. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Las técnicas CFD no son baratas. <ul style="list-style-type: none"> ○ Máquinas de gran capacidad de cálculo. ○ Programas con un precio no asequible al gran público.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Posibilidad de analizar sistemas o condiciones muy difíciles de reproducir experimentalmente. <ul style="list-style-type: none"> ○ Velocidades hipersónicas, temperaturas muy altas o bajas, movimientos relativos, entre otros. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se necesita personal cualificado. <ul style="list-style-type: none"> ○ Ejecutar programas y definir modelos. ○ Analizar soluciones.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Capacidad de estudiar sistemas bajo condiciones peligrosas. <ul style="list-style-type: none"> ○ Accidentes, situaciones límites de equipos, entre otros. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No siempre es posible obtener resultados lo suficientemente precisos. <ul style="list-style-type: none"> ○ Necesidad de simplificar el fenómeno. ○ Imposibilidad práctica de todo tipo de ejecuciones.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nivel de detalle prácticamente ilimitado. <ul style="list-style-type: none"> ○ Facilidad para estudios paramétricos. ○ Gran cantidad de información. ○ Sin coste por aumento de sensores. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Limitación de los modelos existentes para la turbulencia, la combustión, entre otros.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Diseño asistido por computador. 	Tendencia a creerse los resultados sin la suficiente contrastación.

1.1 Planteamiento del problema

El flujo *pistón* (formado por trayectorias de partículas fluídicas con mismo tiempo de residencia) es aquel con el que se espera de manera ideal, operen los sedimentadores de alta tasa, para ello es necesario que el diseño de la estructura (obra civil) de mencionadas unidades de tratamiento, sea tal, que proporcione las menores perturbaciones al flujo en su trayecto desde la entrada por el muro difusor, hasta la salida por canaletas colectoras.

Es necesario realizar una evaluación hidráulica previa a la construcción, tanto de modelos físicos, como de estructuras reales de sedimentadores, para identificar si éstos, proporcionarán las condiciones necesarias para generar el tipo de flujo esperado.

Para ello se requiere un estudio detallado del movimiento del fluido dentro de éstos tanques, con el objetivo de identificar las posibles causas que afectan su eficiencia, por mencionar algunas, tenemos la presencia de zonas muertas, el cortocircuito y recirculaciones, principalmente.

Mediante el uso de la modelación numérica se pueden reproducir escenarios de simulación de flujo a través de sedimentadores y evaluar diversos diseños o configuraciones de éstas unidades para realizar un diagnóstico hidráulico con grado de confianza aceptable.

La aplicación de herramientas como son los software de Dinámica de Fluidos Computacional (DFC) facilitan la evaluación hidrodinámica y ofrece una respuesta rápida para afinar el diseño ingenieril.

1.2 Justificación

El presente estudio se realizó con el objetivo de mostrar que actualmente se puede hacer uso de técnicas alternas a las usuales (modelación física y la técnica de sustancias trazadoras) para la evaluación hidrodinámica de las unidades de tratamiento como son los sedimentadores de alta tasa. La aplicación de DFC mediante el uso de computadores y técnicas numéricas, se caracterizan por realizar gran cantidad de cálculos por unidad de tiempo, para resolver las ecuaciones que rigen el movimiento de los fluidos lo que facilita la generación de escenarios de modelación para analizar varias propuestas de diseño y seleccionar la más eficiente.

En el presente estudio sólo se analiza una sola fase (agua) asumiendo que las partículas sólidas no influyen en el tiempo de residencia calculado, debido a que provienen de un proceso químico (coagulación) donde se ha desestabilizado su carga, resultando en un aglutinamiento de las mismas, llamado (floc). Los flocs adquieren una densidad mayor a la del agua, por lo que, para el presente estudio se considera que sedimentarán en un tiempo corto y no influirán en los patrones de flujo.

1.3 Antecedentes

Como se aprecia en la **Tabla 1.3**, la aplicación de la modelación numérica con DFC en unidades de tratamiento para potabilización de agua, en específico de sedimentadores o clarificadores de *alta tasa*, es utilizada a nivel mundial para determinar la eficiencia de operación, incluyendo el funcionamiento hidráulico.

Tabla 1.3. Estado del arte en modelación de DFC.

Año	Lugar	Autor	Concepto clave
2014	Xanthi, Grecia	(Roza & Asterios, 2014)	Modelación numérica en 2D mediante ANSYS FLUENT, de tanque rectangular evaluado sin placas (convencional) y con placas (alta tasa). El objetivo de este trabajo, fue evaluar la influencia de la presencia de las placas en el sistema, los autores creen que su trabajo es la primera investigación de la modelación numérica del sistema completo, sedimentador y placas al mismo tiempo, utilizaron una malla de 218,710 celdas. Modelo de turbulencia k-e. Reynolds de 22,239. Los autores concluyen que la unidad de alta tasa tiene eficiencia de 93% mientras que la convencional 75%.
2013	NY. USA	(Xanthos, Ramalingam, Lipke, McKenna, & Fillos, 2013)	Se logró la modelación de 12 grandes tanques de sedimentación con dimensiones 110.00 m x 36.58 m x 4.12 m, de largo, ancho y profundo, respectivamente. Con el objetivo de respaldar por medio de la modelación numérica, el funcionamiento de dichos tanques. El Trabajo de dibujo se realizó con el software SOLIDWORKS y el DFC que utilizaron fue ANSYS 13. Modelo de turbulencia k-e. Malla con 2.0 y 6.0 millones de nodos. Se realizó análisis de malla- dependencia.
2009	Slovakia	(Ghawi & Jozef, 2009)	Modelación numérica en 2D de tanque rectangular con flujo horizontal mediante FLUENT 6.3.26, se usó modelo de turbulencia k-e, con ello se mejoró la zona de entrada-salida y se disminuyó retorno del flujo en la parte superficial de dicha unidad. Se colocaron muros difusores para mejorar la distribución del flujo.
2009	Selangor , Malaysia	(Al-Sammaraee, Chan, Salim, & Mahabaleswar, 2009)	Estudio computacional en tres dimensiones para evaluación de proceso de sedimentación, patrones de flujo, perfiles de velocidades y turbulencia. El software utilizado es FLUENT 3.6, método de volumen finito para analizar las ecuaciones de Navier Stokes. Se utilizó el modelo de turbulencia LES. Se analizaron la fase sólida y la líquida con 2.5 millones de nodos. Tolerancia de cálculo 1×10^{-6} . Se efectuó estudio de malla-dependencia.

Con respecto a los estudios presentados en la **Tabla 1.3**, podemos asumir que en la presente tesis, se ha realizado un estudio donde el potencial numérico y gráfico de un software de Dinámica de Fluidos Computaciones (DFC), se enfocó, paralelo al estudio hidráulico general del tanque sedimentador, a los elementos inclinados (placas), con el objetivo de reproducir los campos de flujo entre las mismas para poder determinar mediante isocontornos de velocidades, si el tanque de sedimentación en estudio cumple con los parámetros establecidos para la zona de placas, especialmente el número de Reynolds.

CAPÍTULO 2 . TEORIA DE TANQUES SEDIMENTADORES

En este capítulo se presenta la teoría y ecuaciones básicas que se utilizan para realizar el diagnóstico de la unidad de tratamiento de agua, dichas expresiones matemáticas fueron planteadas en el documento “*On sedimentation*” elaborado por Allen Hazen (1904) y posteriormente Thomas R. Camp (1946) en el documento “*Sedimentation and the Design of Settling Tanks*” elaboró las expresiones de aplicación. En fechas recientes (Yao, 1970) estableció los modelos actuales para el diseño de sedimentadores de alta tasa.

Desde un punto de vista histórico, Hazen reconoce que las relaciones para establecer los criterios tienen su origen en el trabajo “*Cleaning Water by Settlement*”, presentado por Seddon en 1889 (Hazen, 1904).

2.1 Tanque ideal de sedimentación

El tanque ideal tiene cuatro zonas, las cuales son *entrada, sedimentación, lodos y salida* (Crittenden, 2012), **Figura 2.1**. En ésta unidad de tratamiento, sólo se considera el análisis de sedimentación tipo I¹, debido a su simplicidad y con el objetivo de obtener expresiones que representen en cierto grado dicho fenómeno, para ello se hicieron consideraciones que según Arboleda (2000) consisten en:

- Hay una distribución uniforme de partículas en la entrada. La concentración de partículas de cada tamaño es por lo tanto la misma en todos los puntos de la sección transversal de la entrada.
- En la zona de sedimentación la dirección del flujo es horizontal y la velocidad es la misma en todos los puntos por lo que responde a un modelo de flujo tipo pistón.
- La trayectoria de sedimentación de una partícula es recta, descendiente conforme se aleja de la zona de entrada y se acerca a la zona de salida tal y como se aprecia en la **Figura 2.2**. Toda partícula que entra a la zona de lodos queda atrapada y se considera removida.

¹ Sedimentación de partículas discretas, son aquellas que no cambian su forma, tamaño o peso a medida que se sedimentan. Este tipo de proceso es considerado libre, es decir, no hay interacción entre partículas (Romero J. , 2000).

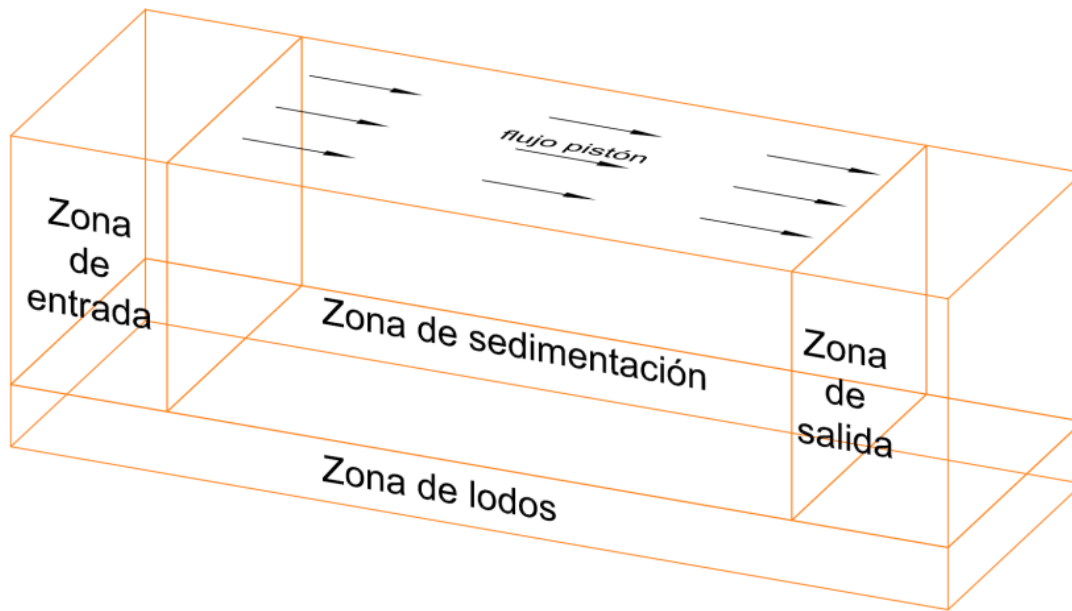


Figura 2.1. Tanque ideal de sedimentación.

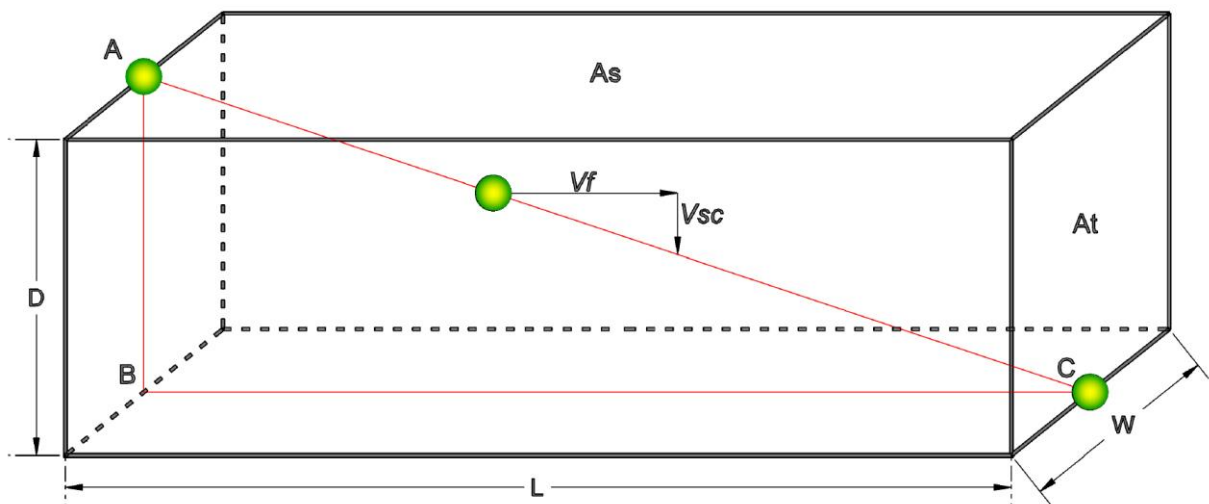


Figura 2.2. Trayectoria de partícula discreta en zona de sedimentación, tanque ideal.

Para la **Figura 2.2**, V_f es velocidad del fluido; V_{sc} , velocidad crítica de sedimentación; L , W y D son largo, ancho y alto del sedimentador respectivamente; A_s y A_t son área transversal y área superficial de la unidad de tratamiento respectivamente; A , B , C , son referencias de posición de la partícula.

El análisis de los sedimentadores de tipo rectangular se apega a los criterios establecidos para el sedimentador ideal, por lo que, para ambos se utilizan las mismas ecuaciones.

2.2 Tanque Circular

Los sedimentadores de geometría circular en su carácter "ideal" reciben el mismo análisis que uno rectangular, es decir, son aplicables las expresiones para determinar velocidad del flujo, carga superficial y tiempo de residencia. En la **Figura 2.3** y **Figura 2.4**, se puede observar las consideraciones pertinentes para su análisis.

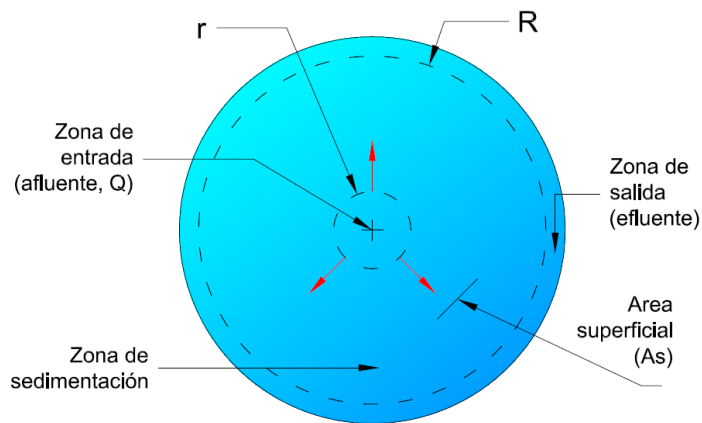


Figura 2.3. Sedimentador circular, vista en planta.

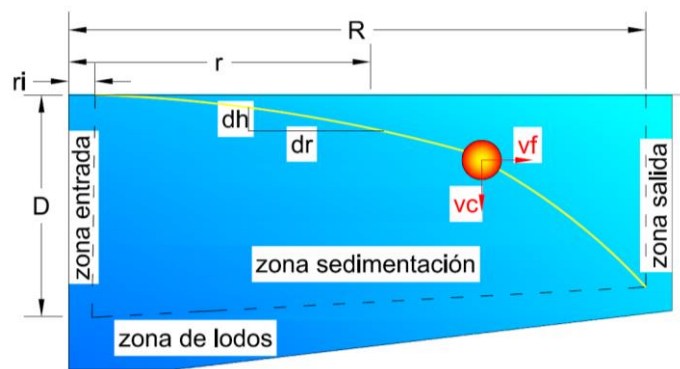


Figura 2.4. Trayectoria de partícula discreta en sedimentador circular.

Para el caso de los sedimentadores de sección circular, la trayectoria que sufre una partícula discreta es de tipo "parabólica" a diferencia de la que tendría la misma partícula en un tanque rectangular ideal, es decir, inclinada, **Figura 2.2**.

2.3 Tanque sedimentador de alta tasa o de flujo laminar

La característica principal de los elementos inclinados (placas o módulos tubulares) de un sedimentador de alta tasa, es su *poca profundidad*, que por lo general se encuentra alrededor de 60 cm. La idea parece ser sugerida originalmente por Hazen en (1904) y fue explorada por Camp en 1946. Los tanques de esta categoría experimentan periodos de residencia de no más de 15 minutos, para lograr una eficiencia de sedimentación comparable o mejor, que la obtenida normalmente en tanques convencionales (rectangulares) de sedimentación que tienen períodos de residencia generalmente mayores a 2 horas según el documento desarrollado por K.M. Yao, (1970)

Según Arboleda (2000) las tres diferencias básicas entre los sedimentadores convencionales y los de flujo laminar o de alta tasa son:

1. El fondo de la unidad de tratamiento no es horizontal sino inclinado.
2. La profundidad es muy baja (unos pocos centímetros) por lo que hay que construir un número considerable de celdas superpuestas para poder tratar el volumen de agua que se acostumbra en la práctica.
3. Cada espacio entre placas debe considerarse como un sedimentador que tiene que recibir la misma cantidad de agua que los otros.
4. El flujo en el sedimentador es laminar con R_e menor de 500.

Los sedimentadores poco profundos pueden ser: módulos de tubos circulares, cuadrados, hexagonales, octogonales, de placas paralelas, de placas onduladas o de otras formas según Romero J. (2000). Según K.M. Yao (1970), existían dos dificultades con respecto a los sedimentadores de alta tasa:

- A. No existía documento alguno donde se avalara que el parámetro “carga superficial” conservaba el mismo significado físico para sedimentadores que no fueran de forma rectangular.
- B. No se sabía nada acerca de cómo calcular dicho parámetro para sedimentadores tales como tubo circulares inclinados.

Por lo anterior, dicho autor se motivó a realizar una investigación acerca de las propiedades físicas de los sedimentadores de alta tasa y proporcionar información para ser utilizada como una guía general para el diseño de estas unidades de tratamiento. Dicha teoría se encuentra vigente y para efectos de este estudio fue la base principal para la evaluación de la unidad de tratamiento en cuestión.

En la **Figura 2.5**, se muestra el esquema general propuesto por (K.M., 1970) donde se observa la trayectoria de una partícula sólida así como sus componentes vectoriales cuando viaja a través de dos placas inclinadas paralelas.

Dichos elementos inclinados forman un ángulo con la horizontal, y en la figura antes mencionada se aprecia el eje x paralelo a la dirección del flujo y el eje y perpendicular a éste; θ es el ángulo de inclinación entre el eje x y la línea horizontal de referencia; $V_{f\theta}$ es la velocidad local del fluido en la dirección x ; V_R es la velocidad resultante que determina la trayectoria de la partícula sólida; V_{Rx} y V_{Ry} son sus componentes en los ejes x e y , finalmente, V_{sc} es la velocidad crítica de sedimentación.

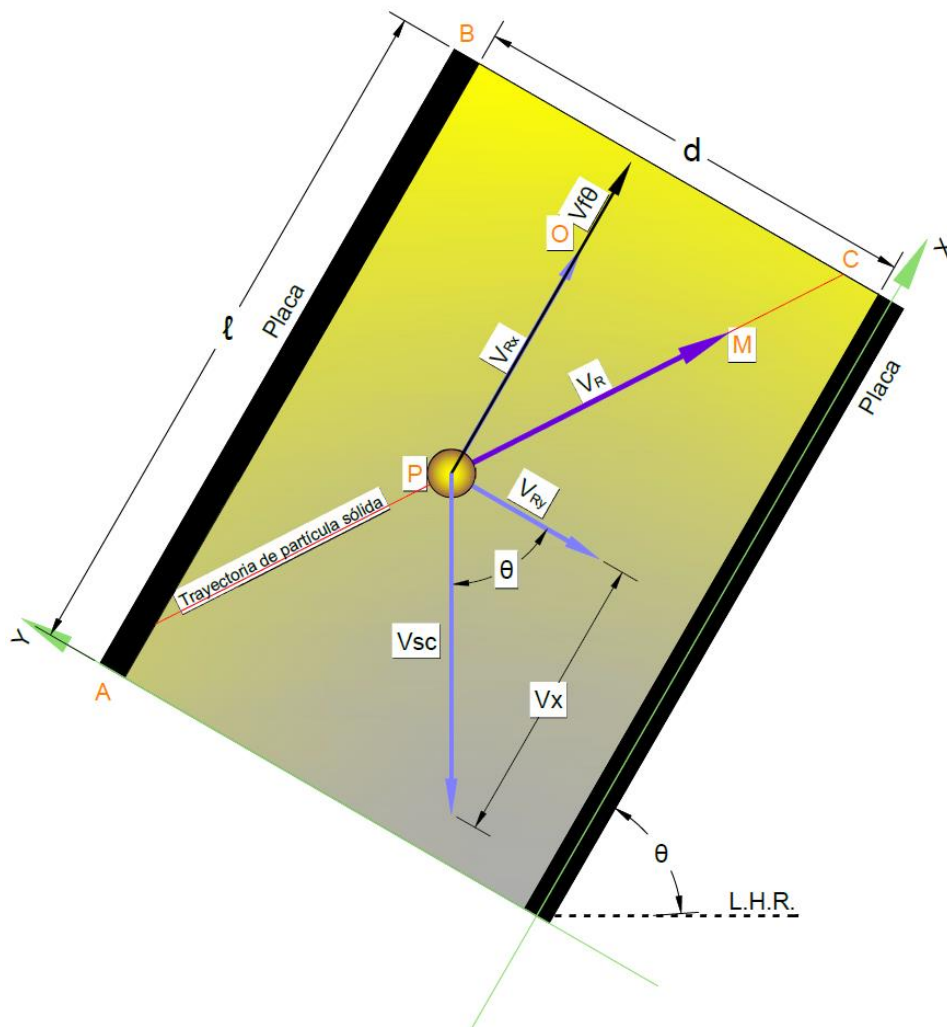


Figura 2.5. Relaciones geométricas en un sedimentador inclinado.

2.4 Indicadores fundamentales para el diagnóstico hidráulico

A continuación se presentan las definiciones de los parámetros principales con los cuales se realiza el estudio del comportamiento hidráulico de los sedimentadores y

de otras unidades de tratamiento. Con el cálculo de dichos parámetros se puede obtener las condiciones con las cuales el sedimentador opera y con base en ellos se pueden realizar propuestas de mejora para su adecuado funcionamiento.

2.4.1 Tiempo de residencia (τ)

Según lo escrito por Allen Hazen en el documento *On sedimentation* (1904), se establece que, el método más común de expresar el tamaño de tanque de sedimentación, es indicar la duración del tiempo que tarda el agua en pasar a través de él, o más precisamente, el cociente obtenido al dividir la capacidad del tanque por la cantidad de agua que entra, dejándolo en una unidad de tiempo. Este concepto actualmente es uno de los más importantes para el diseño de tanques sedimentadores ya que es un parámetro con el cual se puede definir el tiempo mínimo requerido que debe residir el flujo en dicha unidades de tratamiento, la ecuación para calcular dicho parámetro se le denomina tiempo de residencia.

2.4.2 Velocidad del fluido (v_f)

Es una de las propiedades vectoriales que posee el fluido, que expresa el espacio recorrido por el mismo en la unidad de tiempo (m/s). Se calcula mediante la relación que existe entre el caudal que ingresa a la unidad de tratamiento y la sección transversal de la misma (Q/A_t). En el campo disciplinario de tratamiento y calidad del agua, se le denomina velocidad horizontal (Romero J. , 2000) y se considera como aquella propiedad del fluido cuando éste proviene de la zona de entrada y se distribuye en la sección transversal del tanque sedimentador, es decir, la sección perpendicular a la dirección del flujo.

2.4.3 Número de Reynolds (R_e)

Este parámetro hace referencia a la importancia de las fuerzas viscosas con respecto a la de inercia (Sotelo, 2002). Mediante el análisis de este indicador podemos identificar el tipo de flujo que predomina en la unidad de tratamiento, como puede ser, turbulento o laminar principalmente. La característica laminar ocurre en presencia de velocidad baja y se idealiza considerando que el flujo se compone de capas delgadas paralelas entre sí con perturbaciones muy bajas. No así la turbulencia, se puede interpretar como un comportamiento caótico y violento que altera dichas capas y que se origina por la fricción entre el flujo y la rugosidad de las paredes de la estructura que lo contiene o transporta. De manera general se espera que el flujo en los sedimentadores tienda a ser laminar, con mayor peso

si se trata de un sedimentador de alta tasa en donde este indicador debe mantenerse por debajo de 500.

2.4.4 Carga superficial (CS)

Se asigna este concepto a la velocidad de sedimentación que experimenta una partícula sólida, durante su trayectoria desde la *posición A*, en el inicio de la zona de sedimentación, hasta la *posición C*, justo antes de la zona de salida, tal como se observa en la **Figura 2.2**. Este parámetro es también conocido como *tasa de flujo por unidad de área superficial del tanque*. Su importancia radica en que se utiliza para dimensionar dicha unidad de tratamiento.

Para efectos de este estudio sólo se hará mención de dicho parámetro y se presentará la deducción de la ecuación matemática del mismo debido a su relevancia y uso en el diseño de tanques sedimentadores, sin embargo debido a que interviene el proceso físico de sedimentación queda fuera del contexto de este estudio.

2.4.5 Carga superficial para tanques de alta tasa (v_{sc})

Para la deducción de la ecuación con la cual se estima la carga superficial Arboleda (2000) explica que si $\theta = 0$, v_{Ry} es igual a v_{sc} , lo cual representa la velocidad teórica de sedimentación de la partícula crítica en un sedimentador horizontal, es decir la teoría de Hazen y Camp. Por otro lado si $\theta \neq 0$, indica que los elementos de sedimentación se encuentran inclinados, por lo que v_{Ry} (perpendicular a las placas) es desigual a v_{sc} que actúa verticalmente en el sentido de la vertical, **Figura 2.5**.

La velocidad v_{Ry} puede determinarse utilizando la técnica triángulos semejantes con los puntos ABC y MOP basado en la imagen anterior mencionada, como se muestra a continuación:

$$\frac{d}{v_{Ry}} = \frac{\ell}{v_{Rx}} \quad 2-1$$

Despejando v_{Ry} en 2-1 tenemos

$$v_{Ry} = \frac{d}{\ell} v_{Rx} \quad 2-2$$

$$v_{Ry} \ell = d v_{Rx} \quad 2-3$$

$$v_{Rx} = \frac{\ell}{d} v_{Ry} \quad 2-4$$

Si se considera: $\ell/d = L$, tenemos:

$$v_{Rx} = v_{Ry}L \quad 2-5$$

Por otro lado

$$\text{sen}\theta = \frac{Vx}{v_{sc}} \quad 2-6$$

$$Vx = v_{sc}\text{sen}\theta \quad 2-7$$

$$\text{cos}\theta = \frac{v_{Ry}}{v_{sc}} \quad 2-8$$

$$v_{Ry} = v_{sc}\text{cos}\theta \quad 2-9$$

Determinando v_{Rx}

$$v_{Rx} = v_{f\theta} - Vx \quad 2-10$$

Sustituyendo Vx

$$v_{Rx} = v_{f\theta} - v_{sc}\text{sen}\theta \quad 2-11$$

Sustituyendo (2-7) y (2-9) en (2-2), se tiene:

$$v_{f\theta} - v_{sc}\text{sen}\theta = v_{sc}\text{cos}\theta L \quad 2-12$$

$$v_{f\theta} = v_{sc}\text{cos}\theta L + v_{sc}\text{sen}\theta \quad 2-13$$

Factorizando v_{sc}

$$v_{f\theta} = v_{sc}(\text{cos}\theta L + \text{sen}\theta) \quad 2-14$$

Finalmente

$$v_{sc} = \frac{v_{f\theta}}{(\text{sen}\theta + L\text{cos}\theta)} \quad 2-15$$

Como lo expresa la ecuación (2-15), la eficiencia de un sedimentador de alta tasa es función de la longitud relativa L y del ángulo de inclinación θ . L debe mantenerse por debajo de 40 y preferiblemente alrededor de 20 (Yao, 1970).

En la **Tabla 2.1** se muestra un resumen de las expresiones matemáticas utilizadas para la evaluación hidráulica de los sedimentadores en función de su geometría.

Tabla 2.1. Parámetros y ecuaciones principales de tanques sedimentadores comunes.

Tipo	Rectangular	Circular	Alta tasa
Tiempo de residencia	$\tau = \frac{DWL}{Q} = \frac{Vol}{Q}$ (2-16)	$\tau = \frac{\pi(R^2 - r_i^2)D}{Q}$ (2-17)	$\tau_\theta = \frac{l}{v_{f\theta}}$ (2-18)
Velocidad del fluido	$v_f = \frac{Q}{DW} = \frac{Q}{A_t}$ (2-19)	$v_f = \frac{Q}{2\pi r D}$ (2-20)	$v_{f\theta} = \frac{Q}{A_s \text{sen}\theta}$ (2-21)
Número de Reynolds	$R_e = \frac{v_f R_h}{\nu}$ (2-22)	$R_e = \frac{v_f R_h}{\nu}$ (2-23)	$R_{e\theta} = \frac{v_{f\theta} d}{\nu}$ (2-24)
Carga superficial	$CS = \frac{Q}{A_s}$ (2-25)	$CS = \frac{Q}{\pi(R^2 - r_i^2)}$ (2-26)	$v_{sc} = \frac{v_{f\theta}}{(\text{sen}\theta + L_c \text{cos}\theta)}$ (2-15)
Longitud representativa			$L' = 0.013 R_{e\theta}$ (2-27)

2.2 Tipos de flujo en las unidades de tratamiento

En las unidades de tratamiento como son los sedimentadores, se puede controlar el caudal de ingreso de dos maneras, mediante flujo intermitente (caudal interrumpido) y flujo continuo (gasto constante). El primero consiste en llenar la unidad y dejar el volumen de agua a tratar el tiempo necesario para que se lleve a cabo el proceso correspondiente. Este tipo de flujo es el menos usual en las unidades de tratamiento.

Cuando el sedimentador es controlado mediante un caudal constante, se puede presentar hipotéticamente tres tipos de flujo los cuales son flujo pistón, flujo mezclado y flujo no ideal.

2.2.1 Flujo Pistón

Hipotéticamente, cuando en una unidad de tratamiento se presenta este tipo de flujo, las partículas del fluido tienen un tiempo de residencia de igual magnitud, no ocurre mezclado entre el fluido que ingresa y el que se encuentra dentro de la unidad.

Se presenta con bastante aproximación en estructuras hidráulicas como los canales Parshall, los vertederos, los floculadores hidráulicos de pantallas y en los sedimentadores con una relación largo/ancho bastante mayor de 1, tal como se muestra en la **Figura 2.6**.

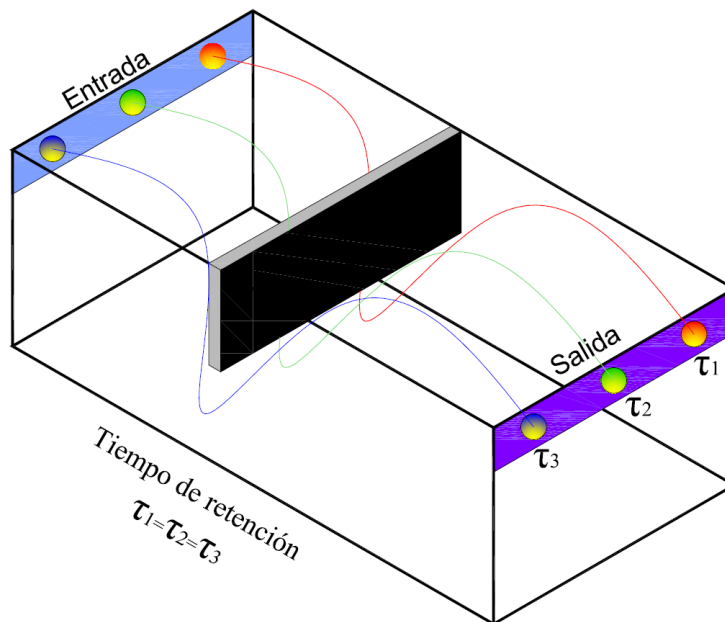


Figura 2.6. Representación gráfica de flujo pistón.

2.2.2 Flujo mezclado

Establece que cualquier elemento que ingresa a la unidad de tratamiento se distribuye de manera uniforme dentro de ella, por lo que, la concentración de una sustancia a la salida de la unidad será la misma que la experimentada en cualquier punto de muestreo dentro de ella. Ver **Figura 2.7**.

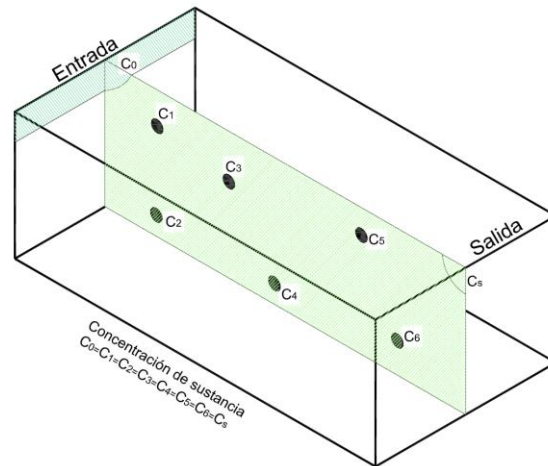


Figura 2.7. Representación gráfica del flujo mezclado.

2.2.3 Flujo no ideal

Cualquier grado intermedio entre flujo pistón y mezclado contempla otras posibles alteraciones como son zonas muertas, cortocircuito, recirculación. Estos fenómenos son los más comunes en unidades de tratamiento reales. Ver **Figura 2.8**.

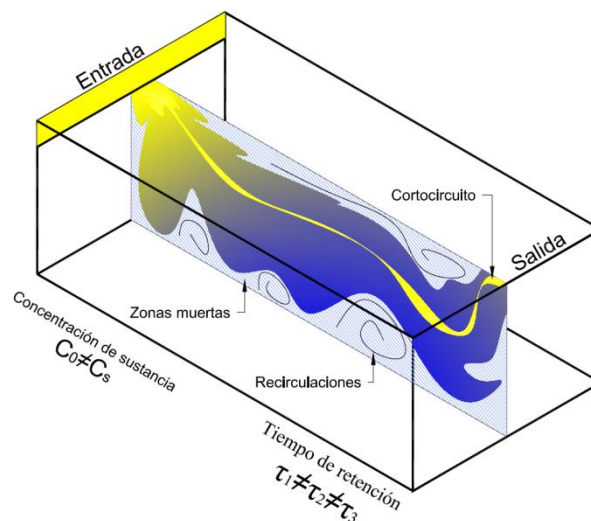


Figura 2.8. Representación gráfica del flujo no ideal.

2.3 Criterios de diseño

En la **Tabla 2.2** y **2.3** se presentan un resumen de los criterios de diseño para tanques convencionales y de alta tasa respectivamente, con ellos se efectuará un análisis al diseño actual para determinar indicadores tales como número de Reynolds, tiempo de residencia y tipo de flujo. Este último a su vez se puede ser laminar o turbulento. Dicho análisis se presenta en el capítulo 3 de este documento.

Tabla 2.2. Criterios de diseño para tanque rectangular convencional

Parámetro	Unidad	Crittenden (2012)	Kawamura (2000)	Romero (2000)	Arboleda (2000)
Número mínimo de tanques	adim.	2.00	2.00	2.00	2.00
Profundidad del agua	m	3.0 a 5.0	3.0 a 4.5	> 3.0	-
Velocidad media del flujo	m/min	0.3 a 1.1	0.3 a 1.1	0.25 a 1.5	0.33
Tiempo de residencia	h	1.5 a 4.0	1.5 a 4	2 a 4	
Carga superficial	m/h	1.25 a 2.5	1.25 a 2.5	0.64 a 0.92 (floc alumbre) 0.75 a 1.125 (floc polímero)	0.8 a 2.5
Relación largo-ancho (L/W)	m	15:01	4:1 (mínimo)	4:1	2.5:1, 10:1, 4:1, 5:1
Relación largo-profundidad	m	15:1	15:1 (mínimo)	4:1	5:1 a 25:1
Número de Reynolds	adim.	<20,000	25,000	2,000 a 20,000	2,000 a 20,000
Número de Froude	adim.	>1x10 ⁻⁵	1x10 ⁻⁶	-	-

Tabla 2.3. Criterios de diseño para tanque rectangular de alta tasa.

Parámetro	Unidad	Crittenden (2012)	Kawamura (2000)	Romero (2000)
Tanques mínimos por unidad	adim.	2.00	2.00	2.00
Profundidad del agua	m	3.0 a 5.0	3.6 a 4.5	> 3.0
Velocidad media en los conductos del módulo de sedimentación	m/min	0.15	0.15 a 2.0	< 0.6
Tiempo de residencia	min	6.0 a 10.0 (tubulares) 15.0 a 25.0 (placas)	4.0 (mínimo)	3.0 a 6.0 (tubulares) 15.0 a 25.0 (placas)
Carga superficial por placa o tubulares	m/h	2.5 a 6.25 (floc aluminio) 3.8 a 7.5 (floc pesado)	3.8 a 7.5	7.5-12.5
Número de Reynolds	adim.	<20,000	<200 preferiblemente alrededor de 50	< 500
Número de Froude	adim.	>1x10 ⁻⁵	1x10 ⁻⁵	-

Por medio de los parámetros presentados en el este capítulo se realizará un diagnóstico enfocado en el comportamiento hidráulico de la unidad de tratamiento en estudio, posteriormente se revisarán los resultados de la evaluación con los criterios de diseño presentadas en el subcapítulo 2.3, con el objetivo de determinar la eficiencia del sedimentador de alta tasa.

CAPÍTULO 3 . CONFIGURACIÓN Y EVALUACIÓN DEL SEDIMENTADOR DE ALTA TASA

En el presente capítulo se describe las características geométricas de cada uno de los elementos que integran la estructura del sedimentador de alta tasa en estudio, así como su distribución e importancia dentro del mismo. El diseño de la mencionada unidad de tratamiento, fue proporcionado por los autores del Informe Técnico: *Proyecto Funcional y Términos de Referencia para la Licitación Llave en Mano de la Planta Potabilizadora de Xicoteppec, Puebla* (Garrido Hoyos & Vázquez Tirado, 2008).

La configuración geométrica de este sedimentador cumple con los criterios de diseño indicados en la **Tabla 2.3**.

3.1 Diseño actual

Previo a la revisión hidrodinámica, en este capítulo se muestra la geometría del sedimentador en estudio, para ello se realizaron cortes transversales y longitudinales con el fin de definir de manera sencilla las cuatro zonas principales de las cuales se componen los sedimentadores en general, que son: zona de entrada, zona de sedimentación, zona de lodos y zona de salida,. En el siguiente apartado se podrá observar la ubicación del muro difusor que es el elemento principal que distribuye el flujo en la unidad de tratamiento, así como la separación entre orificios con el mismo fin.

El sedimentador que se evalúa en el presente documento es del tipo *flujo laminar* o de *alta tasa*, es decir, el régimen de flujo que debe existir en la zona de sedimentación (placas), debe ser el generado por un Número de Reynolds menor a 500 (Arboleda 2000). La característica principal de los elementos inclinados (placas) de un sedimentador de alta tasa es su poca profundidad, usualmente del orden de centímetros (Romero 2000).

Las dimensiones del sedimentador son 19.20 m de longitud, 5.40 m de ancho y 5.60 m de altura, **Figura 3.1** . Éste a su vez se encuentra seccionado en dos unidades, es decir, dos tanques de sedimentación que tratan el 50% del caudal total suministrado cada uno. Cada tanque se encuentra equipado con dos tolvas que funcionan como depósitos de lodos y que facilita la remoción de los mismos. Los tanques se encuentran separados por un muro divisorio de 0.30 metros de espesor, 4.0 metros de ancho y 3.30 metros de alto.

3.1.2 Zona de entrada

Es un canal de sección rectangular con dimensiones 0.50 m de ancho y 2.72 m de alto, por donde se suministra al sistema un caudal de agua pre-tratada $Q=115$ l/s. Por medio de ésta se inunda la estructura denominada *canal distribuidor* que cuenta con sección transversal rectangular de base variable que va desde 0.60 a 0.40 metros de ancho, **Figura 3.2**. Uno de los muros que lo integran colinda con la zona de sedimentación y recibe el nombre de *muro difusor*, el cual está provisto de 154 orificios con diámetro de 0.15 m y separación entre ellos de 0.20 m. **Figura 3.3**.

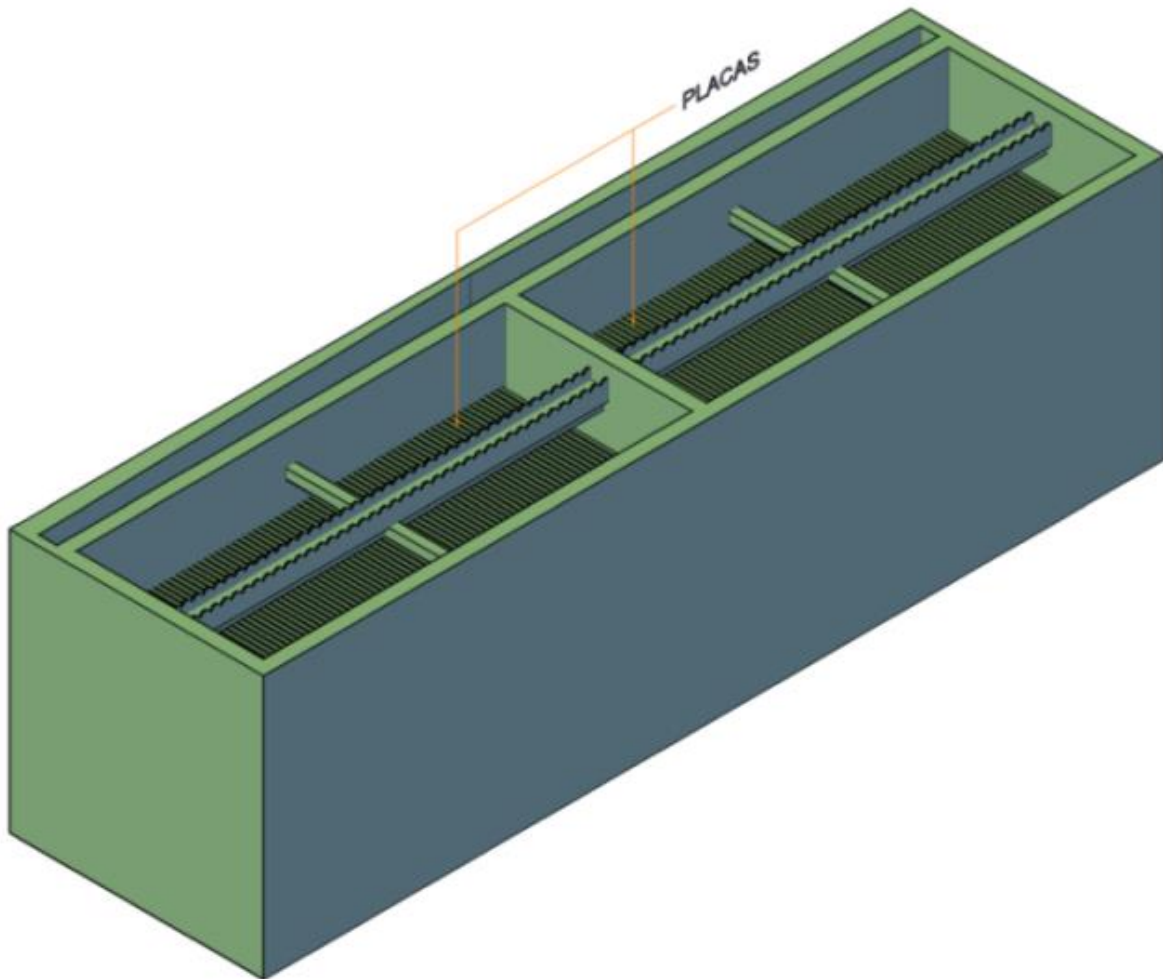


Figura 3.1. Isométrico del sedimentador de alta tasa.

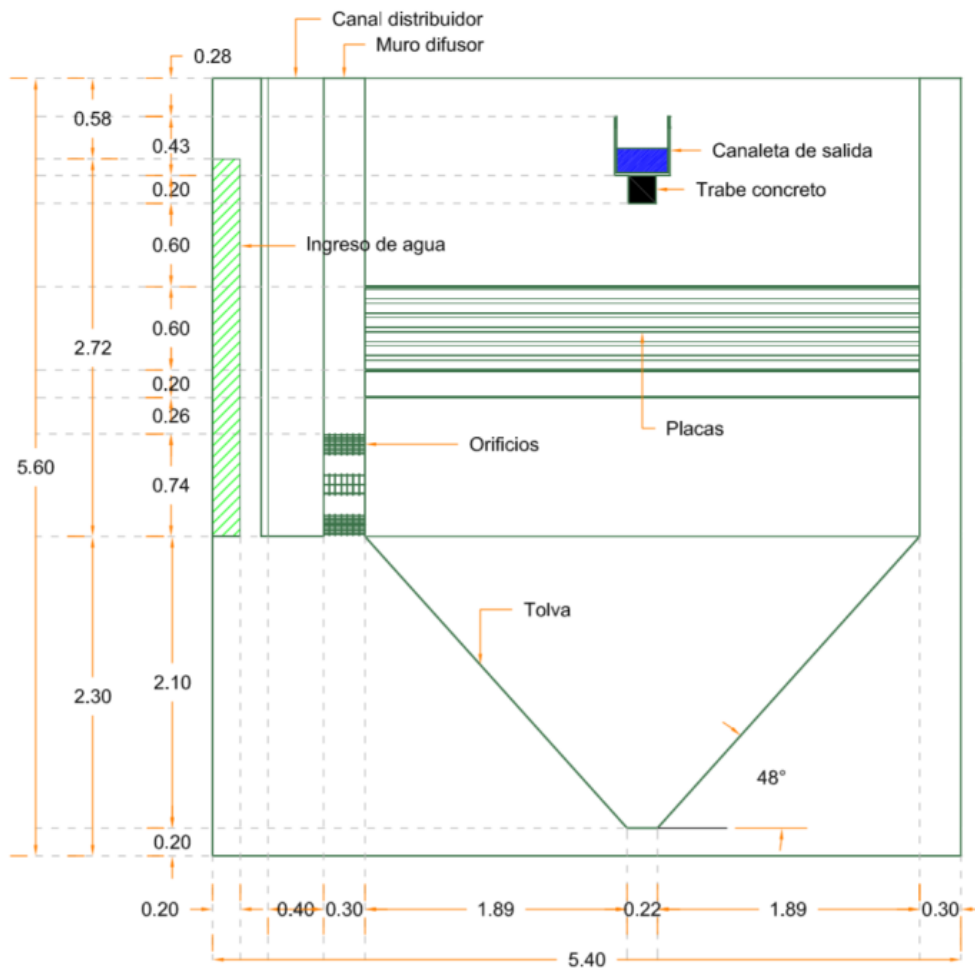


Figura 3.2. Sección transversal del sedimentador.

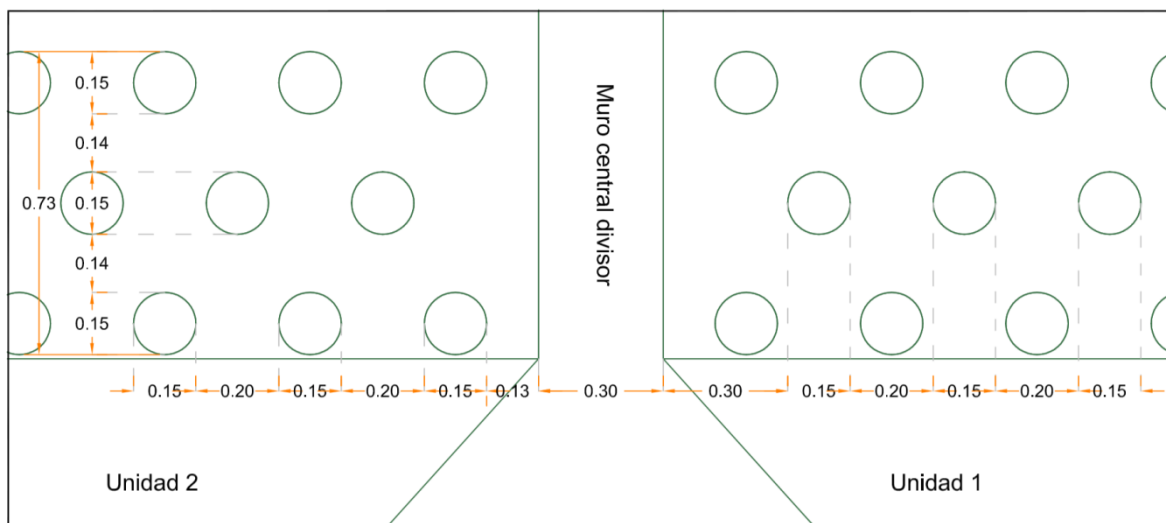


Figura 3.3. Configuración del muro difusor (orificios) vista frontal.

3.1.3 Zona de sedimentación

La unidad de tratamiento de 19.20 m x 5.40 m x 5.60 m (largo, ancho y alto) respectivamente, está provista de 152 placas planas paralelas, 76 placas para cada tanque de sedimentación, colocadas de manera paralela entre sí a una distancia de 0.05 m, **Figura 3.4**. Cada una de éstas, tiene un ángulo de inclinación de 60° con la finalidad de que haya auto limpieza conforme el proceso de la sedimentación se va llevando a cabo a través del tiempo. Las dimensiones de dichas placas son 4.0 metros de longitud, 0.69 metros de ancho y 0.05 metros de espesor. Cada espacio entre placas debe considerarse como un pequeño sedimentador que tiene que recibir la misma cantidad de agua que los otros (Arboleda 2000) **Figura 3.5**.

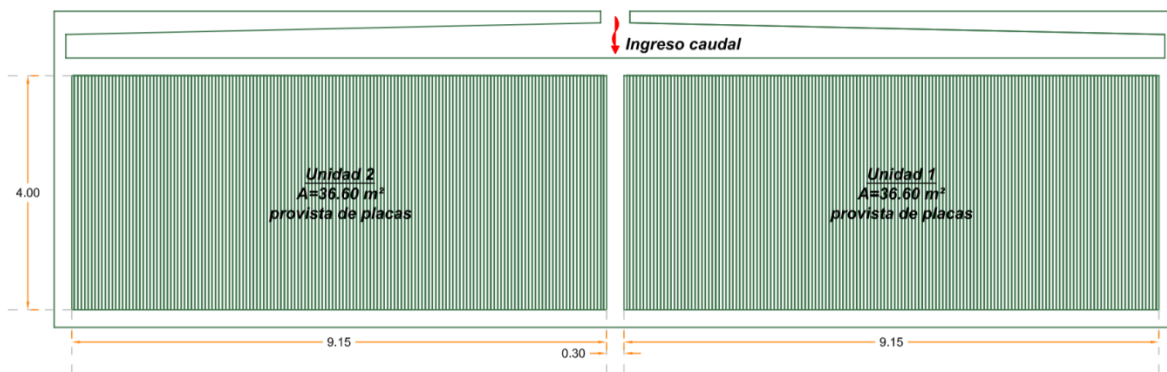


Figura 3.4. Vista en planta de la zona de placas.

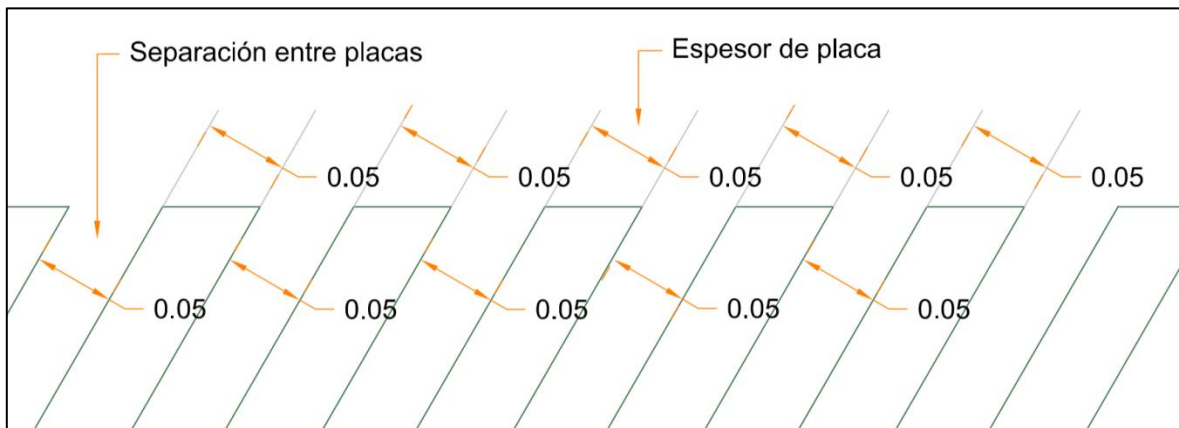


Figura 3.5. Configuración zona de placas, vista frontal.

La unidad de tratamiento cuenta con 12 vigas tipo IPR de 8"x4" para soporte de las placas, 6 para cada tanque de sedimentación. Dichos elementos estructurales

se ubican a una distancia de 3.30 m con respecto a la base del sedimentador, cada viga tiene una longitud de 4.0 m, como se muestra en la **Figura 3.6**.

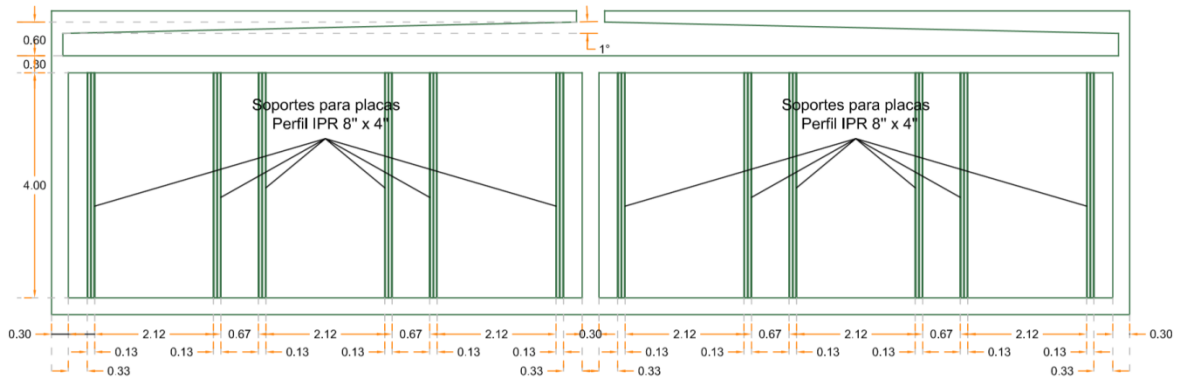


Figura 3.6. Soportes para placas.

3.1.4 Zona de lodos

La zona de lodos está conformada por cuatro tolvas, dos por cada unidad de sedimentación; su geometría es igual a la de una pirámide trunca invertida, es decir, que tiene la corona de menor tamaño hacia abajo y la mayor hacia arriba, ésta última colinda con la zona de sedimentación. Las dimensiones de la corona pequeña son 0.69 m de largo y 0.22 m de ancho, mientras que para la mayor se tiene 4.48 m de largo y 4.0 m de ancho. Los planos que unen a ambas coronas, tienen un ángulo de inclinación de 48° , esto con el objetivo de que exista auto limpieza y evitar la obstrucción del flujo debido a limpieza mecánica. La configuración de la zona de lodos se muestra en la **Figura 3.7** y **Figura 3.8**.

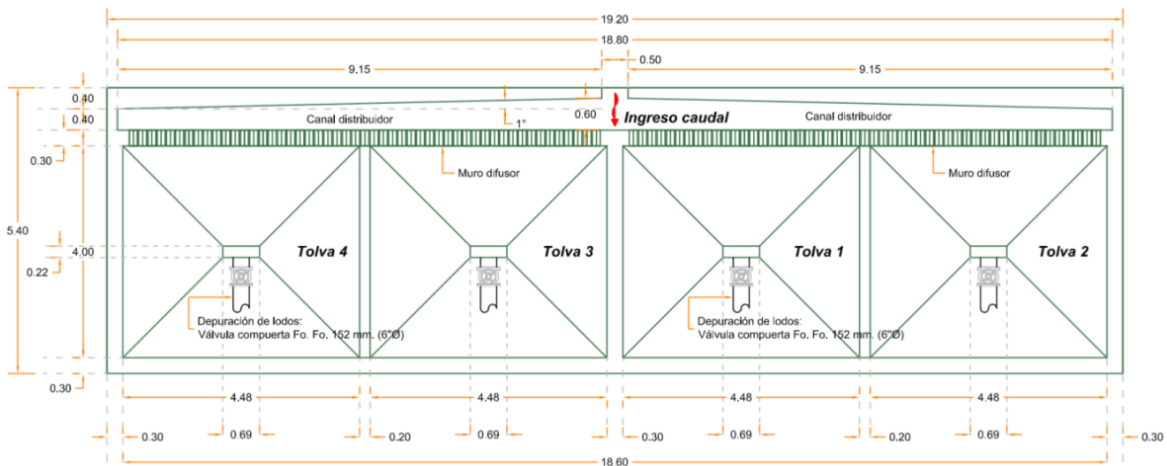


Figura 3.7. Vista en planta de la zona de lodos (tolvas).

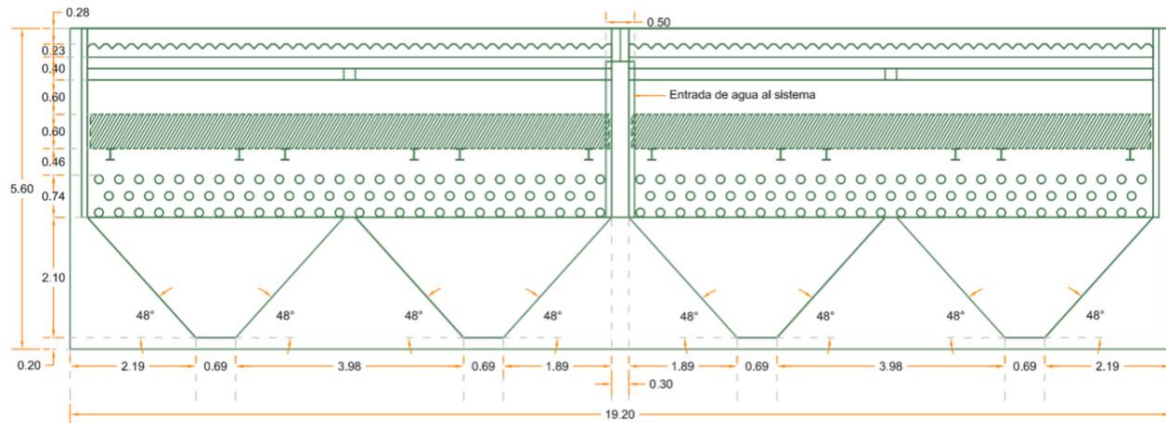


Figura 3.8. Vista frontal de sedimentador.

3.1.5 Zona de salida

La zona de salida se encuentra identificada por medio de una canaleta de lámina con calidad Al-304 y espesor 0.015 m, que tiene sección rectangular con dimensiones 0.40 x 0.43 m de ancho y alto, respectivamente. Dicha canaleta es soportada por traveses de concreto armado de sección 0.20 x 0.20 m y se encuentra ubicada a 4.90 m con respecto a la base del sedimentador y centrada sobre la zona de sedimentación, **Figura 3.9**. Las paredes de la canaleta de salida se encuentran provistas de *vertedores triangulares* con dimensiones 0.016 m de base y 0.08 m de altura, la separación entre ellos es de 0.07 m, tal como se muestra en la **Figura 3.10**.

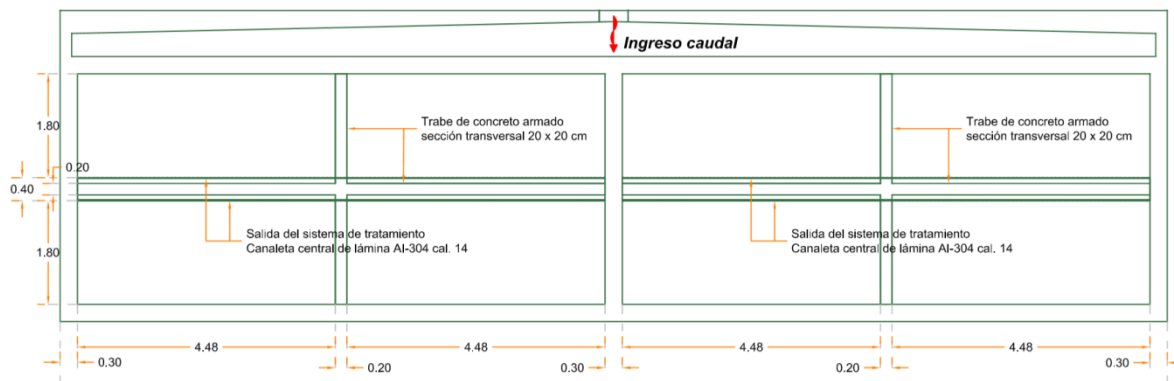


Figura 3.9. Vista en planta de canaleta de salida o efluente del sedimentador.

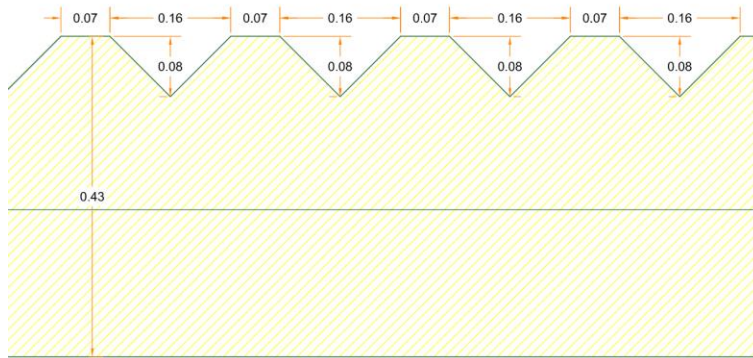


Figura 3.10. Corte transversal de la zona de vertedores de salida.

3.2. Evaluación teórica

A continuación se muestra el cálculo de los parámetros fundamentales para evaluar el desempeño de un sedimentador de alta tasa, datos como caudal y geometría son indispensables para obtener un panorama del rendimiento de dicha unidad. Para el análisis teórico se requiere hacer uso de las expresiones para sedimentadores convencionales así como para los de alta tasa debido a que los elementos inclinados son instalados dentro de un tanque convencional y esto beneficia en la disminución de terreno a utilizar para dicha unidad de tratamiento.

En seguida se presentan los datos iniciales del sedimentador que será evaluado:

Tipo de unidad:	Sedimentador de alta tasa.
Geometría:	Rectangular.
Flujo:	Inclinado (zona de placas).
Caudal de diseño:	115 l/s.
Número de módulos:	1.0
Unidades por módulo:	2.0
Caudal por unidad:	57.5 l/s.
Módulo de sedimentación:	Tubular inclinado a 60°.
Altura del módulo:	0.60 m.
Carga superficial:	138.24 m/d.

3.2.1 Revisión del sistema convencional

El análisis convencional es la aplicación de la teoría de Hazen (1904) y Camp (1946) basado en lo ya explicado en el subcapítulo 2.1 que hace referencia a las expresiones obtenidas de suponer un tanque ideal de sedimentación.

Carga superficial por ecuación (2-25).

$$C_s = \frac{Q}{A_s} = \frac{0.0575}{(9.15)(4.0)} = 0.0016 \frac{m^3}{m^2 \cdot s} = 5.76 \frac{m^3}{m^2 \cdot h} = 138.24 \frac{m}{d}$$

Donde A_s es el área superficial del tanque sedimentador.

Tiempo de residencia por ecuación (2-16).

$$\tau = \frac{V}{Q} = \frac{(9.15)(4.0)(3.30)}{0.0575} = \frac{120.78}{0.0575} = 2100.52 \text{ s} = 35 \text{ min} = 0.58 \text{ h}$$

Velocidad del fluido por ecuación (2-19).

$$v_f = \frac{Q}{A_t} = \frac{0.0575}{(4.0)(3.30)} = \frac{0.0575}{13.20} = 0.0043 \frac{m}{s} = 0.2613 \frac{m}{min}$$

Donde A_t es el área transversal del sedimentador; V es capacidad del tanque.

Según la **Tabla 2.2**, la carga superficial (tasa de flujo por m^2 de superficie) en tanques convencionales debe encontrarse en el rango 1.25 a 2.5 m/h, por lo que, aplicando dicho criterio a lo calculado en este apartado, se supera el límite máximo permisible de aproximadamente en 200%, lo que refleja una velocidad elevada del flujo.

El tiempo de residencia en la tabla anteriormente mencionada, establece que dicho indicador debe encontrarse entre 1.5 a 4.0 h por lo que el calculado para el sedimentador en estudio se encuentra muy por debajo del recomendando, lo que se traduce en un flujo tipo cortocircuito.

La velocidad del flujo debe ser aproximadamente igual a 0.3-1.1 m/min por lo que la calculada para la unidad de tratamiento en estudio es ligeramente menor al límite mínimo permisible, sin embargo la magnitud de la velocidad que experimenta el sedimentador en estudio es lo suficientemente elevada para generar cortocircuito en el sistema.

3.2.2 Revisión del sistema de alta tasa

El análisis del sistema de alta tasa hace referencia a la aplicación de la teoría de Yao (1970) quien generaliza las ecuaciones de la teoría del sedimentador ideal, rectangular convencional y las adapta a elementos inclinados.

Velocidad del fluido por ecuación (2-21)

$$v_{f\theta} = \frac{Q}{A_s \text{sen}\theta} = \frac{0.0575}{(36.60)\text{sen}60} = 0.0020 \frac{m}{s} = 0.12 \frac{m}{min}$$

Número de Reynolds por ecuación (2-24)

$$R_e = \frac{v_{f\theta} d}{\nu} = \frac{(0.002)(0.05)}{1 \times 10^{-6}} = 100.00$$

Longitud efectiva relativa

$$L_c = L - L' \quad 3-1$$

$$L = \frac{\ell}{d} = \frac{0.69}{0.05} = 13.80m$$

Longitud representativa por ecuación (2-27)

$$L' = 0.013R_{e\theta} = (0.013)(100) = 1.3m$$

$$L_c = 13.80 - 1.30 = 11.20$$

Carga superficial por ecuación (2-15)

$$v_{sc} = \frac{v_{f\theta}}{(\text{sen}\theta + L_c \text{cos}\theta)} = \frac{0.002}{\text{sen}60 + 11.20\text{cos}60} = 0.0006 \frac{m}{s} = 2.16 \frac{m}{h}$$

Tiempo de residencia por ecuación (2-18).

$$\tau_{\theta} = \frac{l}{v_{f\theta}} = \frac{0.69}{0.002} = 345 \text{ s} = 5.75 \text{ min}$$

La velocidad en los elementos inclinados debe oscilar entre 0.15 a 2.0 m/min tal como se establece en la **Tabla 2.3**. El cálculo de este parámetro para la unidad de tratamiento en estudio arroja un valor de 0.12 m/min, se encuentra por debajo de límite mínimo permisible.

El número de Reynolds teórico es del orden de 100 por lo que cumple con lo establecido en los criterios de diseño, se promueve un flujo de tipo laminar.

La carga superficial calculada se encuentra muy cercana a la mínima sugerida por Crittenden para floc de aluminio con valor de 2.5 m/h en la tabla ya mencionada.

Con respecto al tiempo de residencia en las placas, el valor calculado se aproxima de manera importante al límite máximo permisible lo que se interpreta como una velocidad lo suficientemente elevada como para promover cortocircuito en la zona de sedimentación.

3.3 Determinación de eficiencia de un sedimentador

Una vez que el diseñador configura su sedimentador, queda la duda si este sistema funciona de manera adecuada, y se espera tener una discrepancia importante generada por los criterios mismos de diseño, por ejemplo considerar que los patrones de flujo son uniformes e incluso que existe un flujo pistón, cuando en realidad los patrones de flujo pueden tener comportamientos erráticos.

En el trabajo presentado por Santacruz (2005) se presenta que los patrones de flujo son turbulentos aunque el número de Reynolds sea bajo $R_e < 300$, tal como se muestra en la **Figura 3.11**.

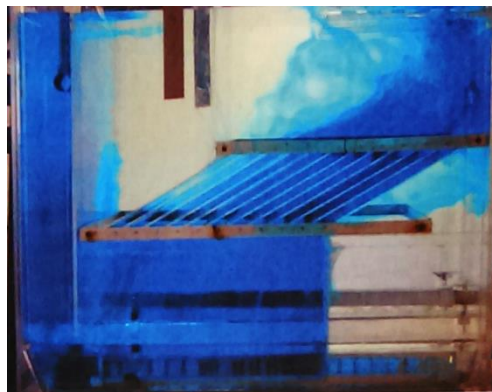


Figura 3.11. Modelo físico de sedimentador de alta tasa.

Entonces se demuestra que existe una discrepancia entre la teoría de diseño (flujo con comportamiento uniforme) a la realidad que corresponde a flujo turbulento con patrones no uniforme.

Una forma de evaluar en forma global el funcionamiento real de un sedimentador de alta se indica en documento “Tratamiento de Agua para Consumo Humano, Plantas de Filtración Rápida, Manual III: Evaluación de Plantas de Tecnología Apropiable (CEPIS, 2005)”. La eficiencia de un sedimentador se puede determinar mediante los factores presentados en la **Figura 3.12**.

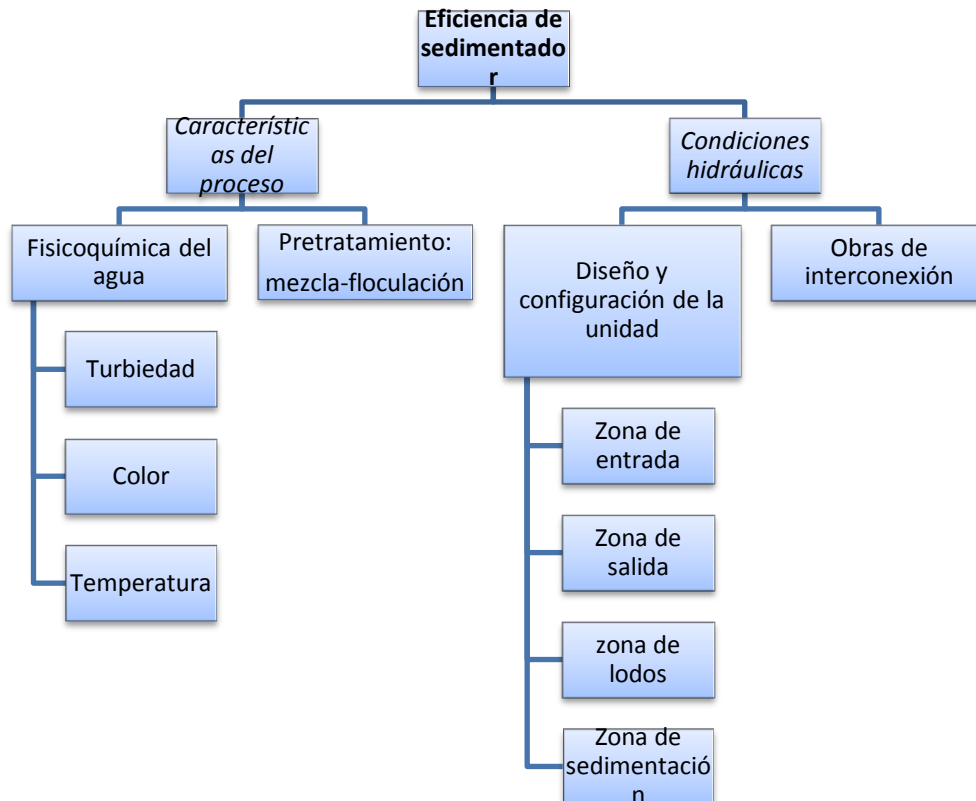


Figura 3.12. Organigrama para determinar eficiencia de sedimentador.

La evaluación de una unidad de sedimentación comprende:

- Geometría de la unidad;
- Comportamiento del canal de distribución;
- Tiempo de residencia;
- Características hidráulicas;
- Velocidad óptima de sedimentación;
- Carga superficial real, se utiliza tiempo de residencia determinado por trazadores;
- Características de las zonas de entrada y salida.

3.3.1 Metodología en campo

En la práctica, el método más usual para evaluar las unidades de tratamiento que componen a una planta, es por medio de la técnica con trazadores. Los trazadores pueden ser: colorantes, cloruros, ácidos o sustancias radiactivas. Cuando se haya elegido el trazador ideal para el tipo de agua a tratar es aplicado en concentración conocida (C_o) al caudal de ingreso (entrada) y de manera simultánea se registra la misma a la salida de la unidad en función del tiempo.

La sustancia puede dosificarse de dos maneras, continua e instantánea; ésta última se realiza en un intervalo de tiempo (Δt) muy corto. Si se realiza la dosificación instantánea en un flujo tipo pistón la representación gráfica sería como la presentada en la **Figura 3.13** (a). Si se realiza la aplicación de un trazador de manera continua en un flujo no ideal, la representación de la misma se observa en la **Figura 3.13** (f). Dichas representaciones son el resultado de medir la concentración de la sustancia trazadora a la salida del sistema de tratamiento.

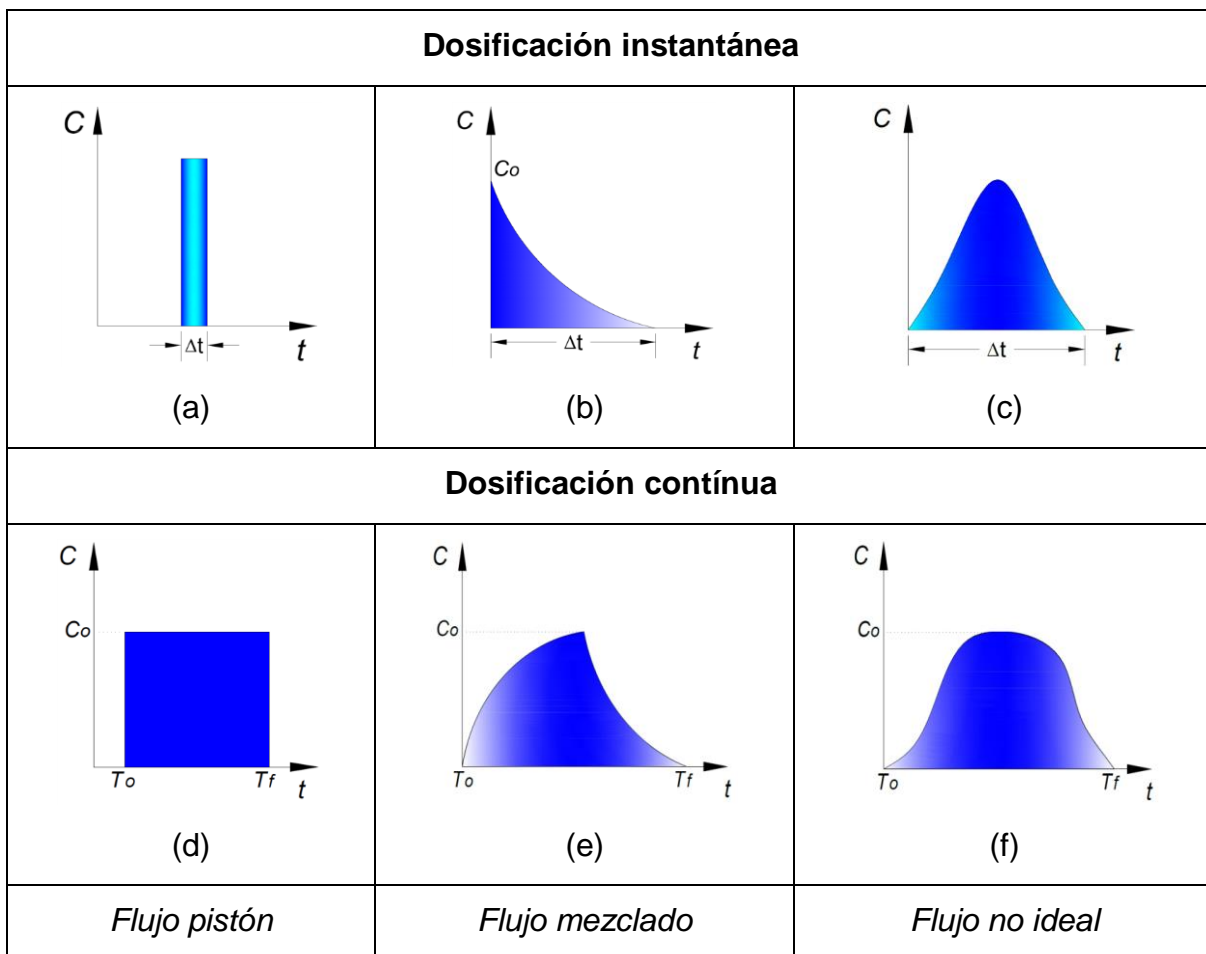


Figura 3.13. Curvas típicas de concentración en el tiempo de sustancia trazadora.

El diseño de las unidades de tratamiento, en particular los sedimentadores, son hechos para que en dicha unidad de tratamiento se presente el máximo de flujo pistón, pues con eso se garantiza que el agua tenga el tratamiento que se busca durante el periodo de residencia proyectado (CEPIS, 2005).

A continuación, en la **Figura 3.14** se presenta una curva tiempo-concentración en un tipo de flujo no ideal con la cual se puede caracterizar el comportamiento hidráulico dentro de una unidad de tratamiento, para esta investigación se hace referencia a la hidrodinámica de un sedimentador.

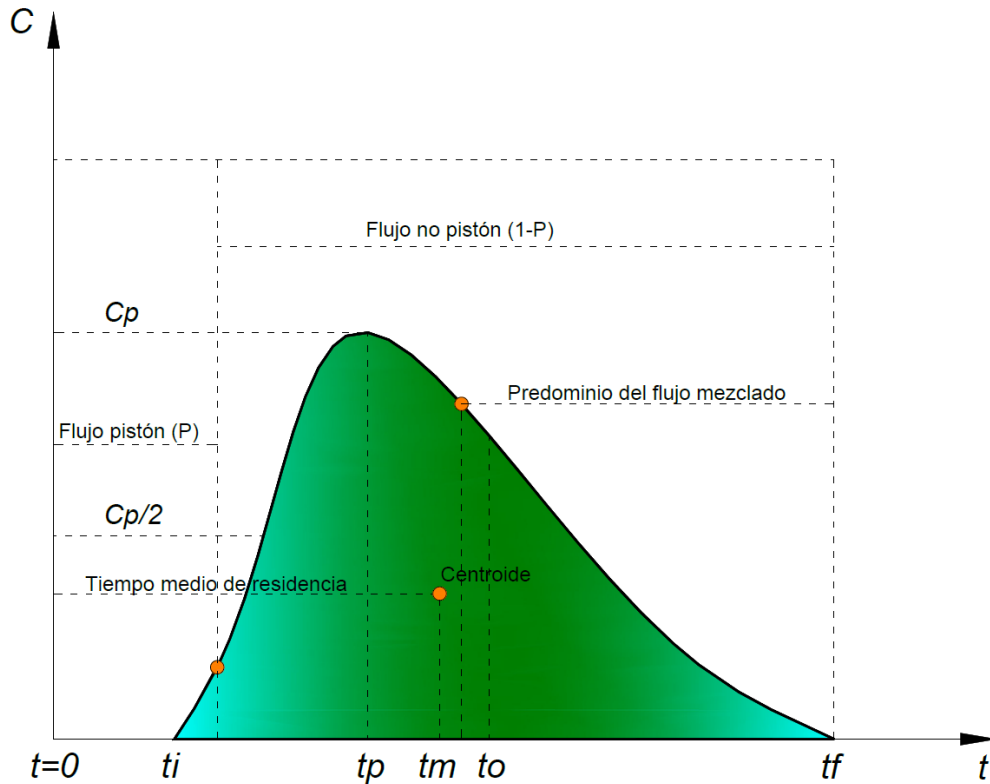


Figura 3.14. Concentración de trazador en el efluente de un sedimentador.

- t_i Tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente.
- t_p Tiempo modal correspondiente a la presentación de la máxima concentración.
- t_m Tiempo mediano, correspondiente al paso del 50% de la cantidad del trazador.
- t_o Tiempo medio de residencia o tiempo teórico de residencia= V/Q .

t_f Tiempo que transcurre hasta que atraviesa la totalidad del trazador al sedimentador.

C_o Concentración inicial.

C_p Concentración máxima a la salida.

Con apoyo de la **Figura 3.14**, se pueden aplicar los siguientes criterios:

- a) Medir cortocircuitos grandes. Si el valor de (t_i/t_o) de la ecuación 3-2 es < 0.30 , puede significar que existe paso directo del trazador entre la entrada y salida (cortocircuito hidráulico). Si es mayor hay errores experimentales o existen zonas donde el trazador ha quedado retenido por un cierto tiempo (espacios muertos) para luego salir lentamente, con lo que la rama descendente de la curva presenta una curva alargada, que desplaza el centroide del área y aumenta el valor de t_m , haciendo $t_m > t_o$:

$$t_i/t_o \quad 3-2$$

- b) Cuando (t_p/t_o) de la ecuación 3-3 se aproxima a 1 y (t_i/t_o) de la ecuación 3-2 es mayor que 0.5 se puede inferir que predomina el flujo pistón, y cuando se aproxima a 0, predomina el flujo mezclado:

$$t_p/t_o \quad 3-3$$

- c) La ecuación 3-4, está relacionada con la difusión debida a corrientes de inercia (turbulencia). Es similar al cociente $(\Delta t_o/t_o)$ que se interpreta como la razón de tiempo de inyección. Cuando dicha ecuación es del orden de 0.70 significa que existe flujo mezclado:

$$t_c/t_o \approx \Delta t_o/t_o \quad 3-4$$

- d) La ecuación 3-5, expresa la excentricidad de la curva, por lo que es función de la recirculación, Es igual a 0 para flujo pistón y mayor que 2.3 para flujo mezclado ideal:

$$e = \frac{(t_f - t_p) - t_p - t_i}{t_o} \quad 3-5$$

Utilizando la técnica de trazadores se logra realizar la caracterización del flujo dentro de un sedimentador en función de la forma de la curva de concentración en función del tiempo a la salida de la unidad, dicha técnica es utilizada en campo y en laboratorio.

CAPÍTULO 4 . MODELACION CON DINÁMICA DE FLUIDOS (DFC)

Para efectos de la modelación numérica del sedimentador de flujo laminar, se aprovechó la simetría del mismo y posterior a un análisis geométrico mediante la herramienta computacional de dibujo, se determinó que era factible la modelación de sólo la mitad de la unidad de tratamiento en estudio lo que tuvo un beneficio considerable en el tiempo de cómputo, es decir, una disminución del mismo. Las dimensiones del sedimentador con dicha modificación son 9.60 metros de largo, 5.40 de ancho y 5.60 de alto.

El software que se utilizó en este estudio para la modelación numérica fue PHOENICS® es un programa de propósito general que utiliza la técnica Dinámica de Fluidos Computacional (DFC), para predecir cuantitativamente cómo los fluidos: agua, aire, vapor, aceite, sangre, etc. Fluyen en y alrededor de motores, edificios, seres humanos lagos, ríos y océanos, entre otros. PHOENICS® es el acrónimo de *Parabolic Hyperbolic Or Elliptic Numerical Integration Code Series*. Los procesos básicos de dicho software son; pre-proceso, solución de ecuaciones Navier-Stokes, pos-proceso.

4.1 Pre-proceso

La primera actividad de esta etapa es delimitar el *dominio* que se puede definir como el campo tridimensional donde se da solución a las ecuaciones de Navier-Stokes, es decir, donde se evaluará conservación de masa y cantidad de movimiento. También se puede interpretar como el volumen que será inundado por el agua una vez que se ha definido la *entrada* y *salida* sobre el sólido 3D del sedimentador.

4.1.1 Elaboración de archivo STL

Para hacer la evaluación hidrodinámica del sedimentador mediante el uso del software de mecánica de fluidos computacional PHOENICS®, es necesario contar con un archivo del tipo *StereoLithography* (STL) también conocido como *3D printing*. Dicho formato se obtiene al ser elegido como opción de *exportado* en el software de Diseño Asistido por Computadora (CAD) por sus siglas en inglés. El STL se utiliza comúnmente en la generación de prototipos en corto tiempo o rápidos, fabricación rápida y otras aplicaciones para crear partes físicas y modelos, esto según el módulo de ayuda de la herramienta de dibujo AutoCAD® versión 2014.

El STL es la representación del sólido 3D mediante una malla compuesta por planos triangulares o *triangulación*, dicho formato carece de textura y sólo conforma la geometría del cuerpo a modelar que para este caso es el sedimentador de alta tasa **Figura 4.1**.

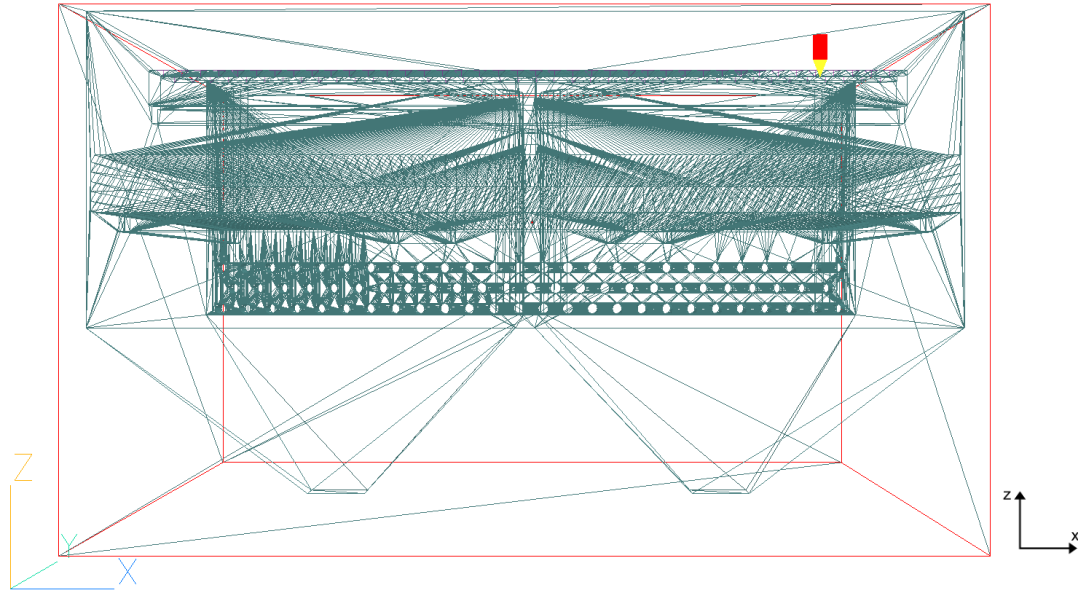


Figura 4.1. Formato Stereo Lithography (STL), vista frontal.

4.1.2 Origen y ejes referencia para modelación

En la herramienta computacional de dibujo se estableció un sistema coordenado mediante un punto origen O con el cual fueron referenciados todos los elementos que integran a la unidad de tratamiento. Dicho sistema coordenado es reconocido por PHOENICS[®] lo que facilita la introducción del STL al software DFC. La propiedad de longitud se vinculó con el eje x , el ancho con el eje y , altura con el eje z , respectivamente **Figura 4.2.**

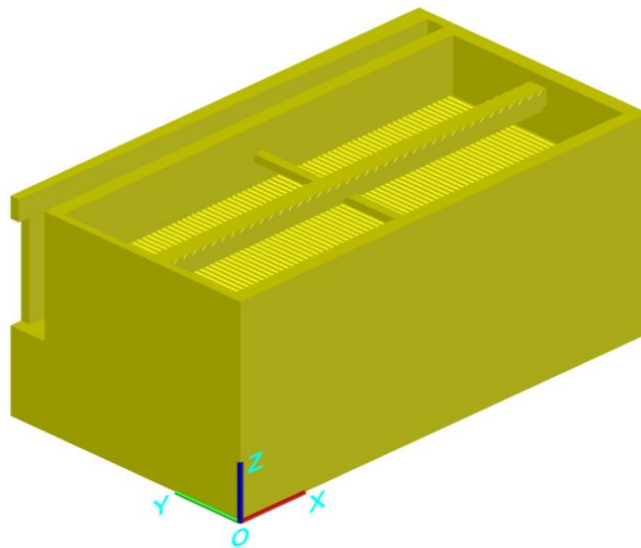


Figura 4.2. Sistema coordenado para simulación.

4.1.3 Entrada al sedimentador

Es la ubicación de la sección rectangular por la cual ingresa el caudal a simular, que por razones que se han explicado al inicio de este capítulo será el gasto original dividido en dos, es decir 57.5 litros por segundo. Dicho gasto es asignado como atributo a la sección que se define como “entrada”; ésta a su vez se ubica en las coordenadas $x = 0$, $y = 5.40$ y $z = 2.30$ metros. Sus dimensiones son $x = 0.25$ y $z = 2.72$ metros.

4.1.4 Salida del sedimentador

Como se muestra en la **Tabla 4.1**, la canaleta de salida se compone por 80 vertedores de sección triangular, todos ellos con dimensión $x = 0.16$ y $z = 0.08$ metros. Los detalles de los vertedores pueden apreciarse en la **Figura 3.10** y **Figura 3.9**.

Tabla 4.1. Coordenadas del vértice superior derecho, de vertedores de salida.

Vertedor	x	y	z	Vertedor	x	y	z	Vertedor	x	y	z	Vertedor	x	y	z
1	0.32	2.1	5.285	21	4.82	2.1	5.285	41	0.32	2.5	5.285	61	4.82	2.5	5.285
2	0.54	2.1	5.285	22	5.04	2.1	5.285	42	0.54	2.5	5.285	62	5.04	2.5	5.285
3	0.77	2.1	5.285	23	5.27	2.1	5.285	43	0.77	2.5	5.285	63	5.27	2.5	5.285
4	0.99	2.1	5.285	24	5.49	2.1	5.285	44	0.99	2.5	5.285	64	5.49	2.5	5.285
5	1.22	2.1	5.285	25	5.72	2.1	5.285	45	1.22	2.5	5.285	65	5.72	2.5	5.285
6	1.44	2.1	5.285	26	5.94	2.1	5.285	46	1.44	2.5	5.285	66	5.94	2.5	5.285
7	1.67	2.1	5.285	27	6.17	2.1	5.285	47	1.67	2.5	5.285	67	6.17	2.5	5.285
8	1.89	2.1	5.285	28	6.39	2.1	5.285	48	1.89	2.5	5.285	68	6.39	2.5	5.285
9	2.12	2.1	5.285	29	6.62	2.1	5.285	49	2.12	2.5	5.285	69	6.62	2.5	5.285
10	2.34	2.1	5.285	30	6.84	2.1	5.285	50	2.34	2.5	5.285	70	6.84	2.5	5.285
11	2.57	2.1	5.285	31	7.07	2.1	5.285	51	2.57	2.5	5.285	71	7.07	2.5	5.285
12	2.79	2.1	5.285	32	7.29	2.1	5.285	52	2.79	2.5	5.285	72	7.29	2.5	5.285
13	3.02	2.1	5.285	33	7.52	2.1	5.285	53	3.02	2.5	5.285	73	7.52	2.5	5.285
14	3.24	2.1	5.285	34	7.74	2.1	5.285	54	3.24	2.5	5.285	74	7.74	2.5	5.285
15	3.47	2.1	5.285	35	7.97	2.1	5.285	55	3.47	2.5	5.285	75	7.97	2.5	5.285
16	3.69	2.1	5.285	36	8.19	2.1	5.285	56	3.69	2.5	5.285	76	8.19	2.5	5.285
17	3.92	2.1	5.285	37	8.42	2.1	5.285	57	3.92	2.5	5.285	77	8.42	2.5	5.285
18	4.14	2.1	5.285	38	8.64	2.1	5.285	58	4.14	2.5	5.285	78	8.64	2.5	5.285
19	4.37	2.1	5.285	39	8.87	2.1	5.285	59	4.37	2.5	5.285	79	8.87	2.5	5.285
20	4.59	2.1	5.285	40	9.09	2.1	5.285	60	4.59	2.5	5.285	80	9.09	2.5	5.285

CAPÍTULO 5 . RESULTADOS DE MODELACION

5.1 Prototipo original

La unidad de tratamiento en estudio fue diseñada para tratar un caudal de $0.0575 \text{ m}^3/\text{s}$, la simulación del fluido dentro de la misma, tuvo una duración promedio de 18 horas. Las condiciones iniciales de modelación se muestran en **Tabla 5.1**.

Tabla 5.1. Condiciones iniciales para simulación del fluido.

Configuración del dominio	Característica	Unidades
Tamaño del dominio (x,y,z)	(9.60,5.40,5.60)	metros
Sistema coordenado	Cartesiano	
Dependencia del tiempo	Permanente	
Número de celdas (Nx, Ny, Nz)	(296, 50, 195)	
Ecuación diferencial	Elíptica-escanolada	
Fases	Una (agua)	
Modelo de turbulencia	$k - e$	
Presión de referencia	101325.0	Pascales
Temperatura de referencia	273° (20°)	Kelvin (Celcius)
Rugosidad absoluta de pared	0.001	metros
Número total de iteraciones	3000	
Número mínimo de iteraciones	1.0	

5.2 Zonas muertas en la entrada

A cotinuacion, en al **Figura 5.1**, se presenta la configuración de la zona de entrada del sedimentador de alta tasa del prototipo original.

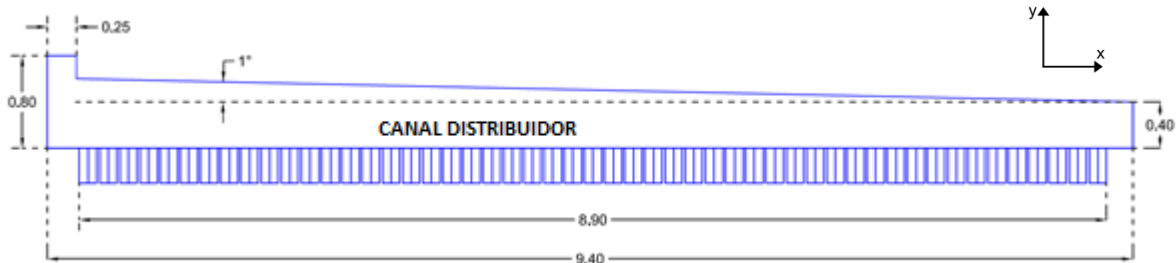
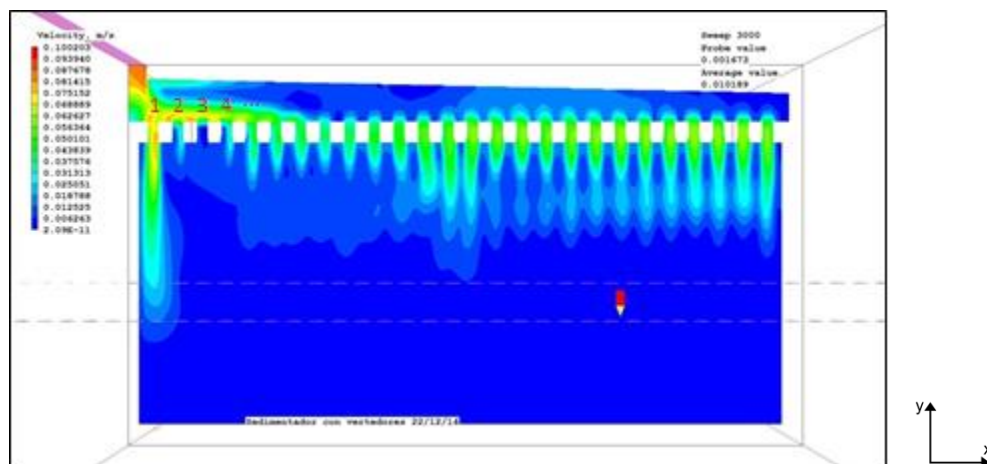
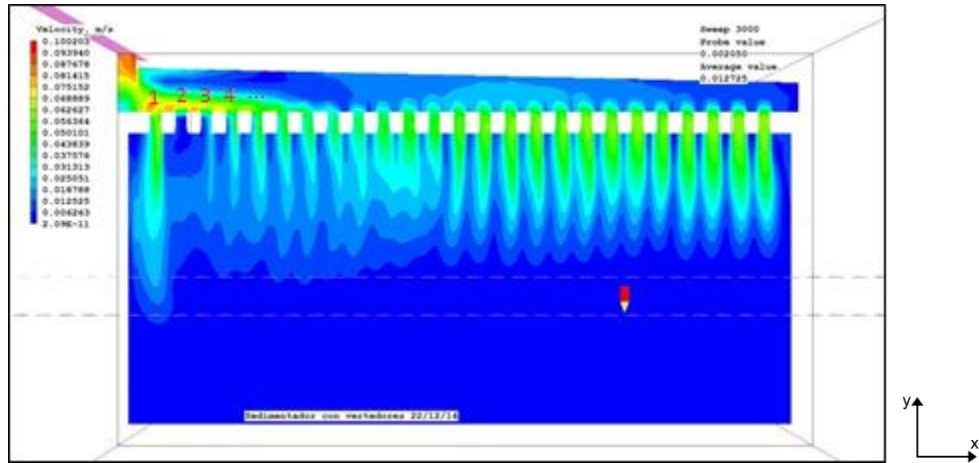


Figura 5.1. Entrada prototipo original, vista en planta.

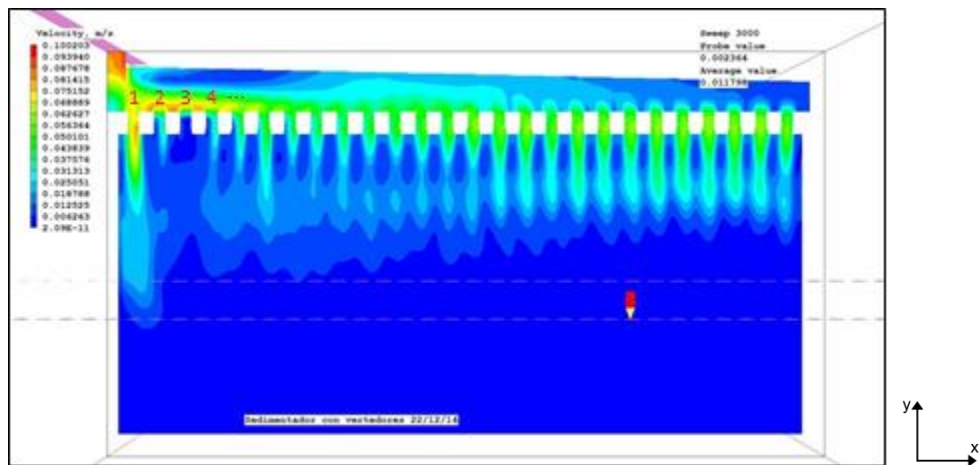
Retomando la **Figura 3.3**, se enfatiza que el muro difusor cuenta con tres hileras de orificios, separadas a 0.14 metros una con respecto a otra. La primera hilera se encuentra a 2.39 metros, la segunda a 2.68 metros y la tercera a 2.97 metros, medido del centro de fila al origen 0 . En la **Figura 5.2** se presentan los campos vectoriales determinados mediante el DFC, en el plano z de cada una de dichas hileras, las cuales son los elementos colindantes con la zona de sedimentación, por lo que su análisis hidrodinámico es de importancia relevante.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.2. Campos de flujo, plano z (vista en planta), prototipo original;
 (a) 2.39m, (b) 2.68m, (c) 2.97m.

En la **Figura 5.2** se observa la existencia de zonas muertas en los tres niveles de orificios, eje z; en el inciso (a) y (c) el fenómeno se presenta en el tercer orificio, en el inciso (b), se manifiesta en el segundo orificio. Otra zona muerta se presenta en el canal distribuidor, se aprecia un área considerable de masa inmóvil identificada como zona muerta 1 en la **Figura 5.3**. Si realizamos un acercamiento a dicha zona y utilizamos vectores en lugar de iso-contornos podremos observar tal y como se presenta en la imagen anterior mencionada.

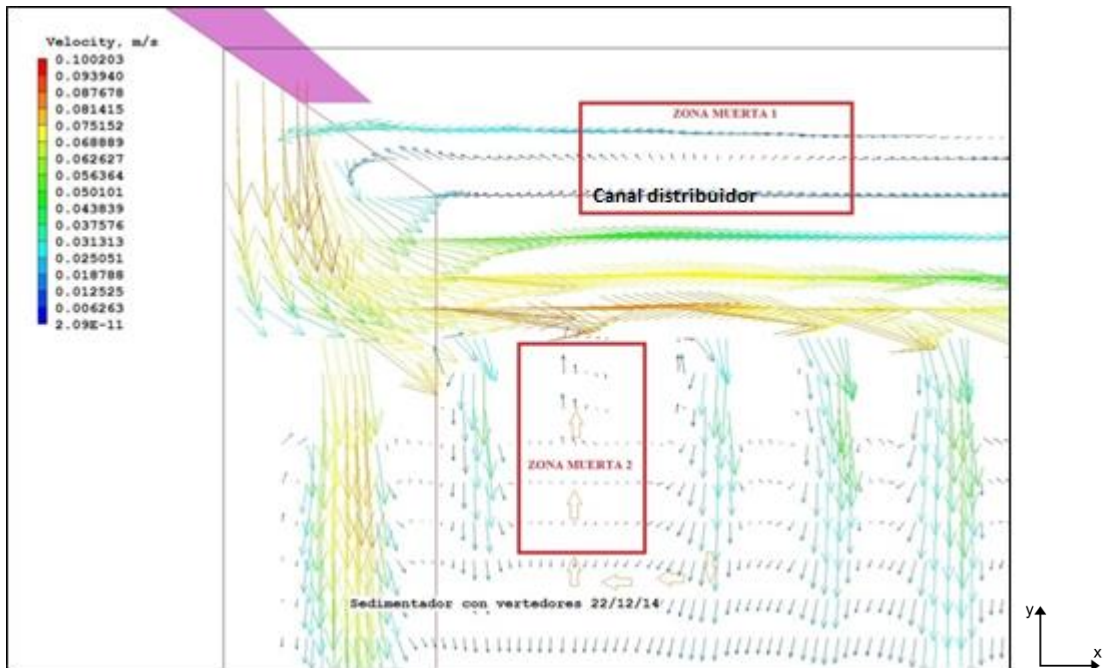


Figura 5.3. Zonas muertas en la entrada (vista en planta)

La zona muerta 1 se encuentra ubicada en el canal distribuidor aproximadamente a 1.60 metros con respecto a la entrada sobre el eje x y 5.0 metros sobre el eje y . Esta zona se genera por el choque de corrientes de diferente sentido, una en sentido apuesto a la entrada y otra a favor de ella. Por otro lado, la presencia de la zona muerta 2, es consecuencia de la velocidad alta con la que ingresa el flujo a la unidad de tratamiento, dicha velocidad alta, impide el ingreso del flujo al tercer orificio, no así, al resto. El flujo ingresa por el cuarto orificio y al experimentar ausencia de corriente en el tercero, se introduce en éste con sentido opuesto a la mayoría de la masa de agua lo que origina una recirculación.

5.3 Zonas muertas en placas

Existen elementos inclinados que no funcionan como sedimentadores de alta tasa debido a que las vigas IPR que se han colocado para soportar a las mismas, obstruyen el paso del flujo a través de ellas, lo que las convierte en zonas muertas, tal es el caso de los campos que aparecen en la **Figura 5.4** y **Figura 5.5**, enumeradas de izquierda a derecha, para ser más precisos los campos 3, 22 y 48, respectivamente. Para identificar ubicación y distribución de las vigas mencionadas se puede recurrir a la **Figura 3.9**.

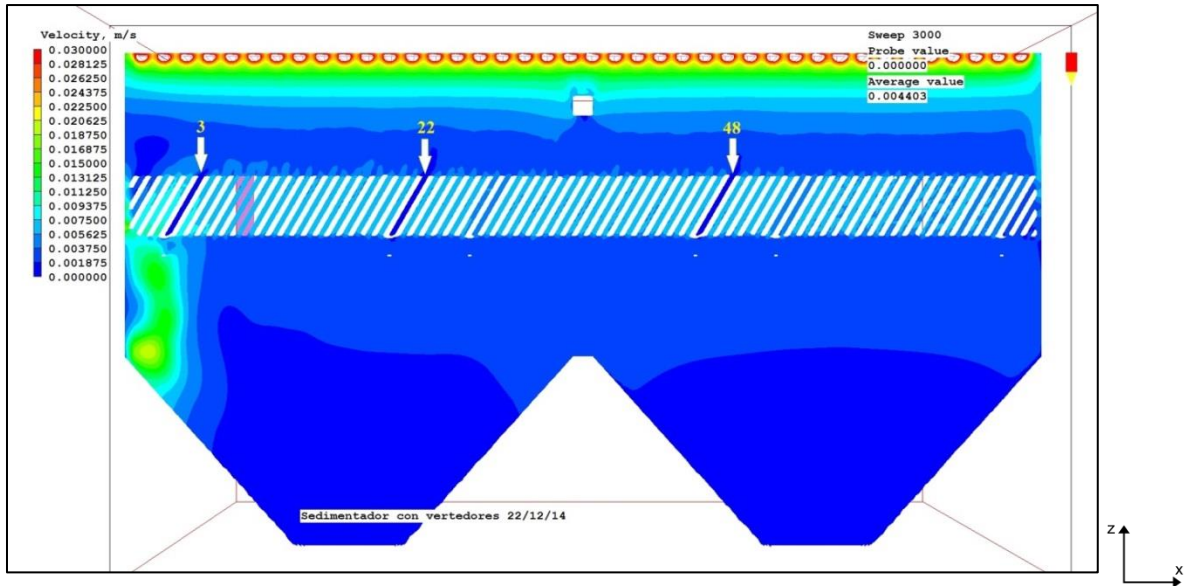


Figura 5.4. Zonas muertas en placas (isocontornos)

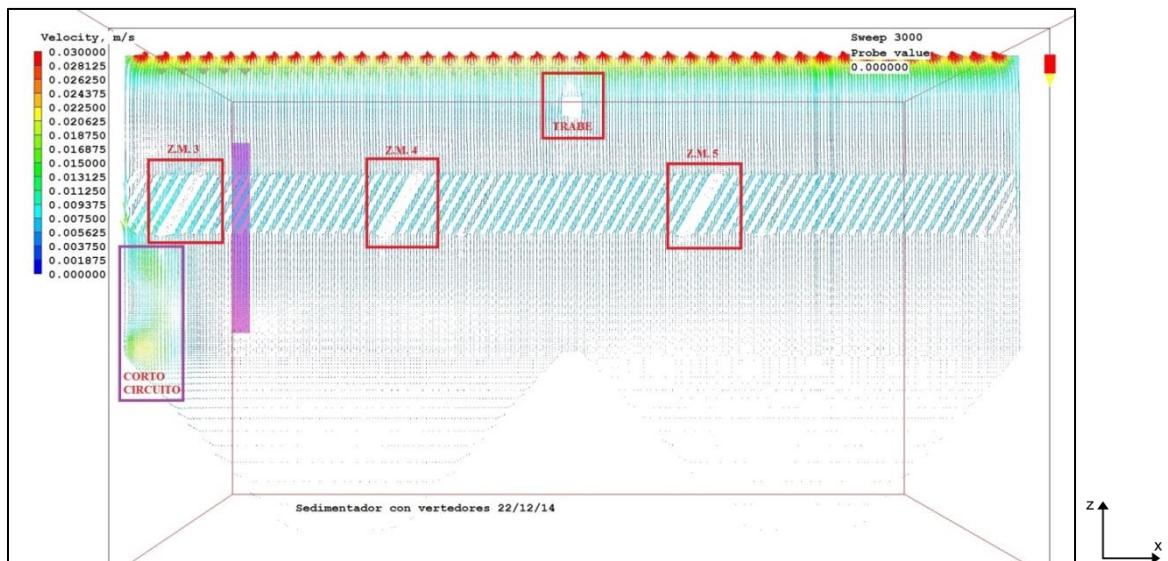


Figura 5.5. Zonas muertas en placas (vectores).

5.3.1 Número de Reynolds en placas

Hasta esta parte de la modelación, los campos “ortogonales” que genera el DFC han sido de gran utilidad para visualizar zonas muertas en los planos x, y, z , sin embargo, con el objetivo de realizar un análisis detallado y minucioso de los campos de flujo entre placas para poder determinar los parámetros fundamentales que caracterizan a los sedimentadores de alta tasa, se procedió a exportar los datos numéricos de velocidad generados por PHOENICS®, al lenguaje de programación MATLAB®, para poder reproducir los campos mencionados con la

inclinación que experimentan las placas, es decir, $\theta = 60^\circ$. La decisión de exportar los datos numéricos también fue válida debido a que era necesario determinar el número de Reynolds en los 74 campos de flujo para conocer si dichos elementos se encontraban dentro de los parámetros recomendados que han sido mencionados en la **Tabla 2.3**.

El muestreo del Número de Reynolds se determinó mediante la elaboración de una *matriz origen* constituida por 35 elementos (7 filas, 5 columnas) por cada uno de los 74 campos de flujo entre placas, **Figura 5.6**, es decir, se analizaron un total de 2,590 muestras para poder realizar la reproducción del tipo de flujo que experimentan los elementos inclinados.

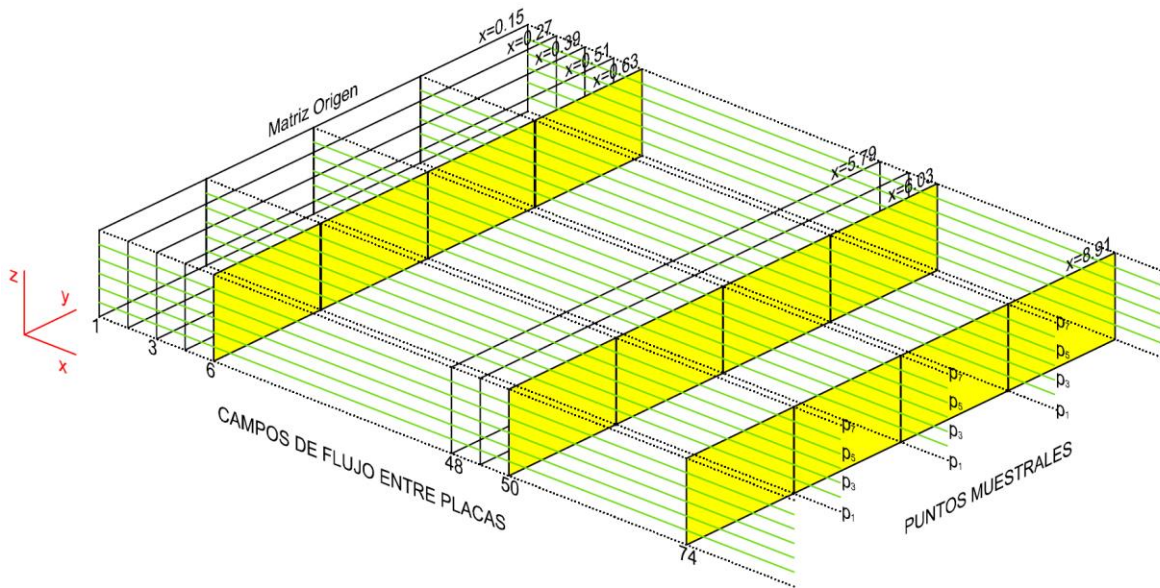


Figura 5.6. Campos de flujo entre placas.

Dicha matriz origen es aquella que se utilizó como referencia para proyectar los puntos de interés en cada campo de flujo entre placas y extraer los datos de velocidad y con ellos calcular el Número de Reynolds correspondiente a dichos puntos. El análisis realiza en dirección del eje x. **Figura 5.7**.

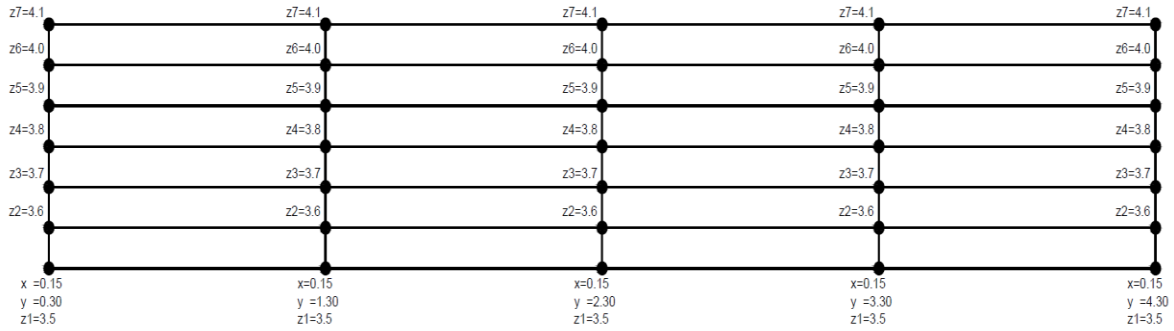


Figura 5.7. Matriz origen.

Cuando se han obtenido los valores de Reynolds mediante la ecuación (2-24) , **Tabla 2.1**, página 28, se procede a realizar un mapa por cada campo de flujo entre placas, donde a cada valor se le asigna un color y mediante la interpolación se logra generar una visualización como se muestra en la **Figura 5.8**.

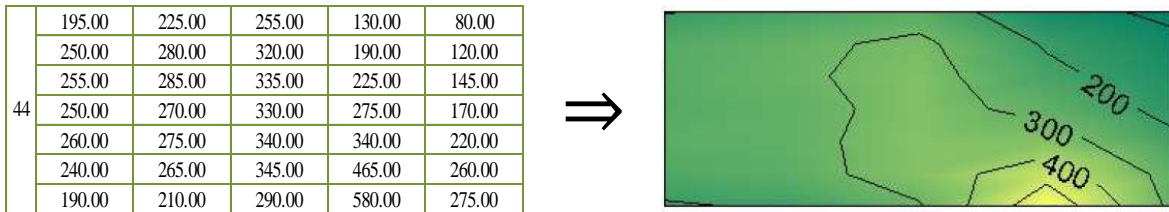


Figura 5.8. Representación gráfica del Número de Reynolds

La visualización de los campos de flujo entre placas se considera de importancia debido a que se aprecia en mejor manera el comportamiento individual en cada elemento inclinado, con esto, se pueden proponer mejoras al diseño como se ha realizado en este capítulo de tal manera que se busque el mejor rendimiento posible de la unidad de tratamiento.

En el *Anexo A* se presentan los isocontornos que muestran la variación del número de Reynolds en cada campo entre placas. En la **Figura 5.9** se muestra el orden secuencial de análisis de los mismos.

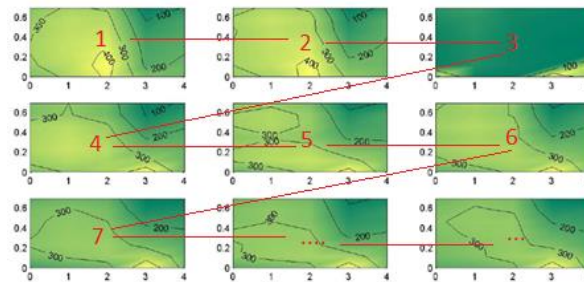


Figura 5.9. Secuencia de los campos de flujo.

Se tomaron los datos numéricos con los cuales se generaron los isocontornos de las placas y se procedió realizar una media de ellos, con lo que se obtuvieron 74 valores promediados (la misma cantidad de campos de flujo entre placas), posteriormente se realizó una comparativa de estos con los parámetros de diseño que se dan a conocer en la **Tabla 2.3**. El resultado de dicha comparativa se muestra en la **Figura 5.10**.

A su vez se realizó la media de los 74 datos obtenidos, con lo que se determinó un número de Reynolds representativo de la zona de sedimentación que tiene un valor aproximado del orden de 250. Este valor se encuentra dentro de los recomendados por Arboleda (2000) quien propone un rango del número de Reynolds entre placas de 100 a 500. También cumple con el criterio de Romero J. (2000), el cual recomienda un número de Reynolds menor a 500, no así, dicho promedio se encuentra fuera de los límites propuestos por Kawamura (2000), quien propone un intervalo entre 50 y 200.

En general el número de Reynolds que se ha designado como representativo de la zona de sedimentación se considera **“aceptable”** ya que cumple con 2 de 3 criterios y se aproxima al tercero de manera importante.

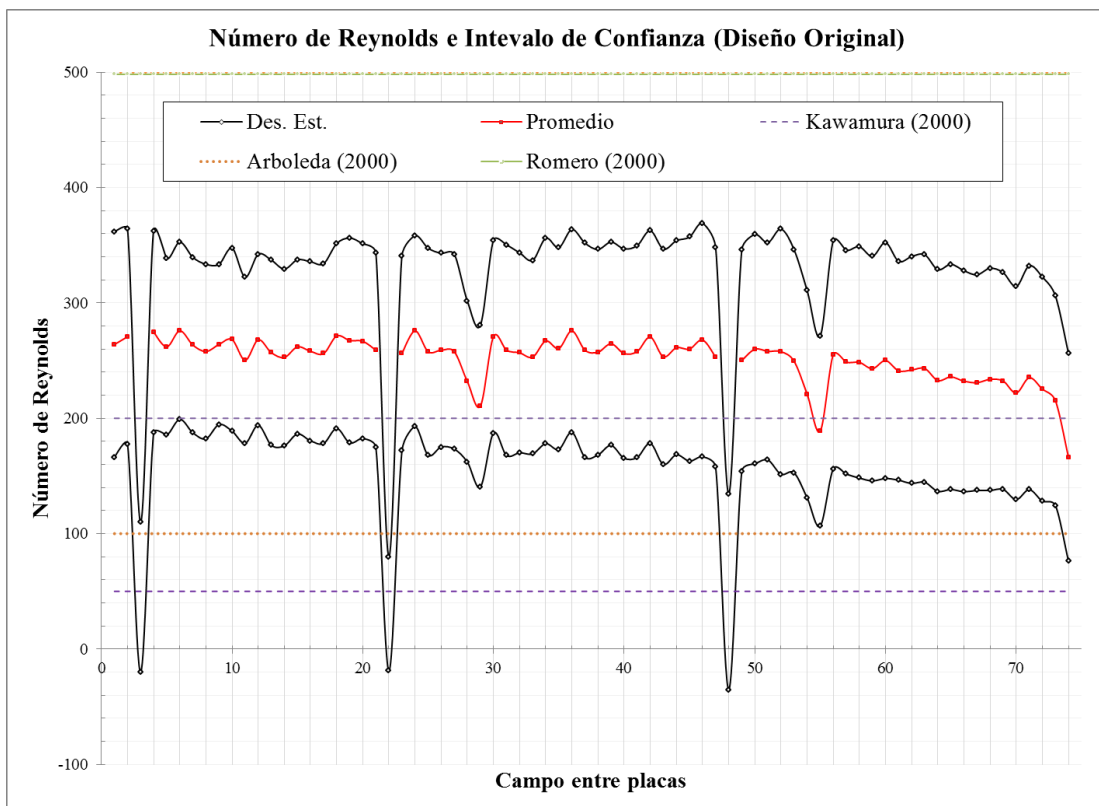


Figura 5.10. Número de Reynolds diseño original.

En la **Figura 5.10** se observa los espacios entre placas donde no existe corriente (las curvas cóncavas hacia arriba y la parte convexa pronunciada hacia abajo), es decir, *zonas muertas*, donde $R_e = 0$, dicha deficiencia es causada por 3 de 12 soportes que sustentan a las placas lo que impide el paso del flujo por esos campos, esta situación se considera inevitable, ya que de cualquier manera se requiere tener un soporte para los elementos inclinados. Los campos con zona muerta son los posicionados en los lugares 3, 22 y 48. De igual forma en las posiciones 29 y 55, se observa una tendencia a obstaculizar el paso del flujo.

De manera global, los datos del Número de Reynolds mostrados en el **Figura 5.10** oscilan entre 166.29 y 275.86 que corresponden al valor mínimo y máximo respectivamente de esta prueba realizada al diseño original sin considerar los valores de los elementos inclinados que experimentan zona muerta. El Reynolds promedio de mencionados datos corresponde a $\bar{X}=251.23$. El grado de dispersión de los datos con respecto a la media \bar{X} , es decir, la desviación estándar σ , se observa más cerrada en los primero 36 campos que en el resto de ellos.

Aplicando el criterio establecido por Kawamura (2000) a los 74 promedios de cada campo entre placas, podemos apreciar que dichos valores se encuentran por encima del límite máximo que propone este autor. Por el contrario, si se toman en cuenta las recomendaciones de Arboleda (2000) se observa, que el grupo de datos cumple con los límites establecidos, incluso muy por debajo del límite máximo. De igual manera, los datos analizados cumplen con el criterio de Romero J. (2000), por lo que los 74 datos de Reynolds se consideran aceptables, pues cumplen con dos de tres criterios de los más importantes en el área de tratado de agua potable.

5.4 Tiempo de residencia global

Para cálculo de este indicador se ha hecho uso de la ecuación (2.1) mostrada en la **Tabla 2.1**, se efectúa el cociente entre la capacidad del sedimentador y el caudal de agua a tratar que ingrese a la unidad de tratamiento con lo que se obtendrá el tiempo de residencia teórico.

La evaluación del tiempo de residencia global, consistió en la comparativa del valor arrojado por la ecuación (2.1) y aquellos obtenidos de la modelación numérica mediante PHOENICS®, cabe señalar que con el DFC se obtuvieron 80 tiempos de residencia, número que corresponde a la cantidad de vertedores triangulares ubicados en la canaleta de salida, como se ha mostrado en la **Figura 3.9**, por cada vertedor de salida se ha obtenido el tiempo de residencia correspondiente. El análisis de este parámetro se muestra en la **Figura 5.11**.

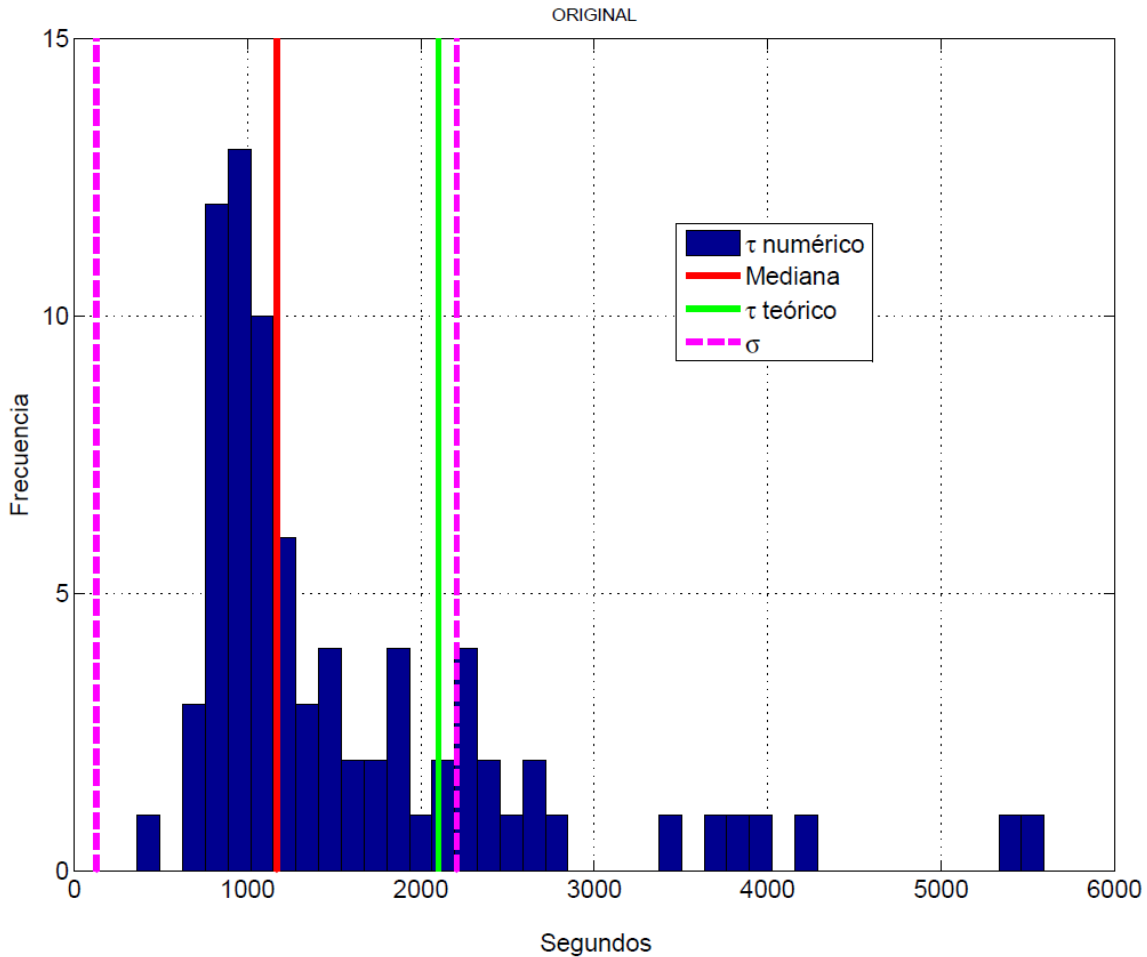


Figura 5.11. Análisis tiempo de residencia diseño original.

En la **Figura 5.11**, se muestra la representación gráfica de la distribución de frecuencia de los tiempos de residencia (*histograma*) obtenidos por medio del software de dinámica de fluidos computacional. En esta misma se muestra en color rojo la mediana de los datos con valor de 1167.94 segundos, así como el tiempo de residencia teórico que se muestra de color verde y valor de 2100 segundos, así mismo se observa la desviación estándar, con valor de 1039 segundos. La diferencia entre el valor teórico esperado y la mediana de los datos numéricos es 1061 segundos.

En la **Tabla 5.2** las celdas con color de relleno representan la localización del centro de cada intervalo o clase, por el contrario, las celdas sin relleno, indican el número de elementos (frecuencia).

Tabla 5.2. Repetitividad de números de residencia en segundos, diseño original.

953	822	1083	1214	2261	1868	1476	1345	691	2653
13	12	10	6	4	4	4	3	3	2
2391	2130	1737	1607	5530	5400	4222	3961	3830	3699
2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
3438	2784	2522	1999	429	5269	5138	5007	4876	4746
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
4615	4484	4353	4092	3568	3307	3176	3045	2914	560
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Con base en la **Figura 5.11** y la **Tabla 5.2** se puede deducir que la clase o categoría con mayor frecuencia, es aquella con valor de 953 segundos, con frecuencia de 13 datos, seguido por la clase 822 segundos, con frecuencia de 12 datos, en tercer lugar se encuentra la categoría 1083 segundos, con frecuencia de 10, seguido por la clase 1214 segundos y frecuencia de 6, posteriormente las clases 2261, 1868, 1476 segundos, tienen frecuencia de 4, las clases 1345 y 691 segundos, experimentan frecuencia de 3 a diferencia de las categorías 2653, 2391, 2130, 1737, 1607 segundos, que tienen frecuencia de 2 y finalmente las clases 5530, 5400, 4222, 3961, 3830, 3699, 3438, 2784, 2522, 1999 y 429 segundos, con frecuencia de 1.

Tomando como referencia el tiempo de residencia teórico con valor de 2100 segundos y utilizando la información del párrafo anterior se puede realizar el diagnóstico siguiente. Debido a que el 70% de los tiempos de residencia obtenidos mediante PHOENICS® son menores al tiempo de residencia teórico se considera la existencia de **cortocircuito**, es decir el flujo no reside el tiempo mínimo necesario para el tratamiento deseado. Sólo un 16% de los tiempos de residencia numéricos, oscilan alrededor del teórico y el 14% restante lo superan.

Figura 5.12.

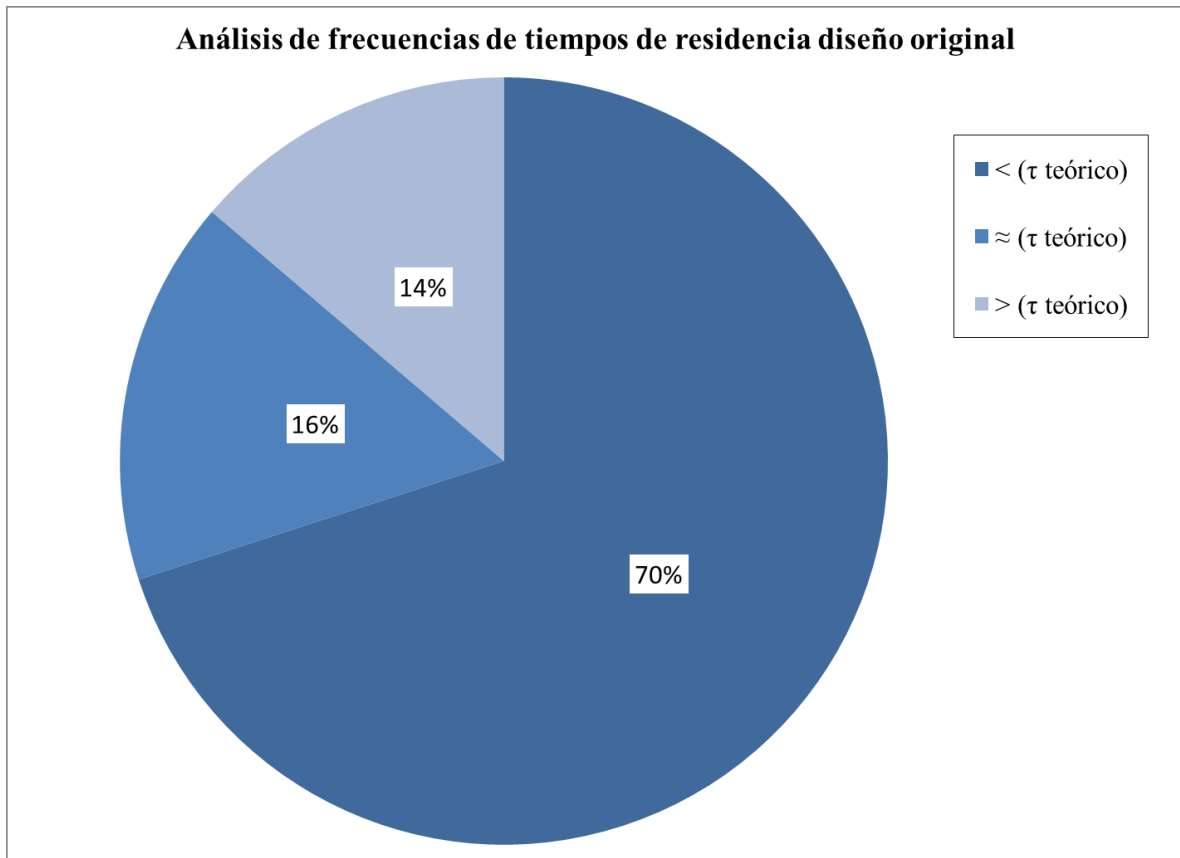


Figura 5.12. Análisis de frecuencias de tiempos de residencia original.

5.5 Tiempo de residencia en elementos inclinados

En las unidades de tratamiento como son las de categoría alta tasa se debe evaluar el *tiempo de residencia local*, es decir, el tiempo que reside el flujo dentro de los elementos inclinados. Al igual que para el tiempo de residencia global, el local también tiene criterios específicos que se deben cumplir así como se muestra en la Tabla 2.3.

En el ámbito real, el sedimentador en estudio cuenta con módulos de alta tasa tubulares, los cuales se presentan en la **Figura 5.13**.



Figura 5.13. Módulos de alta tasa tubulares.

Debido a que la sección transversal de los tubulares que forman el módulo de alta tasa es compleja y de material flexible, la modelación exigía el incremento considerable de nodos en la etapa de mallado, por lo que se realizó una simplificación que consistió en utilizar placas planas paralelas en lugar de los módulos de alta tasa, sin alterar la altura de diseño, es decir las placas modeladas y los módulos de alta tasa reales son de misma altura.

Otro aspecto a favor, se observa en la **Figura 5.13**, es el ángulo de inclinación de los elementos tubulares es igual al utilizado en la modelación, a saber, 60 grados, lo que no afecta en los resultados obtenidos, debido a que no se obstaculiza ni mucho menos se altera el sentido del flujo. En la **Figura 5.14** se muestra el análisis del tiempo de residencia en los elementos inclinados, mediante la ecuación (2.9) del presente documento.

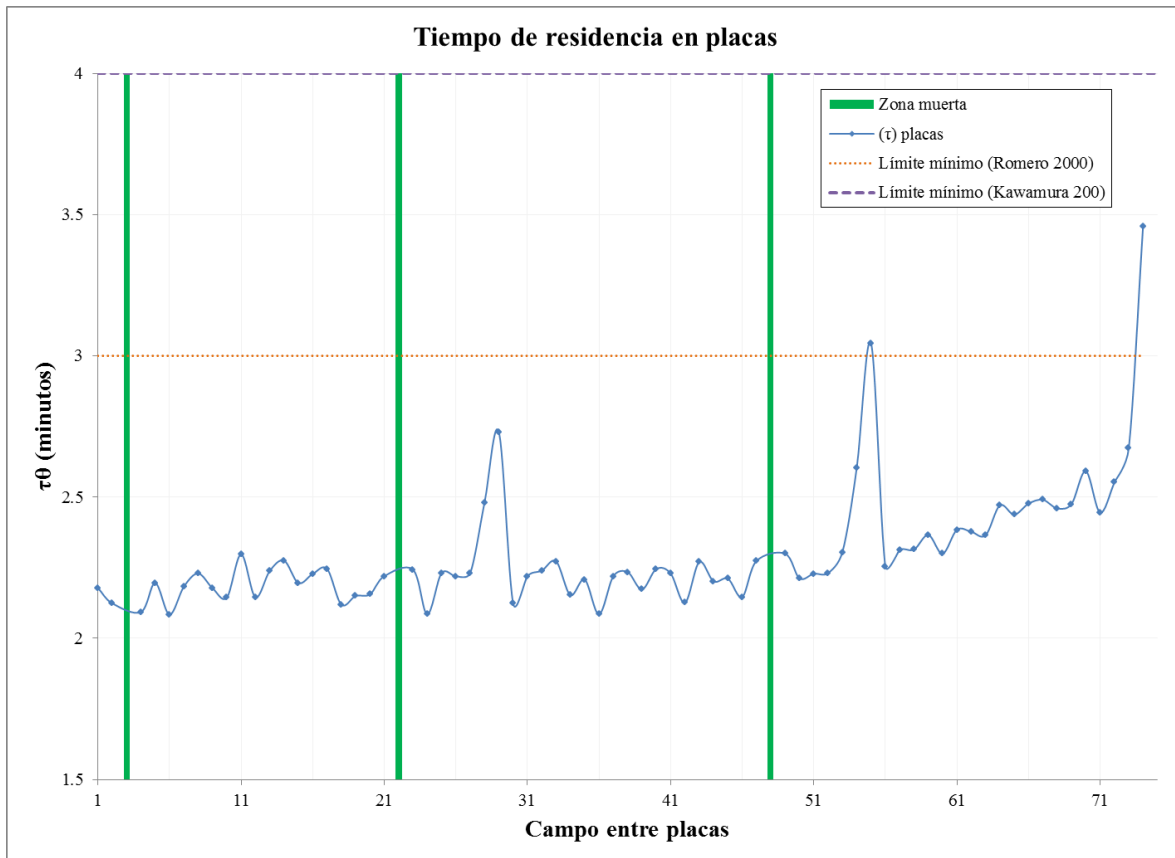


Figura 5.14. Tiempo de residencia en placas.

El tiempo de residencia en placas, no cumple con los criterios recomendados por los especialistas en el tema, el tiempo que debe tardar el flujo en cruzar los elementos inclinados es, según (Romero J. , 2000) de 3 a 6 minutos, (Kawamura, 2000) recomienda 4 minutos como mínimo, y (Crittenden, 2012) propone de 6 a 10 minutos. Si analizamos la **Figura 5.14**, podemos diagnosticar **cortocircuito**, ya que los datos obtenidos de tiempo de residencia en placas oscilan alrededor de 2 a 2,5 minutos, valores que se encuentran por debajo de todas las recomendaciones. En la misma gráfica se puede apreciar que a partir del campo entre placas número 46 el parámetro en cuestión tiende a incrementarse, es evidente que este comportamiento se presenta debido a que el ingreso del flujo se encuentra en el extremo opuesto a dichos campos, por lo que existe una mayor tiempo de residencia pero no el suficiente para ubicarse dentro de los rangos establecidos. Las barras verdes hacen referencia a los campos de flujo entre placas que se consideran zona muerta, es decir, como se observa en la **Figura 5.14** las barras tienen un tiempo de residencia indefinido.

5.5 Análisis de velocidades en muro difusor (orificios)

La zona de entrada como se ha explicado en el subtema 3.2 del presente documento, tiene como objetivo, generar una transición suave entre el floculador, que es la unidad de tratamiento previa al sedimentador y la zona de sedimentación de esta última. La zona de entrada se compone de un canal y un muro provisto de orificios (muro difusor) principalmente, ambos elementos se extienden a todo lo largo del sedimentador para distribuir el flujo lo más uniforme posible, **Figura 5.15**. Lo recomendado por (Romero J. , 2000) es, que las velocidades de entrada no sean mayores a 0.15 m/s. (Arboleda, 2000) propone el mismo valor para velocidad de ingreso a la unidad de tratamiento y especifica que en el canal la velocidad se debe de mantener entre 0.15 y 0.60 m/s.

En el *Anexo B*, se presentan los isocontornos de velocidades correspondientes al ingreso del flujo a través de los orificios, se formaron 51 matrices, mismas que se encuentran compuestas por 60 elementos (12 filas, 5 columnas), es decir, que se muestrearon un total de 3060 datos numéricos para determinar el comportamiento hidráulico en la zona de entrada. Las unidades de los isocontornos son en m/s.

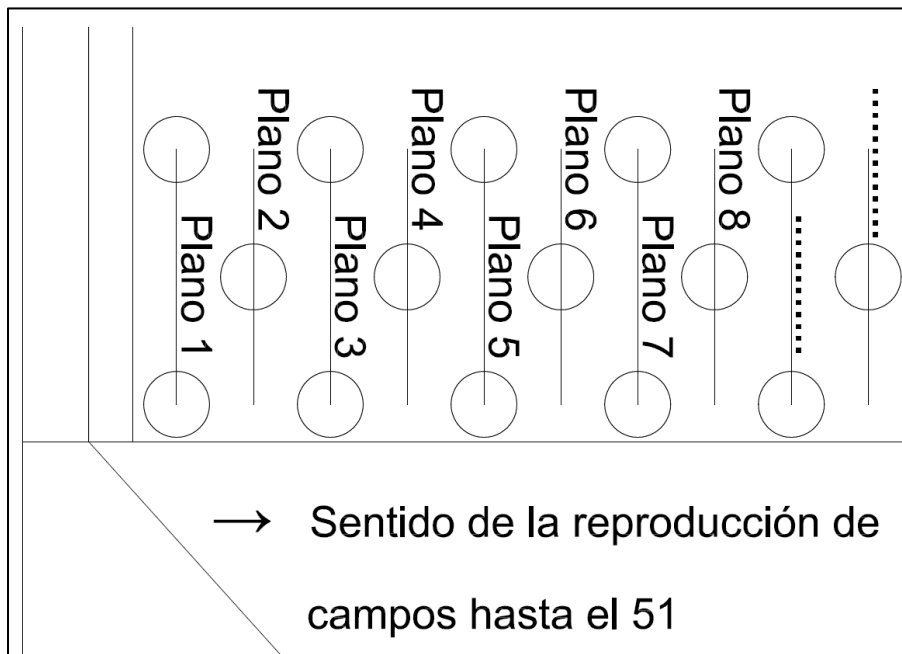


Figura 5.15. Secuencia de análisis de evaluación del ingreso en los orificios.

El orden en que se analizan los campos de flujo en orificios de entrada se muestran en la **Figura 5.16**.

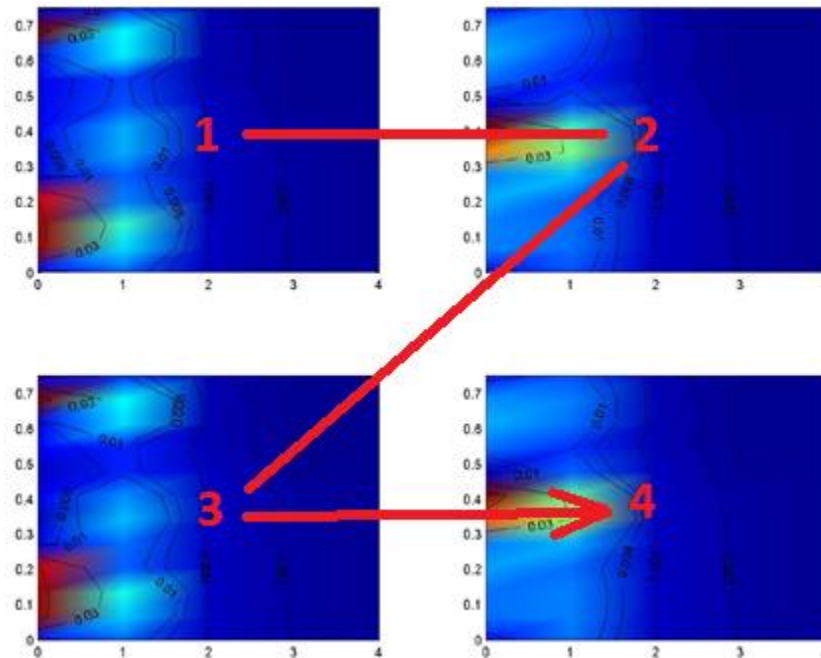


Figura 5.16. Sentido de análisis de orificios de entrada.

Basado en la **Figura 5.17** se puede diagnosticar que en los campos 3 al 7 se experimenta *zona muerta* lo que es de suma importancia y prioridad de mejora en el diseño, su importancia radica en que es la zona de ingreso y distribución del flujo, por lo que dicha curva debe de comportarse lo más uniforme posible, es decir, lo opuesto a la mostrada en la imagen mencionada. Si no existe una repartición uniforme del flujo dentro de la unidad de tratamiento, es muy probable que se presente cortocircuito.

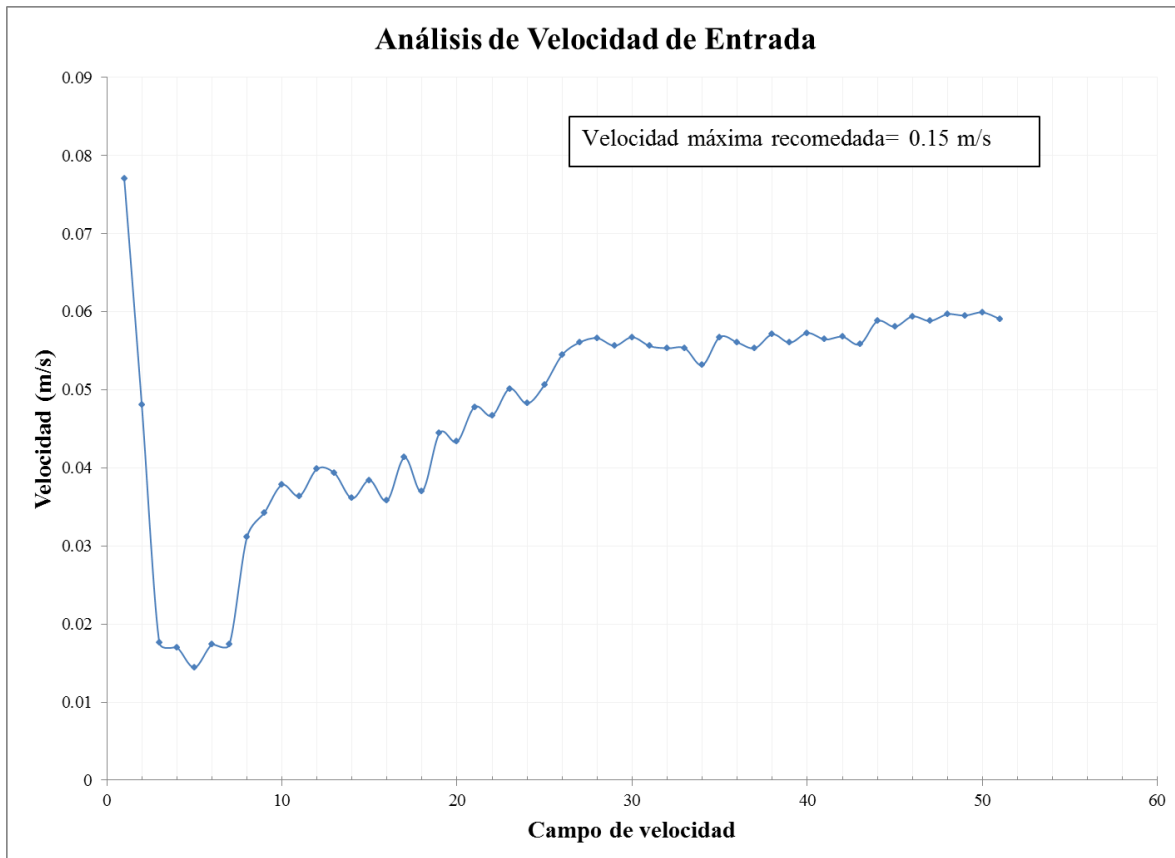


Figura 5.17. Curva de velocidades máximas en entrada

En la **Figura 5.17** se aprecia que los orificios más alejados a la entrada, tienen velocidades más altas que los más cercanos a ella, este fenómeno ya ha sido identificado por (Arboleda, 2000) quien comenta: *“tiende a salir más caudal por los orificios o aberturas que están más alejadas del punto de entrada que por las primeras”*. Se infiere que la presencia de este fenómeno es a causa de la alta velocidad que proviene de la unidad de tratamiento previa al sedimentador lo que impide ingresar a los orificios en el muro difusor (fuerza de inercia). **Figura 5.3.**

(Arboleda, 2000) y (Romero J. , 2000) recomiendan que la velocidad en los canales distribuidores así como en el muro difusor sea menor a 0.15 m/s, si aplicamos dicho criterio se puede concluir que los datos numéricos se encuentran dentro de los parámetros de confianza, no así (Kawamura, 2000) establece un rango entre 0.5 a 0.75 m/s lo que posiciona a todos los datos obtenidos muy por debajo del límite mínimo permisible, es decir fuera de rango.

Se piensa que la discrepancia entre autores, referente al establecimiento de intervalos de confianza, tiene que ver con el diseño del sedimentador, los diseños de Kawamura tienen más de un muro difusor, por lo que, si el flujo experimenta

velocidad elevada, es disipada por mencionados muros, el flujo debe cruzar dos obstáculos en lugar de uno.

Crittenden establece un rango de 0.15 a 0.60 m/s, a pesar de ser menores que los de Kawamura, los datos numéricos obtenidos mediante el DFC no se ubican dentro del mismo, por lo que, se tomará como referencia el intervalo de Arboleda y Romero.

CAPÍTULO 6 . PROPUESTA DE MEJORA AL DISEÑO ORIGINAL

En el capítulo anterior se ha presentado la evaluación hidráulica integral del sedimentador de alta tasa en estudio con lo cual se ha cumplido lo especificado en el subcapítulo 1.3 (planteamiento del problema), el cálculo del tiempo de residencia y el número de Reynolds, como parámetros principales. Con base en ellos, mediante interpretación numérica y visual se ha diagnosticado un cortocircuito tanto en placas como en el resto de la unidad de tratamiento, es decir, que el gasto que ingresa no reside el tiempo mínimo necesario para recibir el tratamiento adecuado, la principal causa de esta deficiencia hidráulica, recae en el diseño de la estructura de entrada, como se ha mostrado en la **Figura 5.3**, la masa de agua es obstaculizada a los 0.80 m. de su ingreso lo que influye de manera permanente en todo el canal distribuidor y produce deficiencia en la conducción y repartición del flujo, como se puede consultar en la **Figura 5.2** inciso a, b y c. Sumado a un diseño ineficiente, la velocidad elevada de ingreso conduce al sistema a un inevitable cortocircuito.

Con base en el análisis que se ha realizado al sedimentador de alta tasa en el capítulo 5 de esta investigación se propone cambiar el diseño actual de la estructura de ingreso con el objetivo de promover una mejor distribución de flujo. El cambio consiste en dos acciones, la primera es ubicar la sección de entrada (proveniente de la unidad de tratamiento previa al sedimentador) al centro de la unidad de tratamiento, en el lado más largo del sedimentador para evitar el choque de la masa de agua con los muros perimetrales. La segunda acción es variar el ángulo que forma la horizontal con el muro adyacente a la entrada y en algunos casos cambiar las aristas vivas por radios de curvatura, esto se ha pensado para que conforme el flujo ingrese a la unidad de tratamiento, el área transversal también sufra ampliación y disminuya la velocidad.

Los cambios propuestos se han pensado con la finalidad de que se minimice la turbulencia a la entrada y se eliminen las zonas muertas pasando los orificios, esto debe repercutir de manera positiva en la zona de placas, el caudal que ingresa a un campo de flujo entre placas debe ser muy similar a los restantes. También se espera que el tiempo de residencia global y local se apegue a los criterios que ya se han comentado con anterioridad. Para poder lograr lo planteado es necesario realizar escenarios de modelación para elegir la configuración geométrica que proporcione las mejores condiciones hidráulicas.

6.1 Escenarios de modelación

A continuación se muestran los escenarios de modelación que se proponen para mejorar las condiciones hidráulicas de entrada, con ellas se busca que las líneas de corriente sean lo más uniforme posible así como eliminar las zonas muertas en orificios, ocasionadas por alta velocidad proveniente de la unidad de tratamiento previa al sedimentador. El que ingrese flujo con la menor turbulencia posible ayudará a generar un flujo laminar en zona de placas lo que mejorará el número de Reynolds. Como se observa en la **Figura 6.1**, la sección de entrada se ha colocado al centro del desarrollo de los muros que conforman el canal distribuidor.

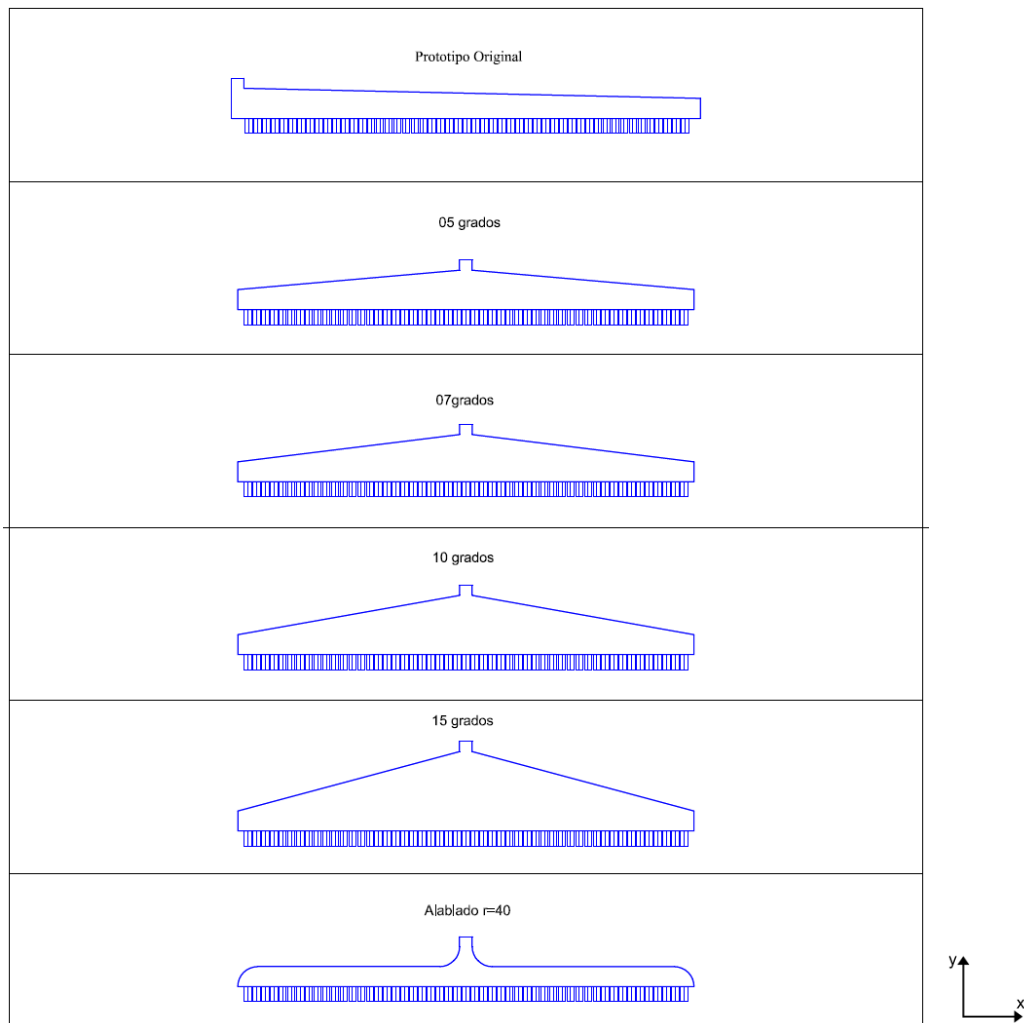


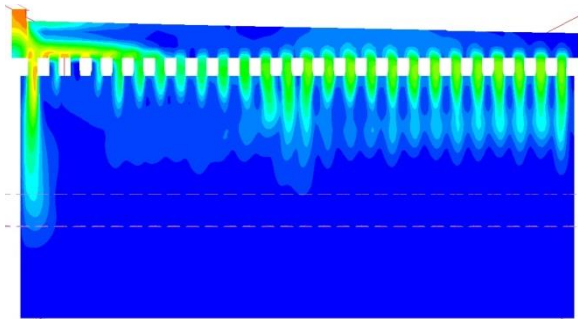
Figura 6.1. Escenarios de modelación, vista en planta.

A continuación se presenta el diagnóstico realizado a cada escenario de modelación con el objetivo de determinar su comportamiento hidráulico y con ello proponer el más eficiente que cumpla con los criterios establecidos para el tipo de sedimentador alta tasa.

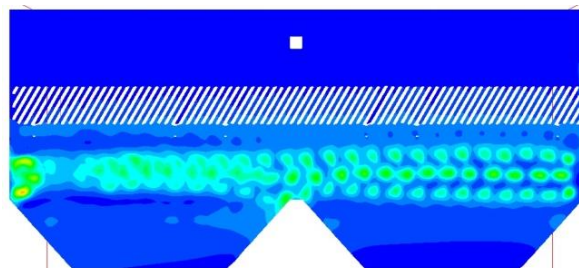
El diagnóstico consiste en la revisión de los campos de flujo mediante una vista de planta y una frontal para observar la distribución del flujo en el sedimentador. Así mismo se muestra el análisis de tiempo de residencia mediante un histograma con el cual se identificará la frecuencia de ocurrencia de dicho parámetro y de esta manera definir si la masa de agua permanece el tiempo requerido dentro de la unidad de tratamiento.

Igualmente se presenta una gráfica donde se muestran los valores del número de Reynolds correspondientes a cada campo de flujo entre placas, lo anterior para determinar si dicho parámetro se encuentra dentro de lo establecido en los criterios de operación que caracterizan a dicha unidad de tratamiento.

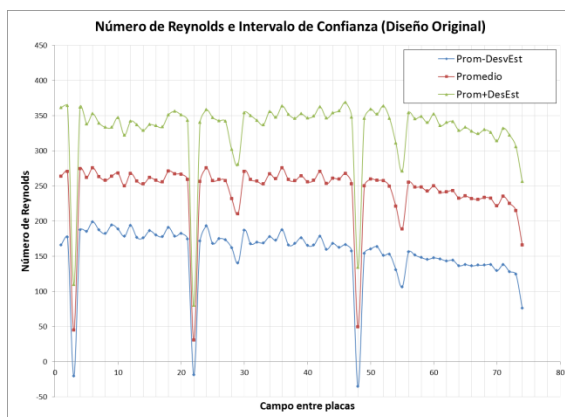
Diseño original



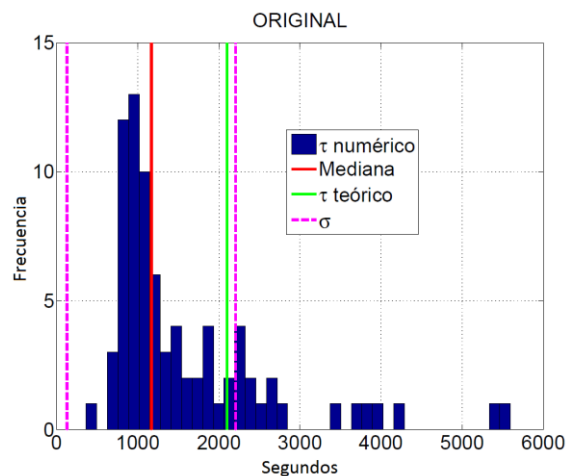
(a). vista en planta.



(b). vista frontal.



(c). Número Reynolds entre placas.



(d). Histograma de (τ).

Figura 6.2. Evaluación de comportamiento hidráulico del diseño original.

El diseño original experimenta zona muerta en los tres niveles de orificios que fungen como conexión entre el canal distribuidor y la zona de sedimentación, tal como se aprecia en la **Figura 6.2a** y **Figura 6.2b**. Existe la presencia de un chorro con longitud aproximada de 2.0 m desde el desfogue del primer orificio hasta un medio del ancho de la zona de sedimentación, la ubicación de éste es en el extremo izquierdo de la unidad de tratamiento en estudio. Este fenómeno es debido a la velocidad elevada con que ingresa el flujo, proveniente de la unidad de tratamiento previa al sedimentador.

Mediante el gráfico de la **Figura 6.2c**, podemos observar la valoración del número de Reynolds en la zona de placas, se observa un decaimiento de dicho parámetro a partir del campo entre placas ubicado en la posición 56 lo que indica una disminución de velocidad a medida que el flujo avanza hacia el extremo opuesto de la sección de ingreso. Se recomienda que la unidad de tratamiento no opere con número de Reynolds mayor a 500. El número de Reynolds promedio con el que opera el diseño original oscila alrededor de 250, por lo que se considera aceptable.

La desviación estándar (σ) que presenta este parámetro en el sistema, va en incremento a medida que el campo de flujo analizado se aleja de la sección de ingreso tal como se observa en **Figura 6.2c**. Este comportamiento se puede explicar por medio de la **Figura 6.3a** y **Figura 6.3b** donde se muestra el campo de flujo posición 10 y 70 respectivamente, referenciadas a una posición cero que es la sección de entrada.

Se observa que existen tres magnitudes de número de Reynolds para la posición 10 que son 200, 300 y 400; de la misma manera que 100, 200, 300, 400 y 500 para la posición 70. Mediante este ejercicio se determina que, para un número de Reynolds bajo (flujo laminar) existe una desviación estándar mayor que para un Reynolds medio (tendencia a turbulento), tal como lo muestran los isocontornos de las figuras mencionadas en el párrafo anterior. Esto se puede explicar mediante la teoría que menciona: en las fronteras rígidas con una determinada rugosidad absoluta, la velocidad del flujo en colindancia con éstas, tiende a cero, es por eso que existe una mayor gamma de números de Reynolds.

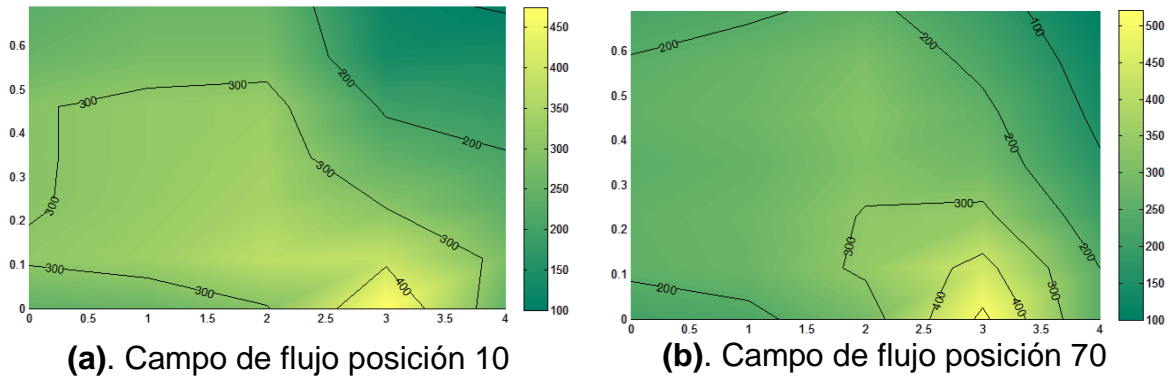


Figura 6.3. Número de Reynolds entre placas campo 10 y 70 (diseño original).

En la **Figura 6.2d**, se presenta el análisis estadístico de los tiempos de residencia numéricos mediante un histograma de frecuencias que hace referencia al diseño original, en él se puede observar el tiempo de residencia teórico evaluado mediante la ecuación V/Q presentada en la

Tabla 2.1 y que arroja un valor cercano a 2100 segundos.

De igual manera se presenta la mediana con valor de 1167.94 segundos, esto indica que el 50% de los registros de tiempo de residencia se encuentran por encima de éste y el otro 50% restante por debajo del mencionado, con ello se conoce que el flujo sufre cortocircuito y se vuelve el objetivo principal de este estudio, se busca una mejora (incremento) de dicho parámetro para promover que la mediana de los tiempo de residencia se aproxime lo mejor posible al teórico. Hay una diferencia de 932 segundos entre la mediana y el τ teórico.

La desviación estándar de los tiempos de residencia es aproximadamente igual a 1038.72 segundos lo que indica que dichos registros se encuentran distantes unos de otros y esto refleja un tipo de flujo no ideal **Figura 2.8**, y va en contra del principio que se busca promover, la operación del sedimentador con flujo tipo pistón **Figura 2.6**.

En la **Figura 6.4** se presenta la frecuencia de los valores centrales de las clases que integran el histograma de la **Figura 6.2d**, en ella se puede observar que los tiempos de residencia aproximados a 1000 segundos son los que predominan en el sistema con 13 registros, seguido por aquellos con valor aproximado a 800 segundos con 12 registros, posteriormente tiempos de residencia aproximados a 1080 y 1200 que presentan 10 y 6 registros respectivamente, lo que enfatiza la presencia de cortocircuito.

El sistema no está operando bajo el concepto de flujo pistón puesto que la frecuencia de los tiempos de residencia no es uniforme.

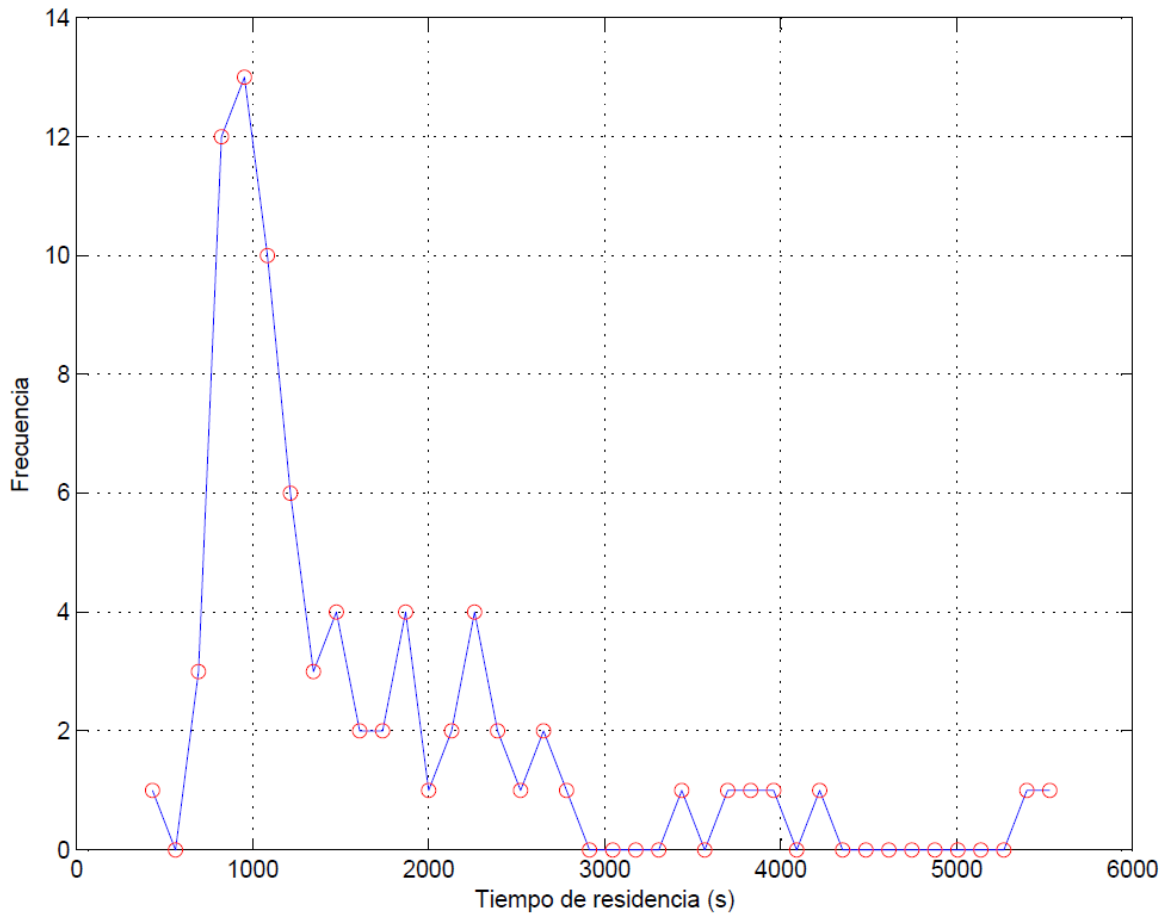
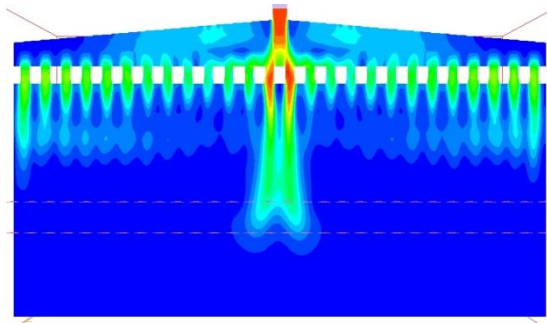
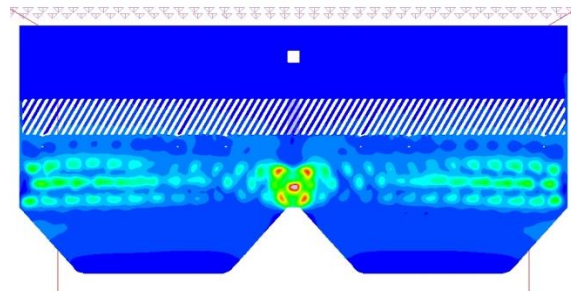


Figura 6.4. Centros de clase, diseño original.

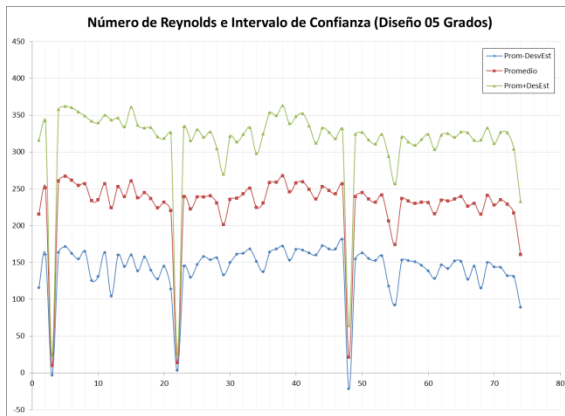
Diseño 05 grados



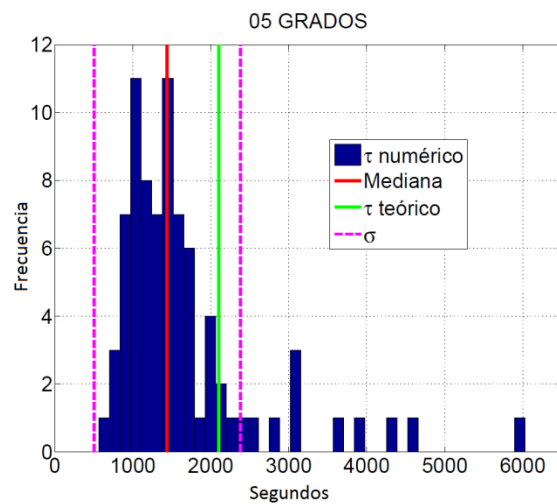
(a). Vista planta.



(b). Vista frontal.



(c). Número de Reynolds en placas.



(d). Histograma de (τ).

Figura 6.5. Evaluación del comportamiento hidráulico escenario 05 grados.

Como se observa en la **Figura 6.5a**, el escenario 05 grados tiene una importante mejora en la distribución del flujo con respecto al diseño original, esto debido a la re-ubicación de la sección de entrada, del extremo izquierdo de la unidad de tratamiento hacia el centro de la misma e incrementando el ángulo de los muros que conforman la zona de entrada de 1° a 5° .

Se ha eliminado la zona muerta en la entrada, en específico en los orificios más cercanos a la sección por donde ingresa el caudal. Las longitudes de desarrollo de los chorros correspondientes a cada orificio no son uniformes pero, tienen un patrón de comportamiento ascendente desde el centro del sedimentador, hacia los extremos. De la misma forma que se aprecia en la **Figura 6.5b**. El chorro principal tiene la misma longitud de desarrollo que en el diseño original.

En la **Figura 6.5c** se aprecia un número de Reynolds promedio de 236.50 lo que demuestra una mejora con respecto al valor determinado el diseño original e indica que el tipo flujo se orienta a comportarse de forma laminar.

Se observa también que la banda (desviación estándar) es de ancho uniforme y se puede interpretar como una mejor distribución de flujo a menor velocidad en contraposición del diseño original.

Analizando el histograma de la **Figura 6.5d**, se conoce que la mediana tiene un valor de 1439.97 segundos, lo que sugiere un incremento con respecto a la del diseño original, esto indica una aproximación al tiempo de residencia teórico y amortigua el cortocircuito existente en el diseño original. Existe una diferencia de 660 segundos entre la mediana y el tiempo de residencia teórico, hay una mejor aproximación que en el diseño original.

La desviación estándar de los tiempos de residencia del escenario 05 grados es del orden de 938.53 lo que representa una disminución de la misma con respecto a la del diseño original y se interpreta como mejora del sistema.

En la **Figura 6.6** se observan dos máximos 1037 y 1448 segundos con 11 registros cada uno, 1175 segundos cuenta con 8 registros, 901, 1311 y 1584 segundos tienen 7 registros cada uno.

Mediante este escenario se promueve el flujo pistón ya que la frecuencia de los tiempos de residencia es más parecida entre sí, sin embargo la concentración de dichos valores están alejados del valor teórico, tienen magnitud menor a éste.

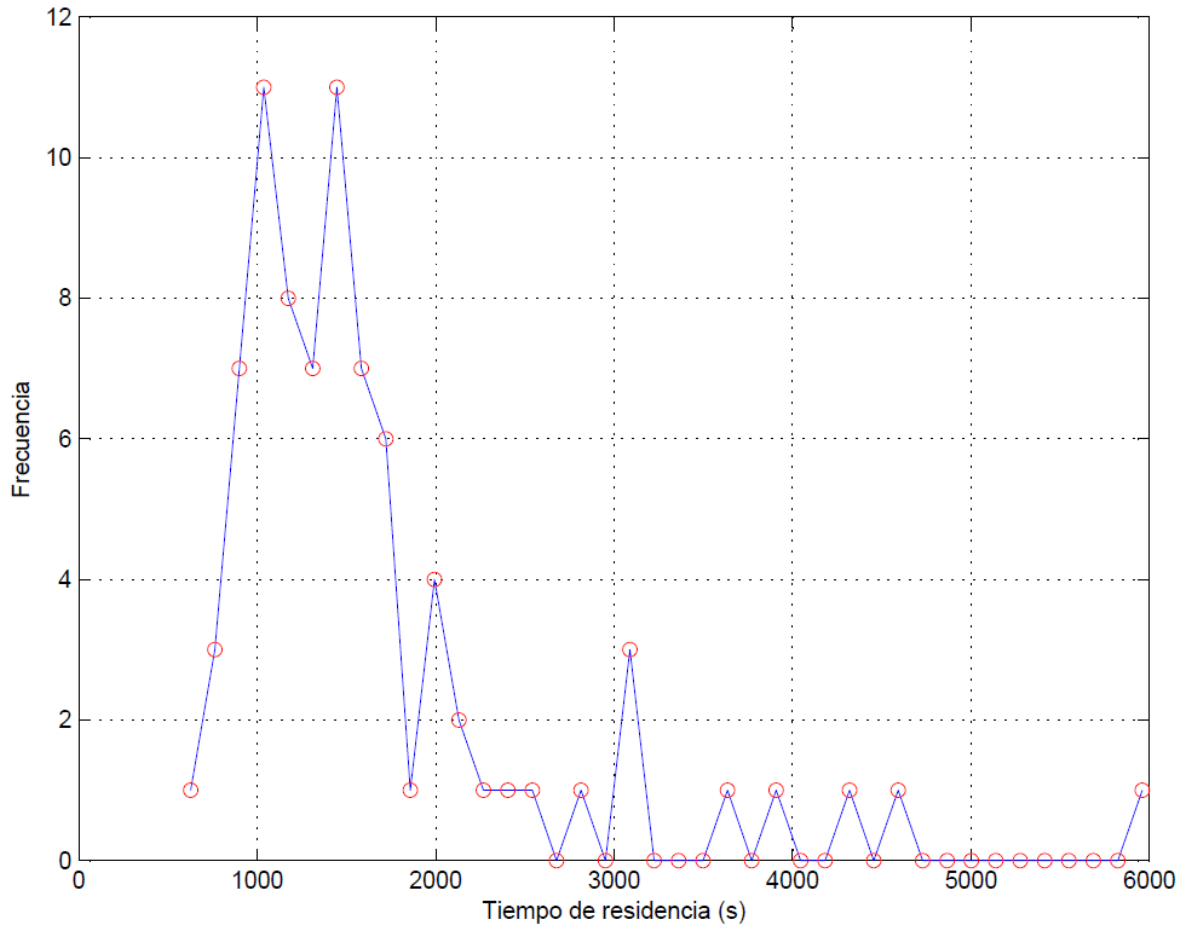
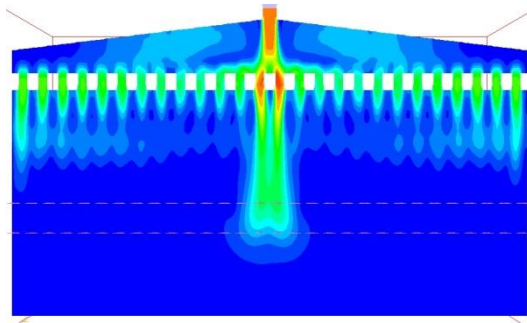
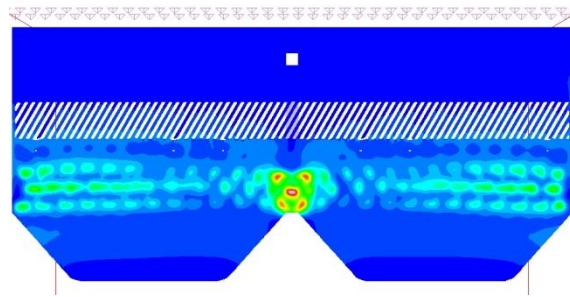


Figura 6.6. Centros de clase, escenario 05 grados.

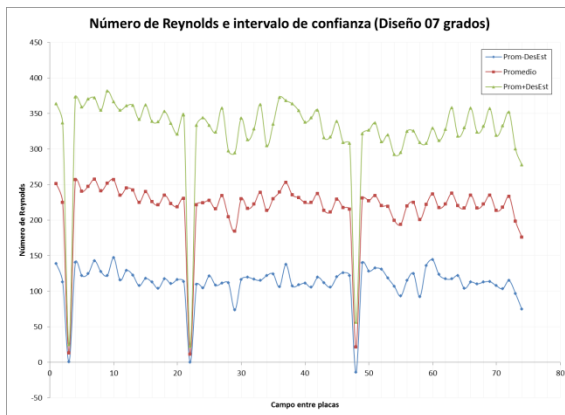
Diseño 07 grados



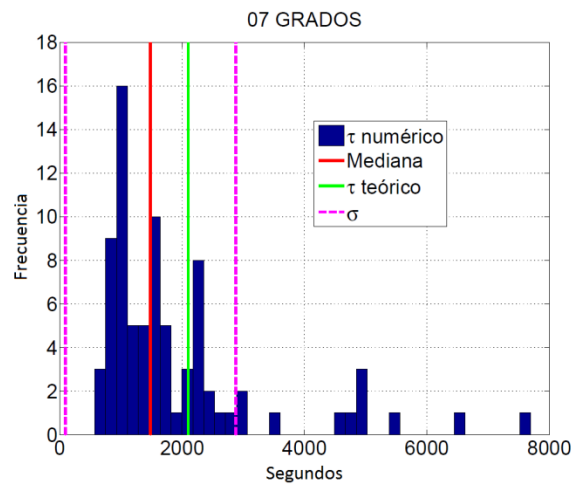
(a). Vista planta.



(b). Vista frontal.



(c). Número de Reynolds en placas.



(d). Histograma (τ).

Figura 6.7. Evaluación del comportamiento hidráulico escenario 07 grados.

El escenario 07 grados, no presenta zona muerta en los orificios por lo que al igual que el escenario 05 grados, tiene una mejora con respecto al diseño original, la longitud del desarrollo de los chorros originados por el muro difusor siguen un patrón de comportamiento ascendente del centro hacia los extremos de la unidad de tratamiento, el desarrollo del chorro central se ve incrementado 0.40 m con respecto a los anteriores ya analizados tal como se ve en la **Figura 6.7a** y **Figura 6.7b**, con respecto al diseño original, pero los números de Reynolds y el histograma de tiempos de residencia no se observan perjudicados debido a este hecho, sino que, se observa una mejora en dichos parámetros, mismo que se le atribuye al incremento del ángulo de inclinación de los muros en la zona de entrada.

En la **Figura 6.7c**, se puede observar que el registro de los números de Reynolds del escenario 07 grados tiene un comportamiento similar al de 05 grados, la desviación estándar se mantiene paralela al valor medio de cada campo entre

placas, la banda que representa a σ se observa más abierta que los escenarios ya analizados esto refleja que el número de Reynolds ha disminuido a consecuencia del incremento angular (7°) que se han aplicado a los muros en la zona de entrada y esto se puede comprobar mediante la visualización de los campos de flujo entre placas analizados en la Figura 6.8. En la **Figura 6.8a** y **Figura 6.8b** se aprecia la existencia de números de Reynolds entre 100 y 400 en la primera figura y de 100 a 500 en la segunda.

Dichos rangos de Reynolds son muy similares en magnitud entre sí a pesar que se encuentran a una distancia aproximada de 7.0 m entre ellos, esto significa se ha logrado una mejor distribución del flujo en la unidad de tratamiento y disminuido la velocidad lo que beneficia a los tiempos de residencia contrarrestando el cortocircuito del diseño original.

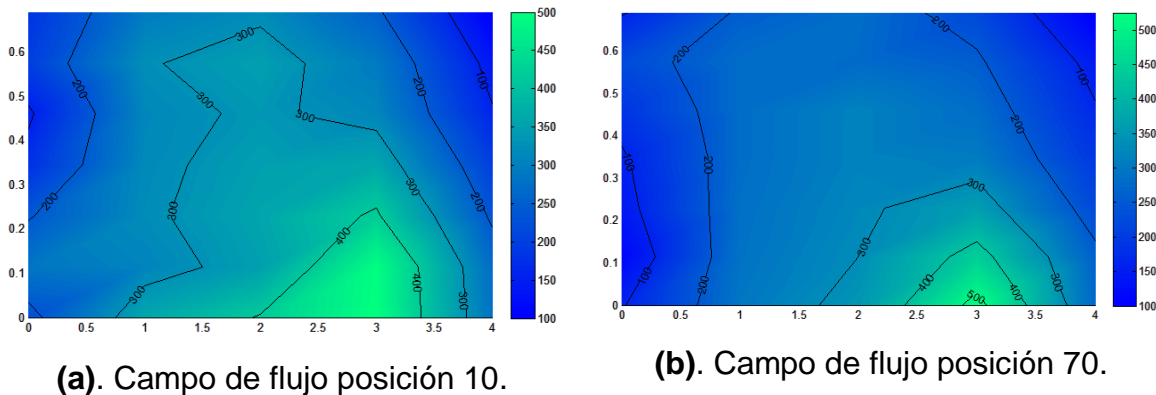


Figura 6.8. Número de Reynolds entre placas campo 10 y 70 (07 grados).

El promedio del número de Reynolds para este escenario, oscila alrededor de 226.25 lo que representa una mejora del 10% con respecto al valor de este parámetro manejado en el diseño original.

En la **Figura 6.7d**, se aprecia una aproximación considerable de la mediana al valor teórico de los tiempos de residencia. La primera tiene un valor de 1482.56 segundos y el segundo 2100 segundos, la diferencia entre ellos es de 617 segundos lo que representa una mejora del 38% con respecto al acercamiento que tuvo el diseño original con el valor teórico. La desviación estándar de los tiempos de residencia es 1392.98 segundos.

Mediante la **Figura 6.9** se determina 16 registros con valor de 1016 segundo, 10 registros de 1551, 9 registros de 839 segundos y 8 registros de 2264 segundos, estos últimos superan el valor de tiempo de residencia teórico, pero el valor de la mediana se ubica por debajo del mismo. Hasta ahora, este escenario es el más recomendable.

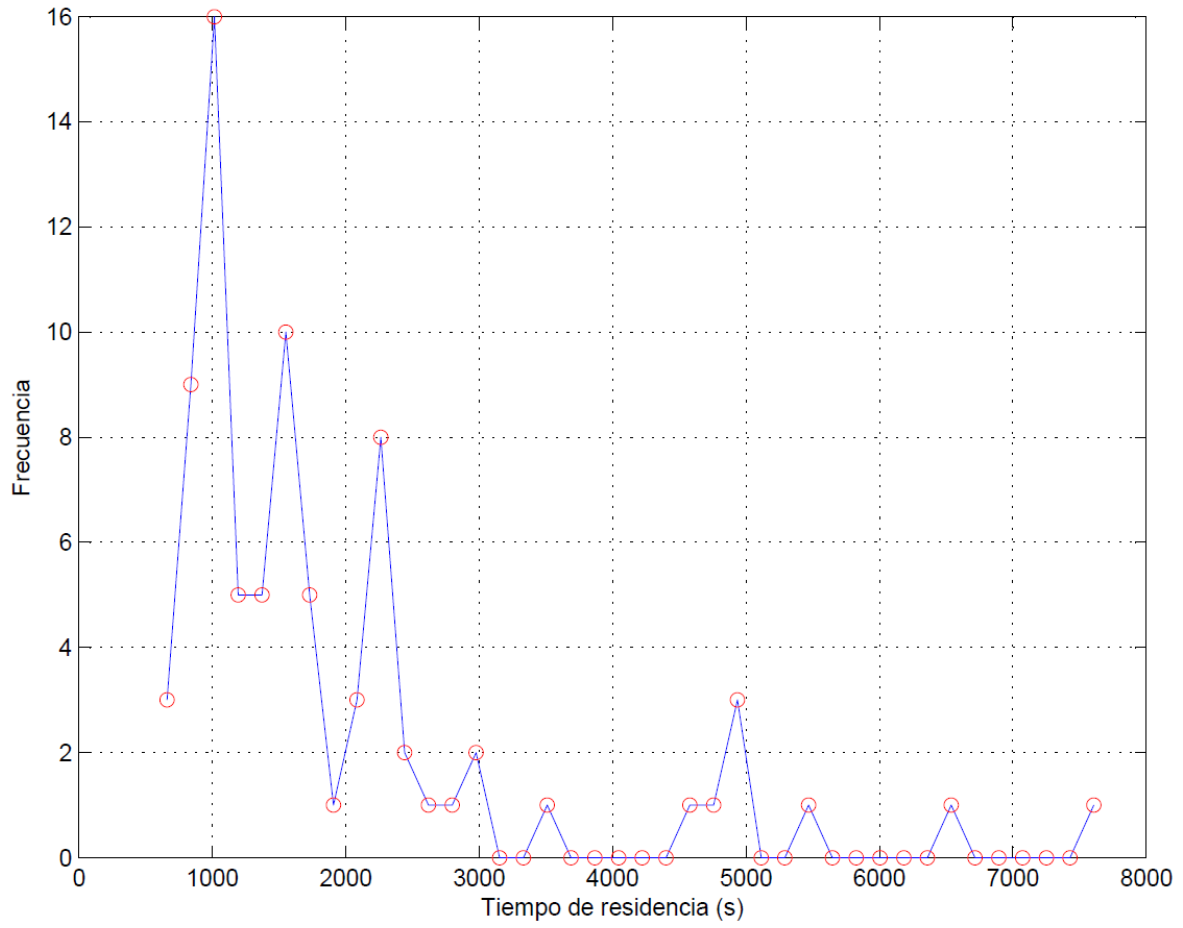
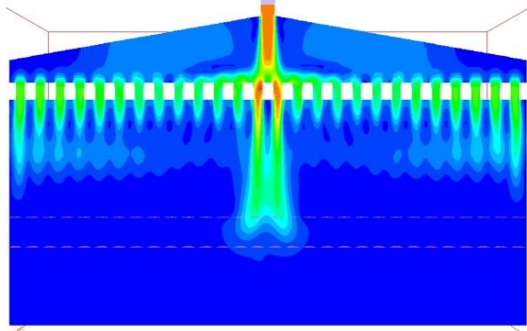
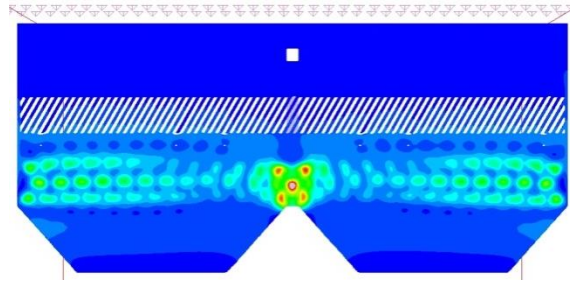


Figura 6.9. Centros de clase, escenario 07 grados.

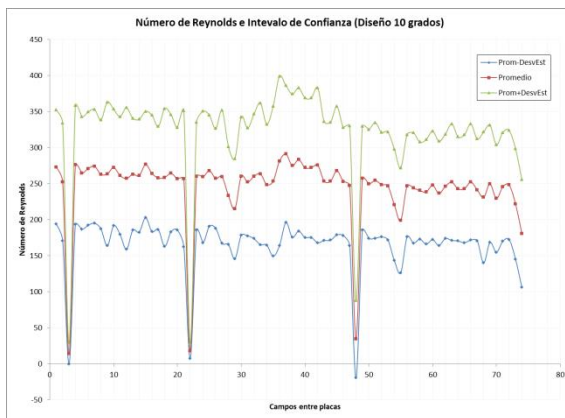
Diseño 10 grados



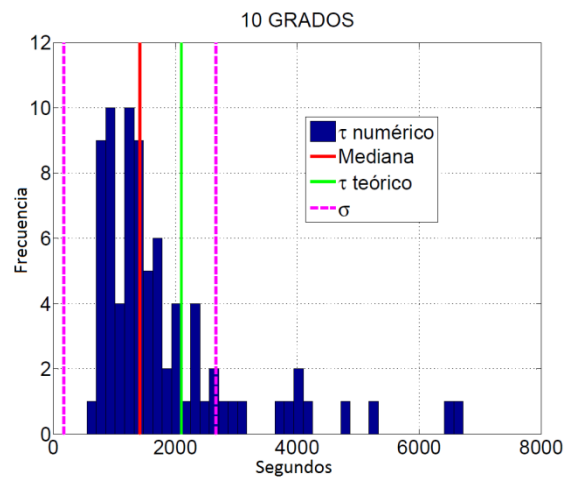
(a). Vista planta.



(b). Vista frontal.



(c). Número de Reynolds en placas.



(d). Histograma (τ).

Figura 6.10. Evaluación del comportamiento hidráulico escenario 10 grados.

Los muros que integran la zona de entrada del presente escenario, tienen un ángulo de inclinación de 10° , la distribución del flujo en planta y en corte longitudinal, **Figura 6.10a** y **Figura 6.10b** respectivamente, se aprecia muy similar al de 05 y 07 grados, por lo que se procede a analizar los datos numéricos del mismo para proporcionar un diagnóstico confiable.

El promedio representativo del número de Reynolds correspondiente a este escenario es aproximadamente igual a 253.78, lo que indica un incremento del mismo con respecto al diseño original, lo que indica un incremento de la velocidad en la zona de placas, fenómeno contrario a los objetivos de este análisis. **Figura 6.10c.**

En la **Figura 6.10d** se observa que el valor de la media se acerca al valor teórico de manera importante, más no lo suficiente como el escenario 07 grados. El valor de la mediana para el escenario 10 grados es de 1415.69 segundos, lo que

representa un diferencia de 684.31 segundos con respecto al valor teórico, magnitud que supera a las registradas en los escenarios 05 y 07 grados. Esto indica que el presente escenario tiene una magnitud mayor de cortocircuito. La desviación estándar de los tiempos de residencia es aproximadamente igual a 1246.66 segundos.

Analizando los valores centrales de las clases en las que se encuentra dividido el histograma, se encuentran valores de tiempos de residencia aproximadamente iguales a 937 y 1245 segundos, con 10 registros cada uno, así como tiempos de residencia cercanos a 783 y 1400 con 9 registros cada uno. **Figura 6.11.**

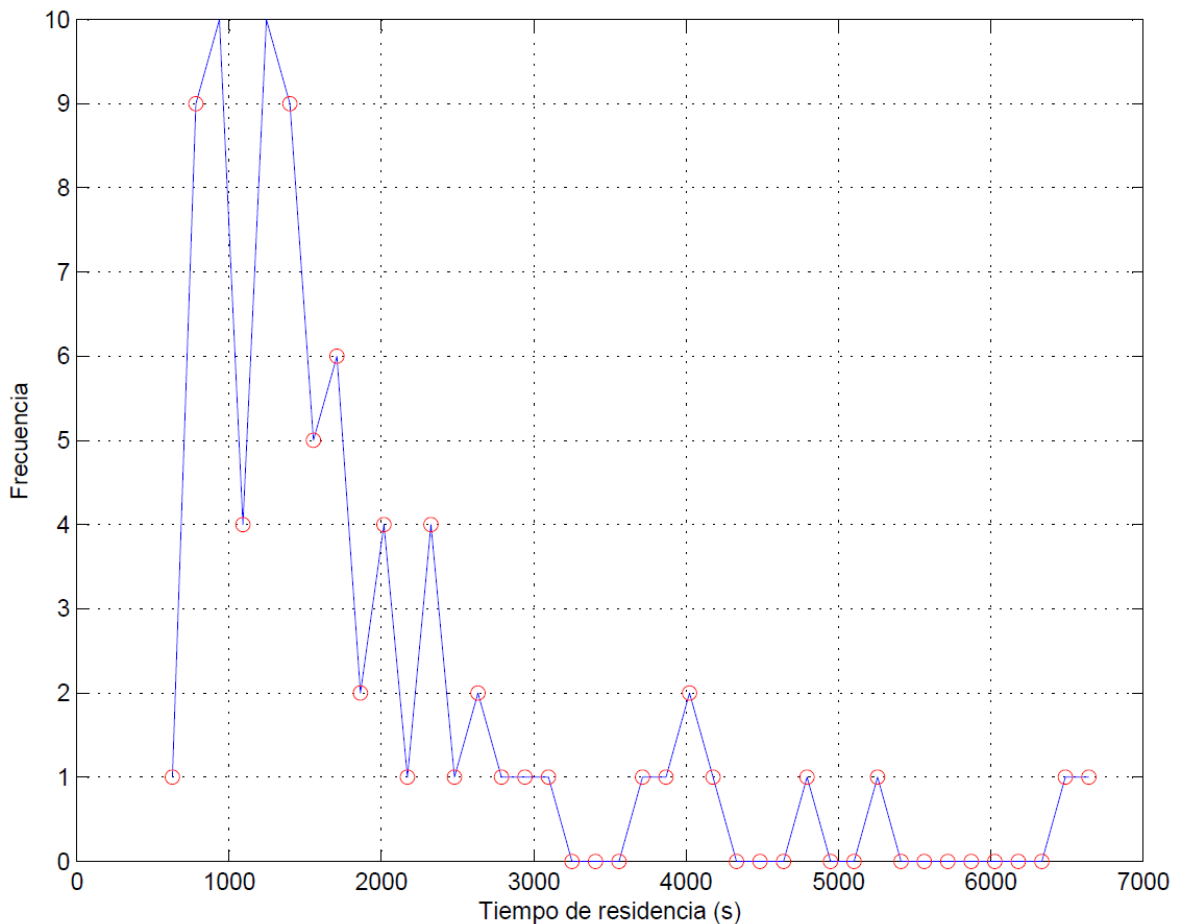
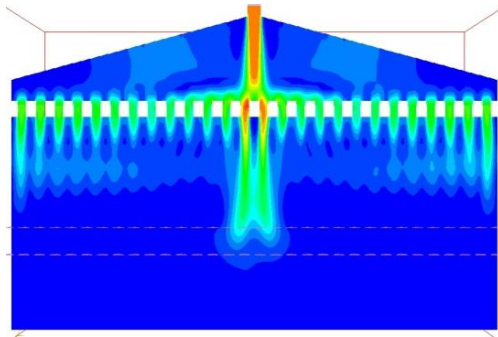
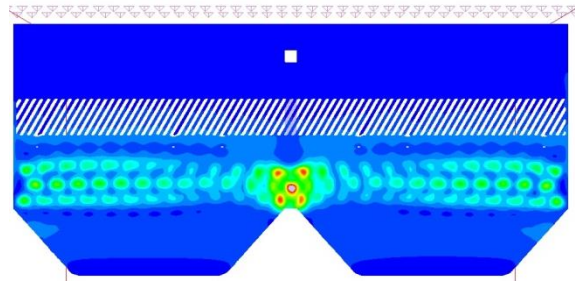


Figura 6.11. Centros de clase, escenario 10 grados.

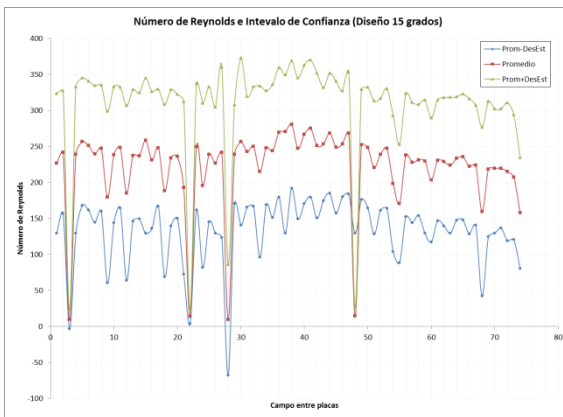
Diseño 15 grados



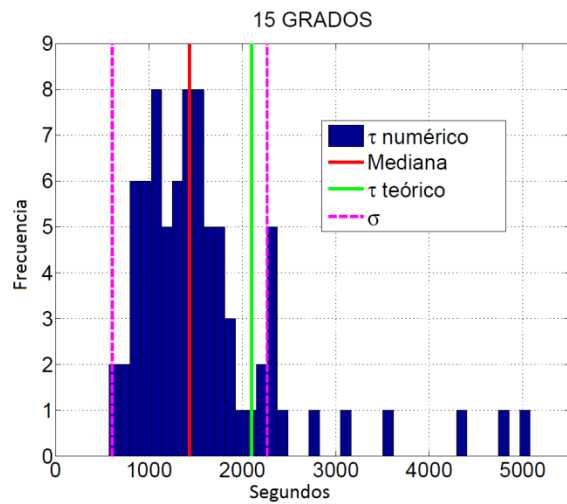
(a). Vista planta.



(b). Vista frontal.



(c). Número de Reynolds en placas.



(d). Histograma (τ)

Figura 6.12. Evaluación del comportamiento hidráulico escenario 15 grados.

Se aprecia en planta y corte un incremento en el desarrollo de los chorros correspondientes a cada orificio del muro difusor, esto refleja que la velocidad del flujo se ha incrementado debido al incremento del ángulo de inclinación de los muros que conforma la entrada del sedimentador. **Figura 6.12a** y **Figura 6.12b**.

El número de Reynolds promedio para este escenario es aproximadamente igual a 233.16, muy cercano al valor experimentado por el escenario 05; mas sin embargo en la **Figura 6.12c**, se observa que dicho parámetro tiene un comportamiento oscilante, la banda que representa la desviación estándar esta distante de ser uniforme en comparación con los escenarios ya evaluados hasta ahora.

Es importante resaltar que este escenario experimenta 4 zonas muertas en placas a diferencia de los escenarios ya analizados con sólo 3. Esto se puede relacionar

con el hecho de que el presente escenario en su oscilar alcanza números de Reynolds hasta de 157, lo que propicia la existencia de una cuarta zona muerta.

El flujo de este escenario se considera altamente inestable, tiene altibajos en cada campo de flujo entre placas lo que perjudica a la eficiencia hidráulica.

La mediana en la **Figura 6.12d** tiene un valor 1435.46 segundos lo que significa una diferencia de 664.54 con respecto al tiempo de residencia teórico. La desviación estándar de los tiempos de residencia es del orden de 828.85.

En la **Figura 6.13**, se aprecia 8 registros para los valores de tiempo de residencia aproximados a 1100, 1400 y 1500 segundos. Así como 5 registros que hacen referencia a un valor de 2250 segundo aproximadamente

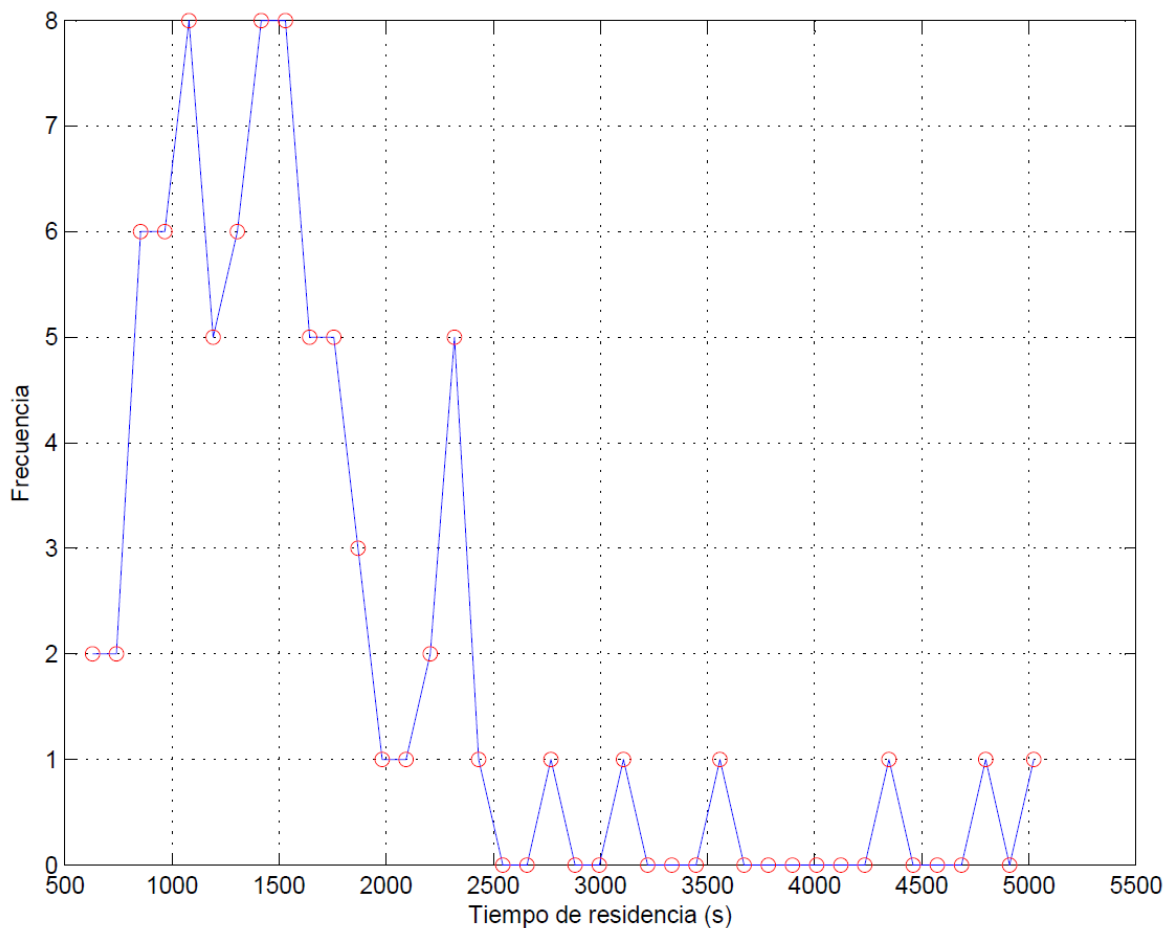
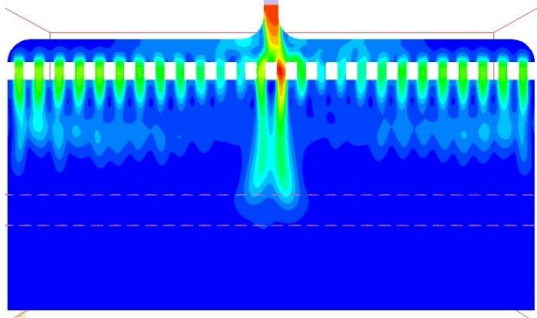
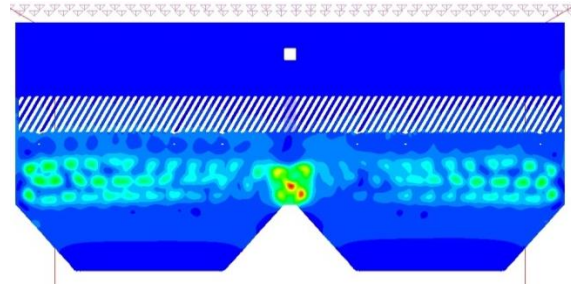


Figura 6.13. Centros de clase, escenario 15 grados.

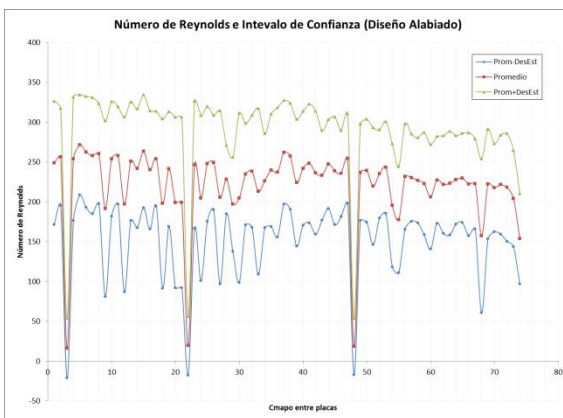
Diseño alabiado



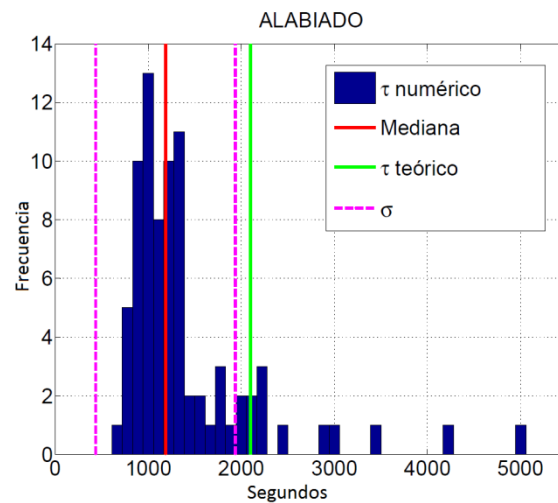
(a). Vista planta.



(b). Vista frontal.



(c). Número de Reynolds en placas.



(d). Histograma (τ)

Figura 6.14. Evaluación del comportamiento hidráulico escenario alabiado.

Los muros de la zona de entrada no tienen ángulo de inclinación, están provistos de radios de curvatura de 0.40 m con lo que se pretendió suavizar la entrada del flujo hacia la zona de sedimentación, se observa que los chorros tienen menor longitud de desarrollo que el resto de los escenarios, **Figura 6.14a**. Así mismo en la **Figura 6.14b**, se observa el chorro central con menor intensidad que la experimentada en los demás escenarios.

El número de Reynolds se comporta oscilante, similar al comportamiento presentado en el escenario 15 grados, la banda correspondiente a la desviación estándar se considera estrecha en la mayoría de los campos de flujo, **Figura 6.14c**. El número de Reynolds promedio es del orden de 229.29 muy cercano al escenario 07 grados.

La desviación estándar que presentan los tiempos de residencia es de 750.62; la mediana es igual a 1185.01 segundos, misma que representa una diferencia de 915 segundos con respecto al valor teórico.

Los valores de tiempo de residencia más frecuentes para este escenario son 998 segundos con 13 registros, seguido por el valor 1332 segundos con 11 registros, así como 887 y 1220 segundos con 10 registros cada uno. Estos valores se posicionan muy por debajo del valor teórico por lo que se establece cortocircuito.

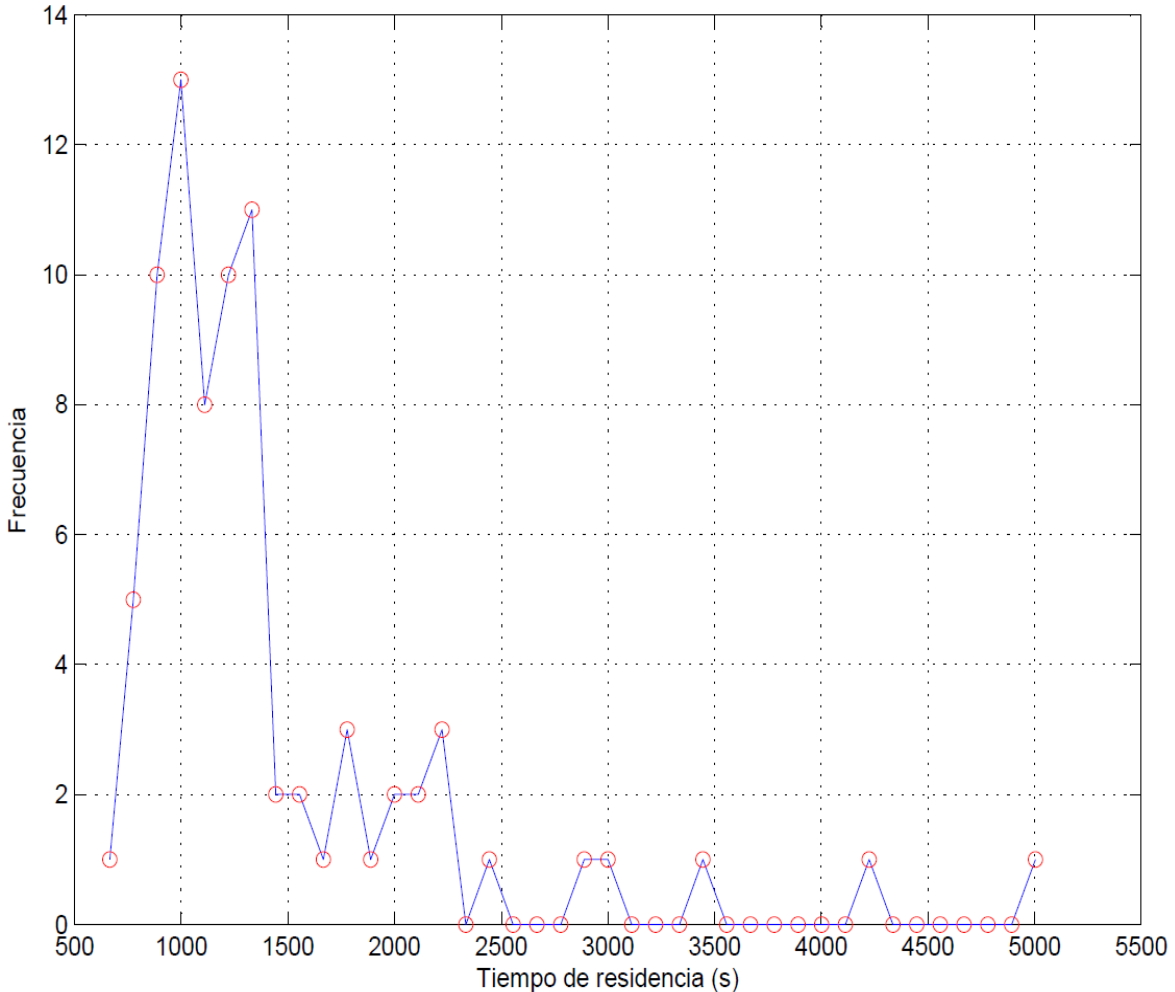


Figura 6.15. Centros de clase, escenario alabiado.

CAPÍTULO 7 . RESULTADOS

7.1 Escenario propuesto como mejora al sistema

En este apartado se expondrán las razones por las cuales se elegirá un escenario de modelación como mejora al diseño original, para ello se establece la nomenclatura con la cual se identificarán los escenarios de modelación para su evaluación, **Tabla 7.1**.

Tabla 7.1. Identificadores para escenario.

ID	Descripción
DO	Diseño original
E5	Escenario de modelación 05 grados
E7	Escenario de modelación 07 grados
E10	Escenario de modelación 10 grados
E15	Escenario de modelación 15 grados
Ea	Escenario de modelación alabiado

Revisión por número de Reynolds

Mediante la valoración del número de Reynolds se podrá conocer de los escenarios propuestos, cuál de ellos presenta flujo laminar, retomando los criterios de diseño donde se establece que los sedimentadores de alta tasa deben de operar con un número de Reynolds menor a 500 y en algunos casos menores de 200.

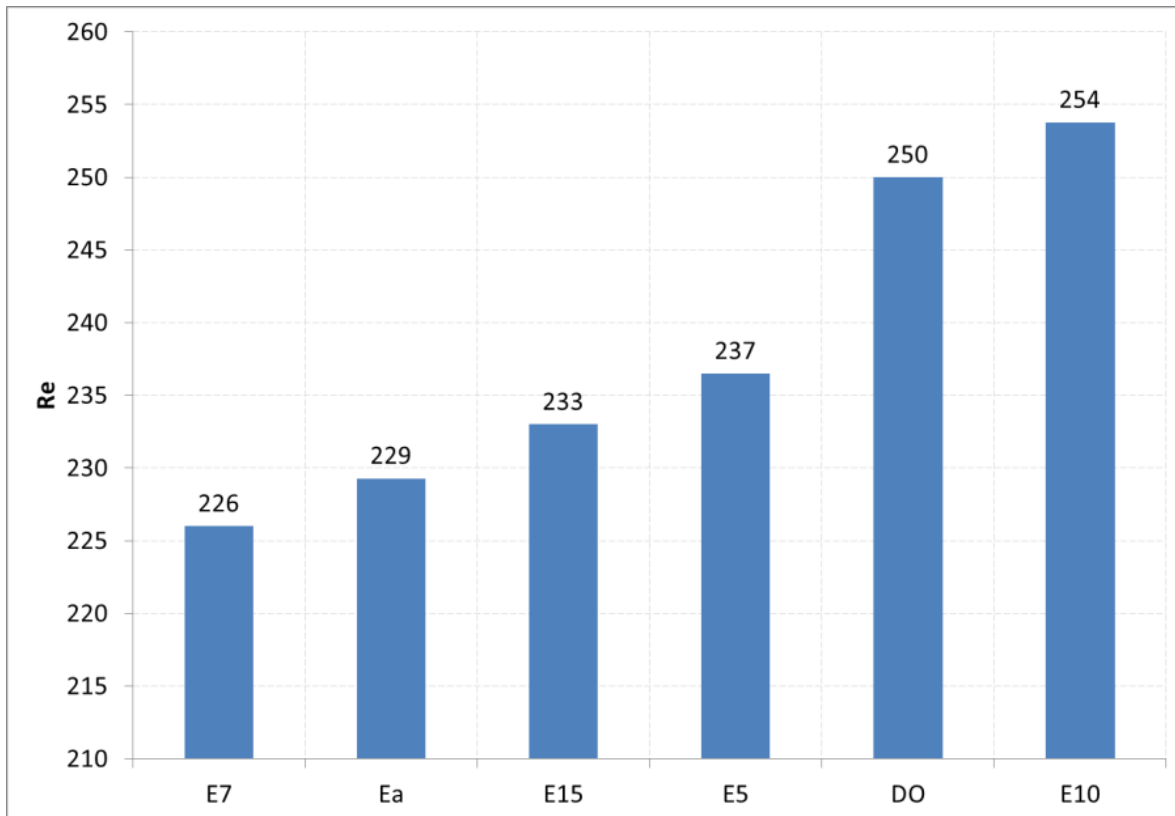


Figura 7.1.-Revisión de escenarios por número de Reynolds.

Estableciendo un orden ascendente de [1 a 6] donde [1] hace referencia al escenario con mejor desempeño laminar y [6] hace referencia al escenario con el peor desempeño laminar se tiene la **Tabla 7.2:**

Tabla 7.2. Desempeño laminar por escenario.

1	E7	226
2	Ea	229
3	E15	233
4	E5	237
5	DO	250
6	E10	254

Revisión por la “mediana” de los tiempos de residencia

La propiedad estadística mediana, indica el valor que hace referencia a la posición central de un conjunto de datos ordenados de manera ascendente.

Para este caso el conjunto de datos será el que se refiera a los tiempos de residencia de cada escenario, evaluando así la mediana de cada uno de ellos y

comparándose a su vez con el tiempo de residencia teórico obtenido de la ecuación $\tau = V/Q$. Ver **Figura 7.2**.



Figura 7.2. Revisión de la mediana por escenario.

Estableciendo un orden ascendente de [1 a 6] donde [1] representa la mediana del escenario que tiene mejor aproximación al tiempo de residencia teórico y [6] hace referencia al escenario con la peor aproximación al mismo tenemos la

Tabla 7.3.

Tabla 7.3. Revisión de la mediana por escenario.

1	E7	1482.56
2	E5	1439.97
3	E15	1435.46
4	E10	1415.69
5	Ea	1185.01
6	DO	1167.94

Revisión “desviación estándar” de los tiempos de residencia

Este parámetro nos indica una medida de la dispersión de cada uno de los elementos del conjunto (tiempos de residencia) con respecto a la media aritmética de los mismos. Para este estudio la desviación estándar será evaluada con respecto a la mediana debido a que la media aritmética es influenciada por los tiempos de residencia altos, lo que arroja un panorama no confiable del comportamiento de mencionado parámetro.

A continuación se presenta en la **Figura 7.3**, la valoración de la desviación estándar de cada escenario de modelación.

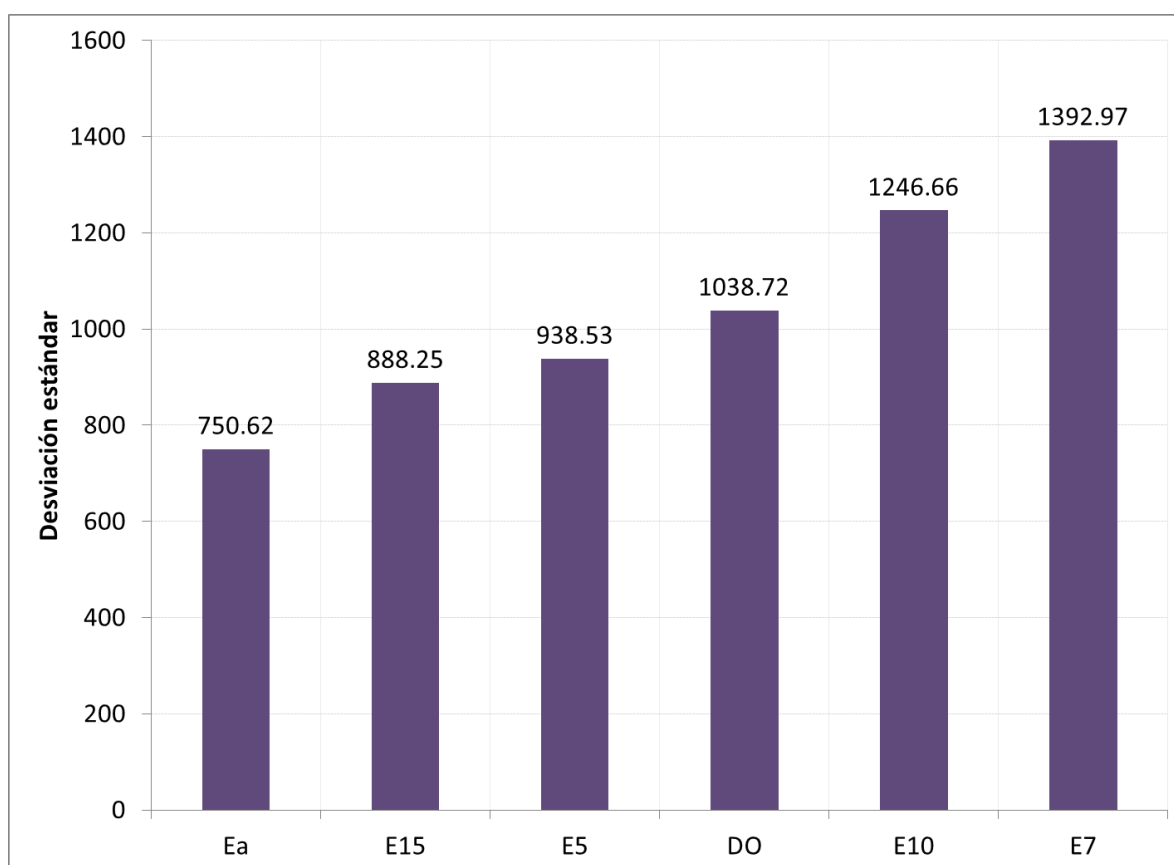


Figura 7.3. Valoración de la desviación estándar por escenario.

Estableciendo un orden ascendente de [1 a 6] donde [1] representa la desviación estándar del escenario que tiene menor dispersión en los registros de tiempo de residencia y [6] hace referencia al escenario con la dispersión de mayor magnitud de los mismos, se tiene la **Tabla 7.4**.

Tabla 7.4. Revisión de desviación estándar por escenario.

1	Ea	750.62
2	E15	888.25
3	E5	938.53
4	DO	1038.72
5	E10	1246.66
6	E7	1392.97

Con base en los tres parámetros evaluados que son: Número de Reynolds, mediana de los tiempos de residencia y desviación estándar de los mismos se propone al escenario de modelación “07 grados” como mejora al diseño original.

Las conclusiones a continuación presentadas, están basadas en la comparación de los parámetros como son: Número de Reynolds, mediana de los tiempos de residencia y desviación estándar de los mismos, con respecto al diseño original.

Considerando como *mejora* del desempeño hidráulico, la disminución de la magnitud del número de Reynolds en los escenarios propuestos con respecto al diseño original se tiene en la **Figura 7.4**, que el escenario E7 tiene una mejora del 10%, lo contrario ocurre con el escenario E10 con una variación de -2%, es decir, en este último, el número de Reynolds se incrementó en dos por ciento.

El escenario E7 es el sistema que opera con el número de Reynolds más bajo por lo tanto es el que más se apega a las exigencias de diseño.

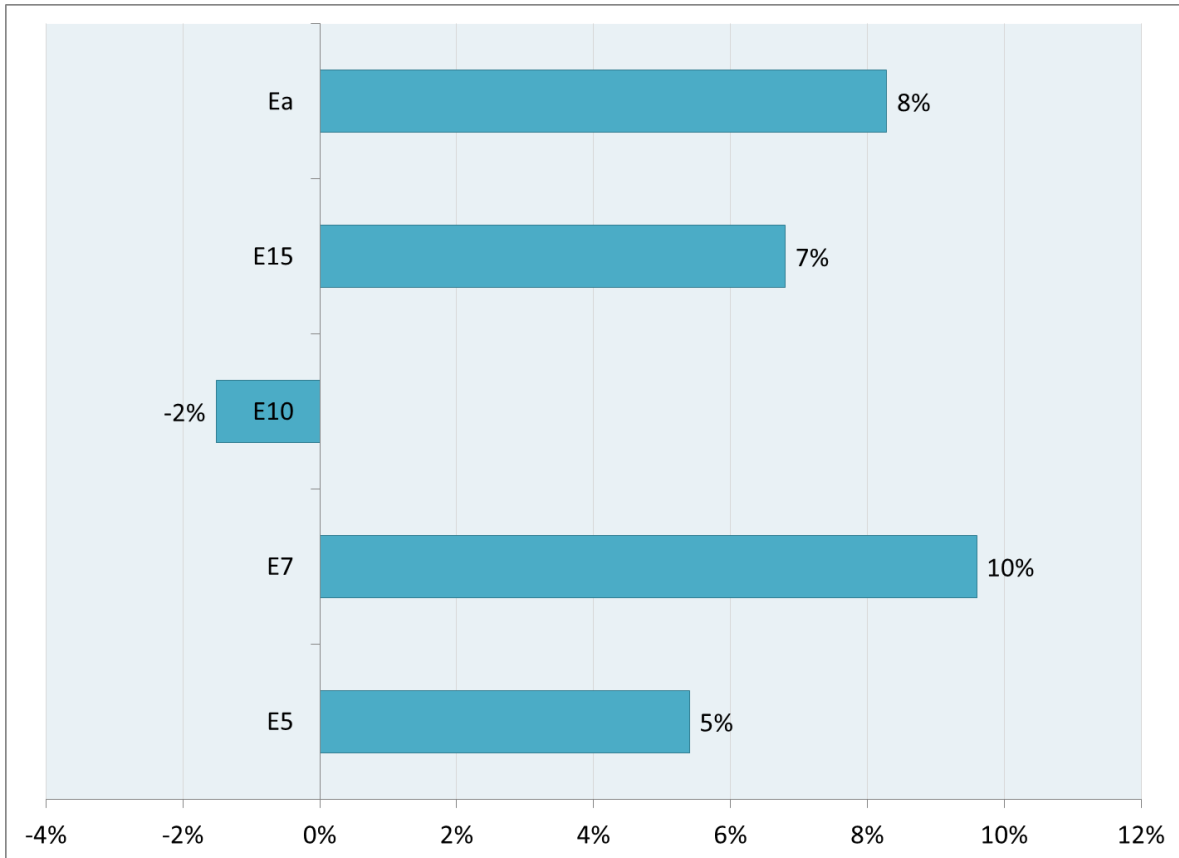


Figura 7.4. Mejora en por ciento del número de Reynolds por escenario, (relacionado con la característica de flujo laminar).

La aproximación de la mediana de cada escenario con respecto al tiempo de residencia teórico, se puede medir efectuando una diferencia entre dichos parámetros; la determinación del porcentaje de mejora, presentado en la **Figura 7.5**, es el resultado de efectuar una comparativa de la diferencia de la mediana del diseño original con respecto al tiempo de residencia teórico, misma que a su vez compara con la diferencia de cada escenario.

Como se observa en la imagen mencionada en el párrafo anterior, los porcentajes presentados en la **Figura 7.5** hacen referencia a la reducción de la separación que existe entre la mediana de cada escenario y el tiempo de residencia teórico. El escenario con mayor porcentaje de mejora es el E7 con 34%, en contraste con la diferencia del escenario Ea con tan solo 2% de mejora.

El escenario E7 es el más recomendable para ser propuesto como diseño de mejora debido a que sus registros de tiempo de residencia se aproximan al valor teórico.

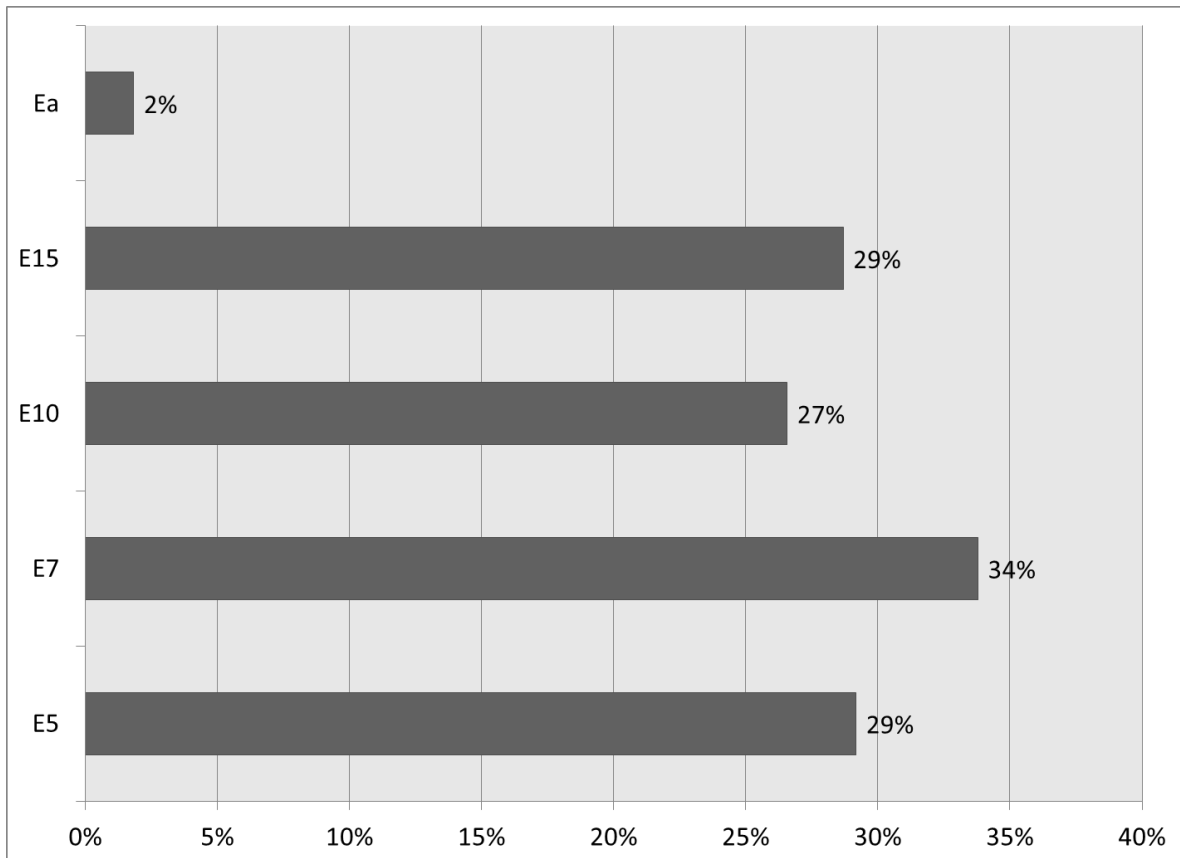


Figura 7.5. Mejora en por ciento de la aproximación mediana- τ teórico. (relacionado con el tiempo de residencia, menos cortocircuito).

Con base en la **Figura 7.6** se puede concluir lo siguiente:

- El comportamiento del flujo “cortocircuito” no se pudo eliminar por completo de la unidad de alta tasa, más sin embargo se logró una disminución del mismo mediante el escenario de modelación 07 grados, este diseño es el único que logra obtener 8 registros superiores a 2100 segundos lo que amortigua el cortocircuito en el sistema.
- La mediana del escenario 07 grados es la más cercana al tiempo de residencia teórico, por lo que este escenario es el que se recomienda como mejora del comportamiento hidráulico de la unidad de tratamiento en estudio.
- El escenario 07 grados se recomienda como referencia para considerar cambios de mejora al diseño original lo que incrementará la eficiencia hidráulica actual.

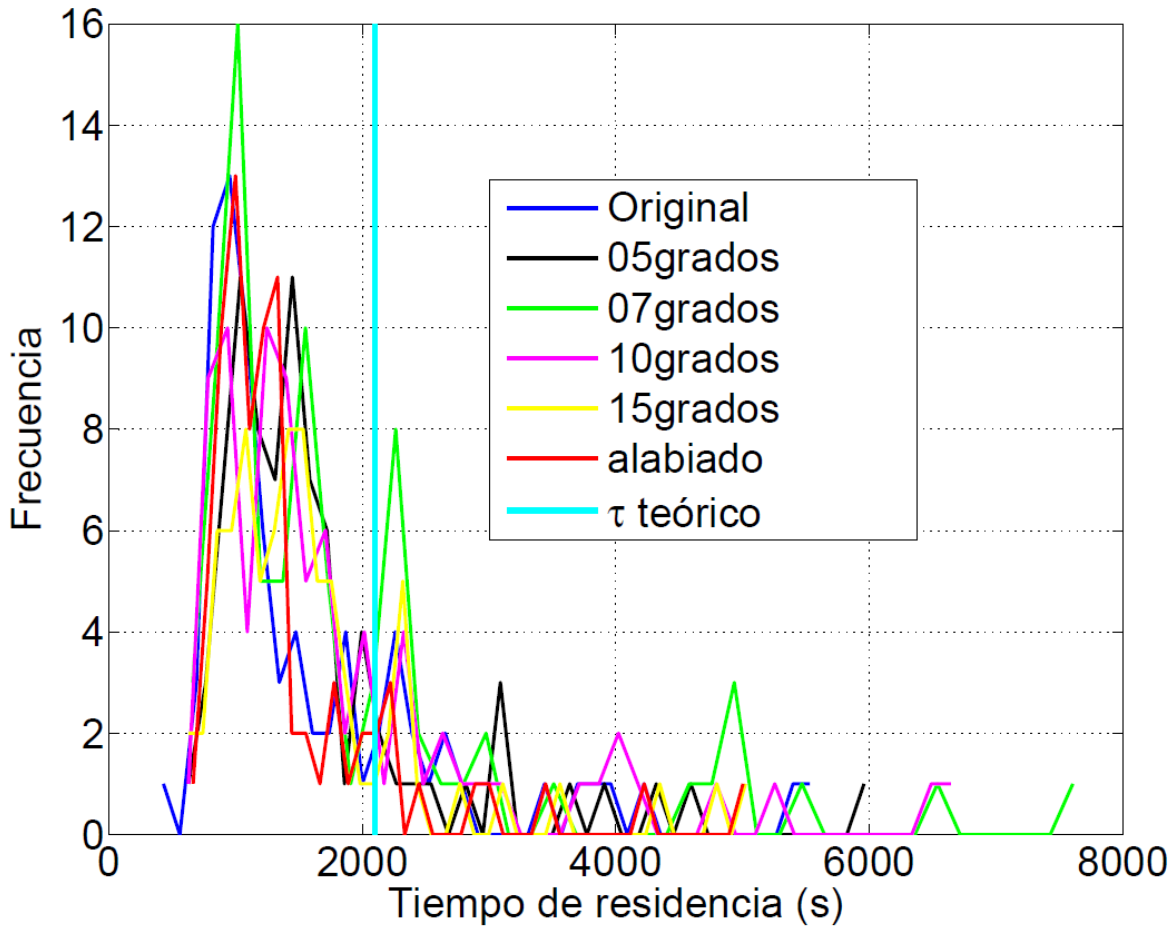


Figura 7.6. Análisis de frecuencia todos los escenarios, (relacionado con la repetitividad de cada tiempo de residencia analizado).

- La concentración de los datos en todos los escenarios tiene preferencia hacia la izquierda del tiempo de residencia teórico, lo que representa la falta de alguna estructura a parte del muro difusor que contribuya a la disipación de energía y de esa manera recorrer dicho grupo de datos hacia el valor teórico.
- Debido a la demanda de agua que se debe satisfacer para cubrir las necesidades básicas de la población a la que fue destinada la construcción de la unidad de tratamiento en estudio, considerar disminuir el caudal para disipar el cortocircuito en el sedimentador es improbable.

CONCLUSIONES

El objetivo principal del estudio: evaluación hidrodinámica del sedimentador de alta tasa mediante el uso de una software de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se cumplió, ya que se logró determinar los tiempos de residencia para los 80 vertedores de salida ubicados en la canaleta de salida y con ellos determinar la existencia o inexistencia de cortocircuito, así como de zonas muertas en el sedimentador.

Mediante la aplicación de la herramienta computacional, se logró determinar el número de Reynolds en los 174 campos de flujo entre placas para cada escenario de simulación, lo que permitió elegir el que mejor se apega a los criterios de diseño que para este caso fue el escenario 07 grados quien tuvo un Reynolds cercano a 226 .

El empleo del DFC, facilita al ingeniero, determinar las deficiencias geométricas de las estructuras hidráulicas, lo que permite realizar cambios en un tiempo relativamente corto en comparación con los modelos de tipo físico.

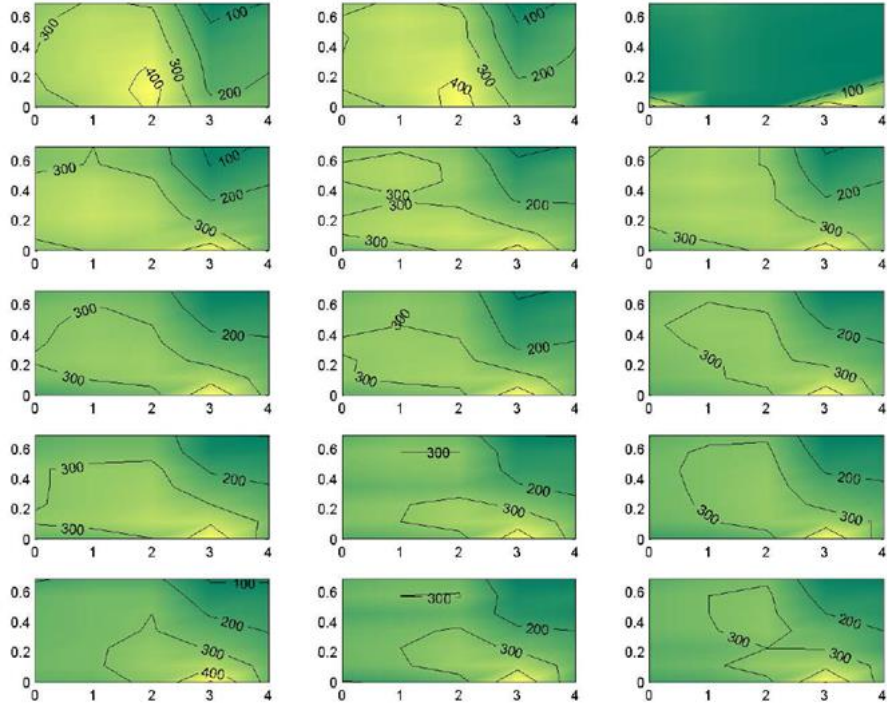
El DFC tiene la ventaja de modelar a escala 1:1 por lo que los resultados obtenidos de mencionada herramienta no se ven afectado por este factor, además de que el uso de esta alternativa no tiene retrasos de tipo constructivo, ni por falta de recurso humano.

En comparación con la técnica de trazadores, la modelación numérica tiene la capacidad de visualizar los campos de flujo en cualquier posición de la estructura lo que facilita la labor de toma de decisiones, en contraste con la primer técnica donde no se cuenta con visualización del comportamiento y distribución del trazador aparte de que esta prueba se debe de realizar in situ y medir de manera indirecta los tiempos de residencia utilizando la concentración de la sustancia trazadora.

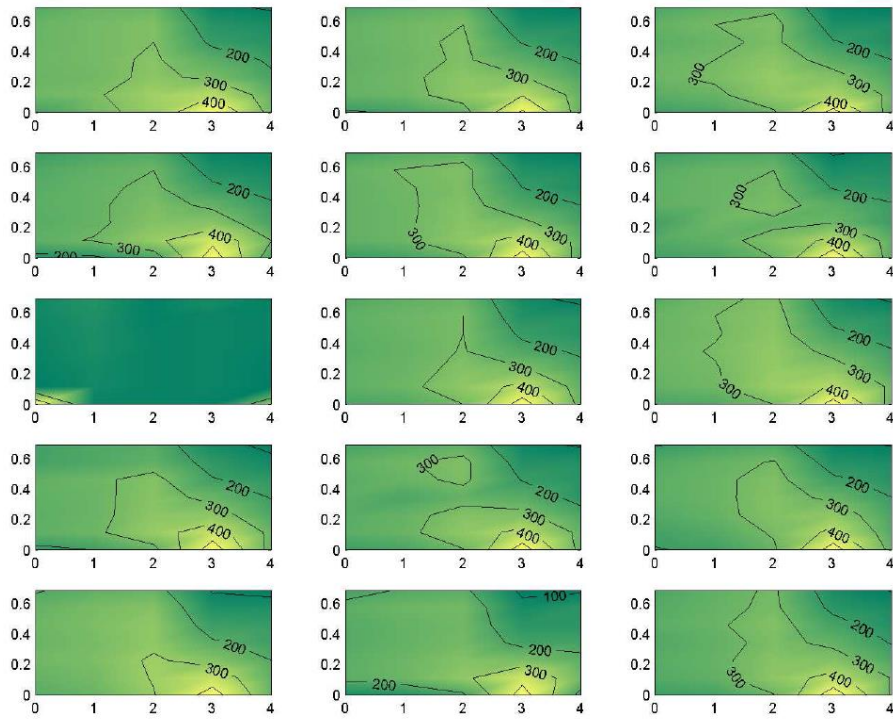
RECOMENDACIONES PARA SIGUIENTES EVALUACIONES

- Se propone colocar un segundo muro difusor en la zona de ingreso, lo que fomentaría la disminución de la velocidad de entrada y con ello minimizar la magnitud del cortocircuito, así como también se reduciría la longitud de desarrollo del chorro central que se forma en los escenarios de modelación. Esta propuesta no se modeló debido a tiempo terminales de tesis.
- Sería interesante la determinación de los perfiles de flujo entre placas para poder calcular la velocidad máxima y media entre dichos elementos inclinados.
- Utilizar un software DFC que tenga la facilidad de generar un dominio de modelación que se ajuste a la geometría del elemento a evaluar.

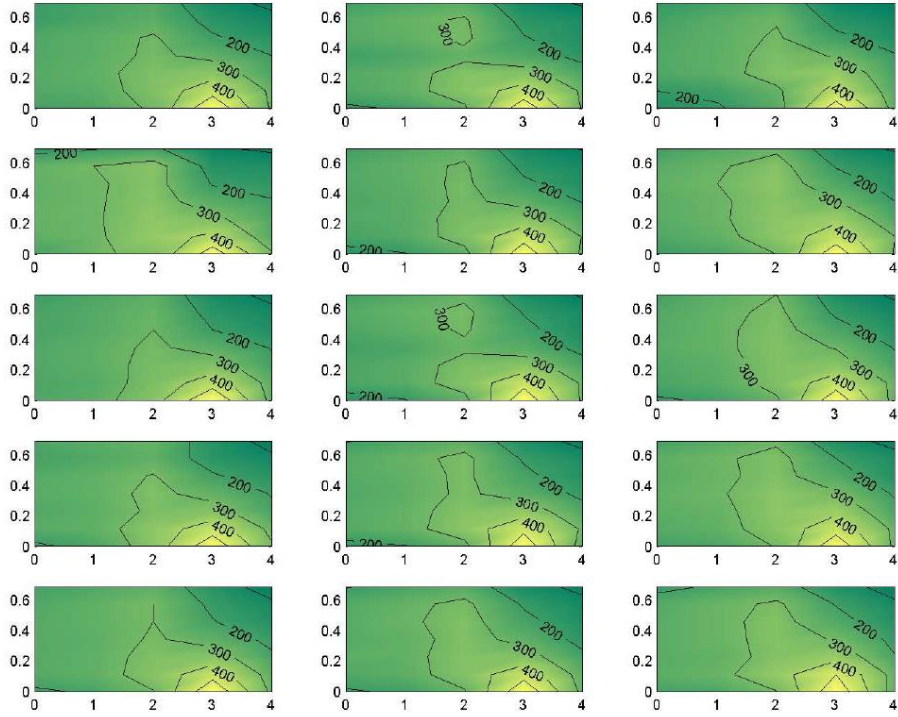
ANEXO A. Isocontornos de velocidades entre placas.



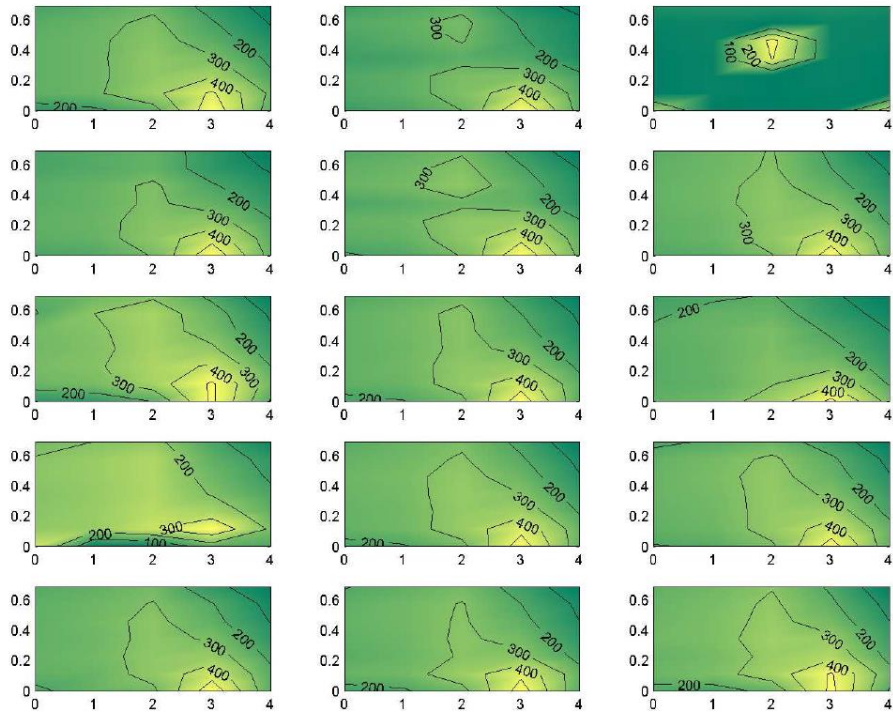
Número de Reynolds entre placas (1-15).



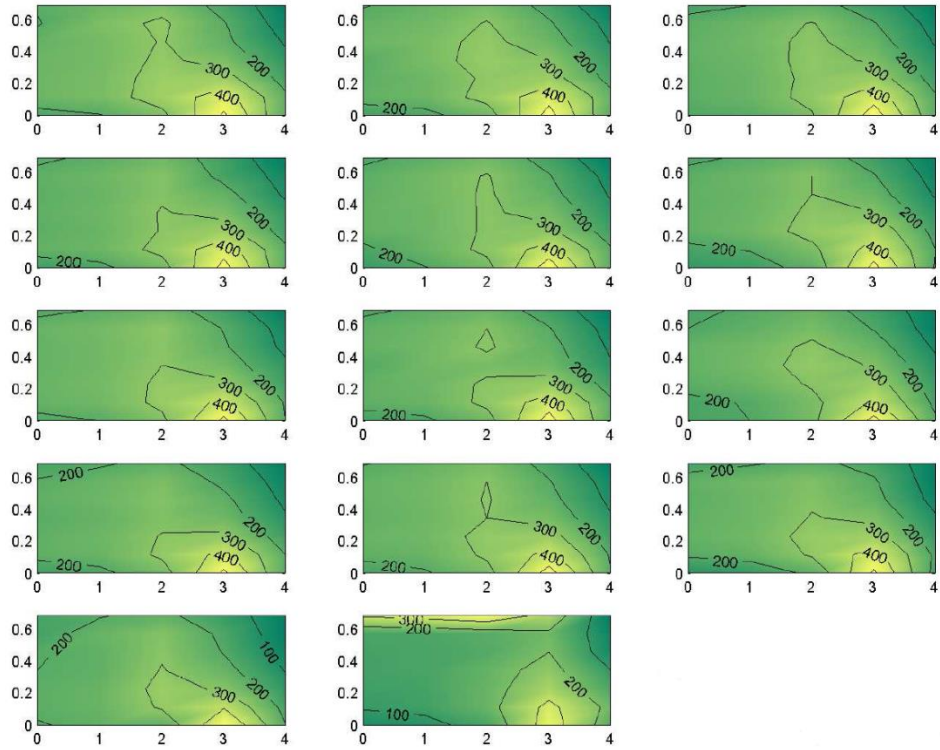
Número de Reynolds entre placas (16-30).



Número de Reynolds entre placas (31- 45)

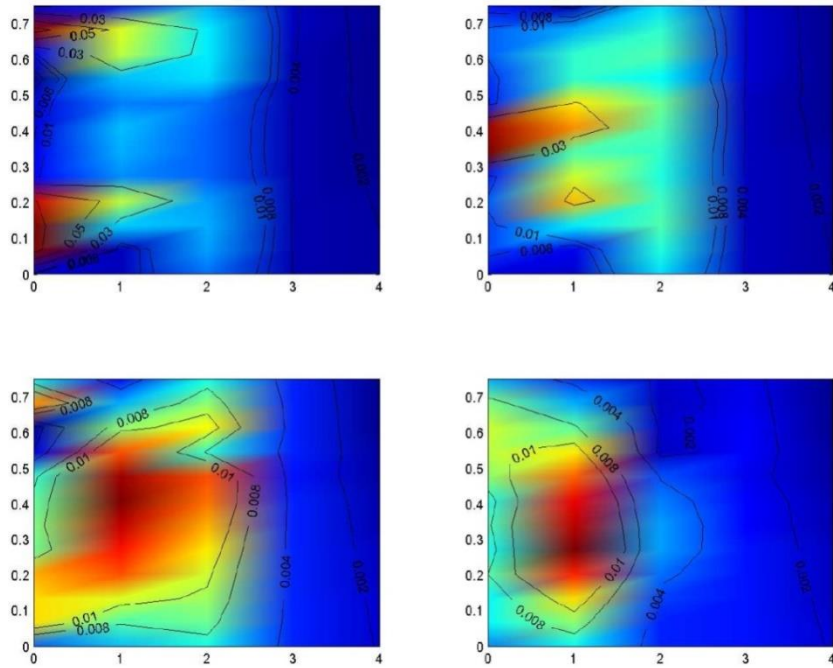


Número de Reynolds entre placas (46-60).

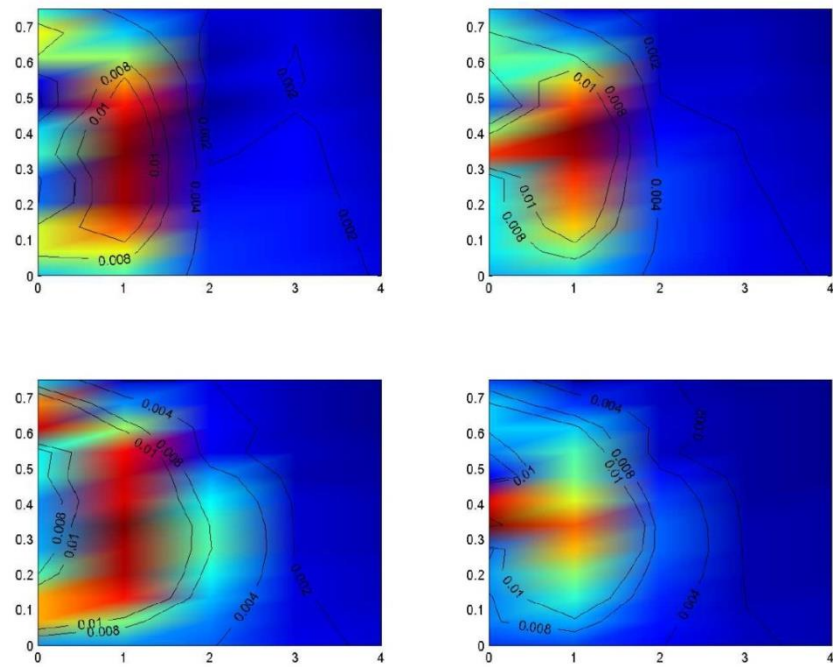


Número de Reynolds entre placas (61-74).

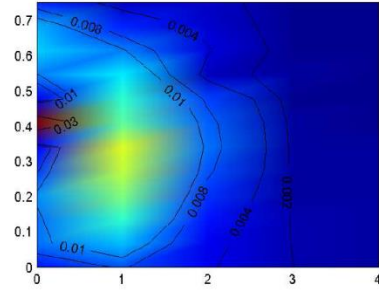
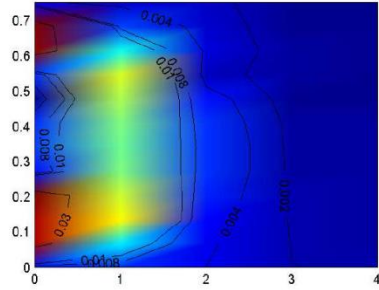
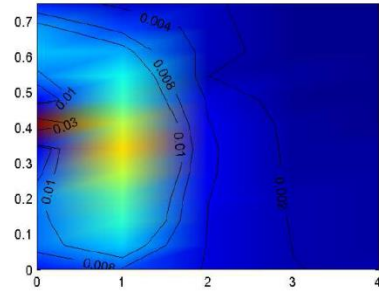
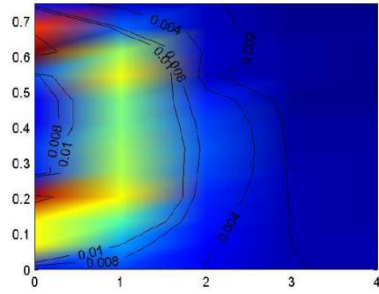
ANEXO B. Isocontornos de velocidades en orificios de entrada.



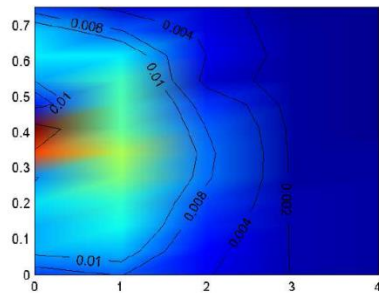
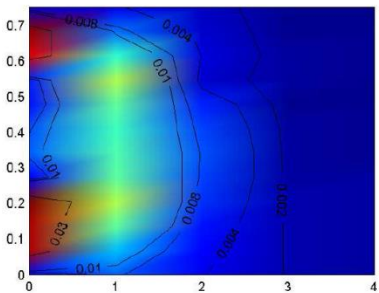
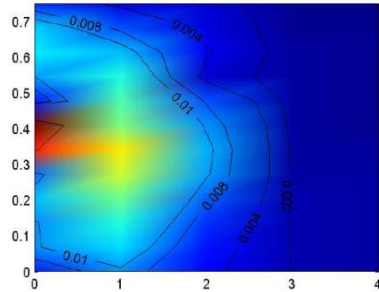
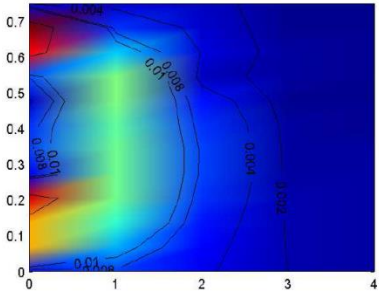
Velocidades de entrada (1-4).



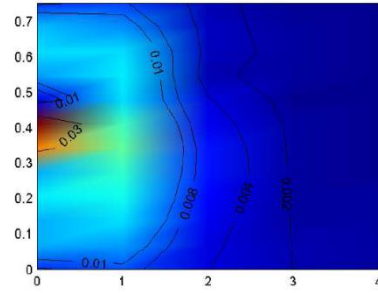
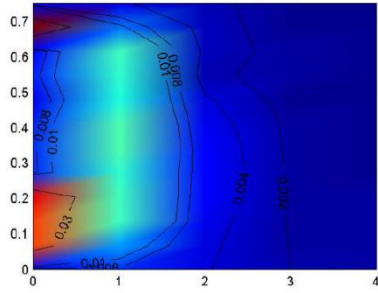
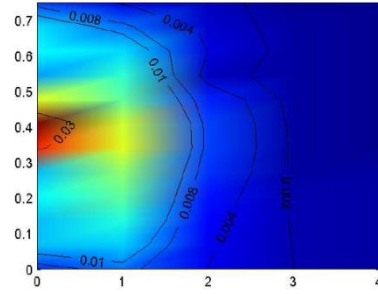
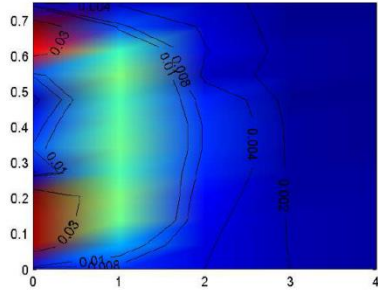
Velocidades de entrada (5-8).



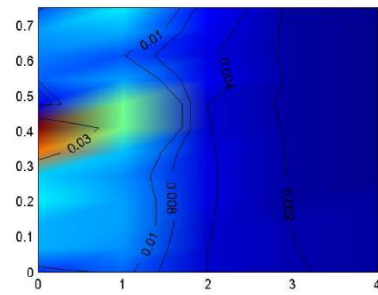
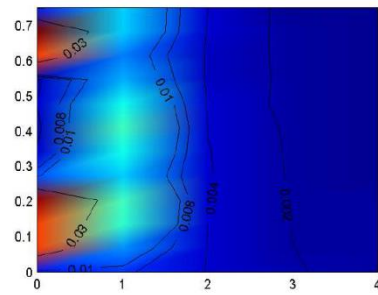
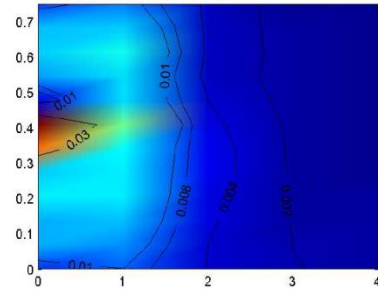
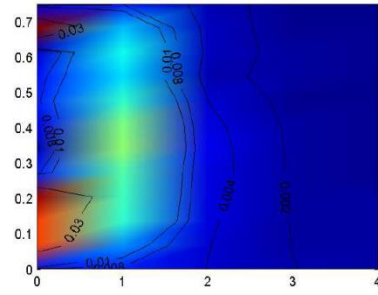
Velocidades de entrada (9-12).



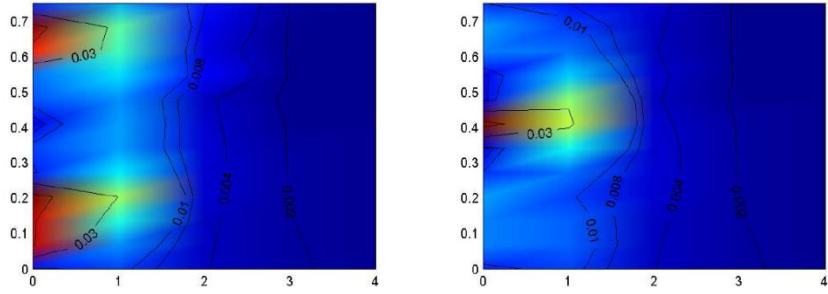
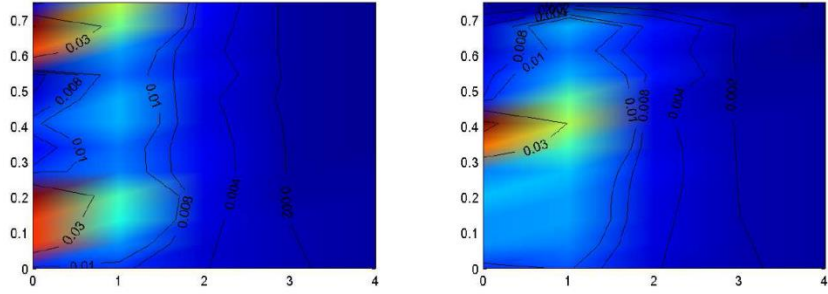
Velocidades de entrada (13-16).



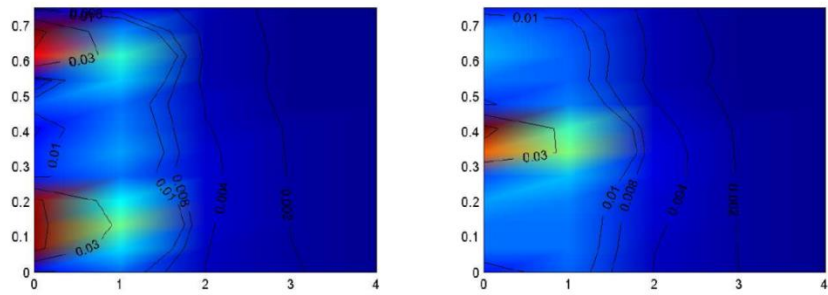
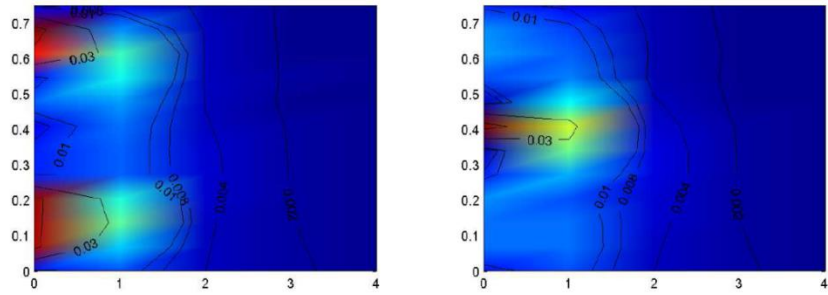
Velocidades de entrada (17-20).



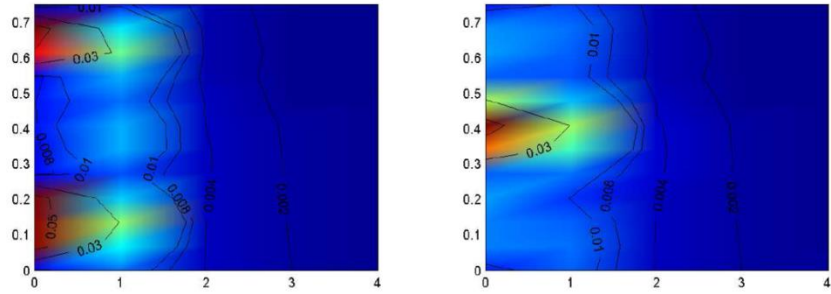
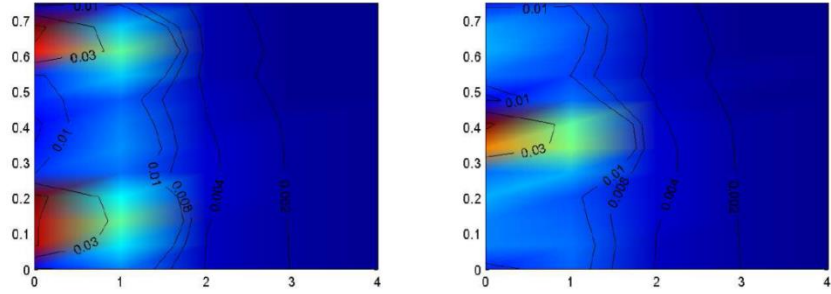
Velocidades de entrada (21-24).



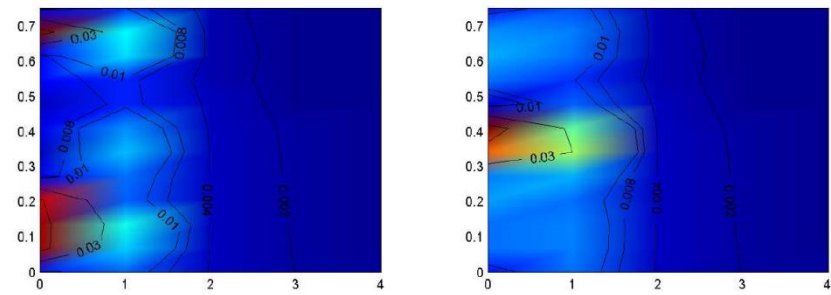
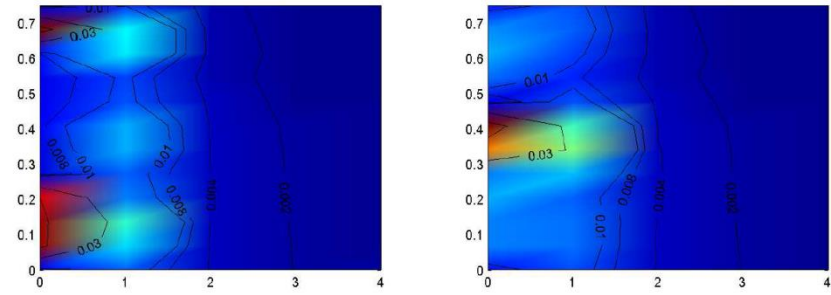
Velocidades de entrada (25-28).



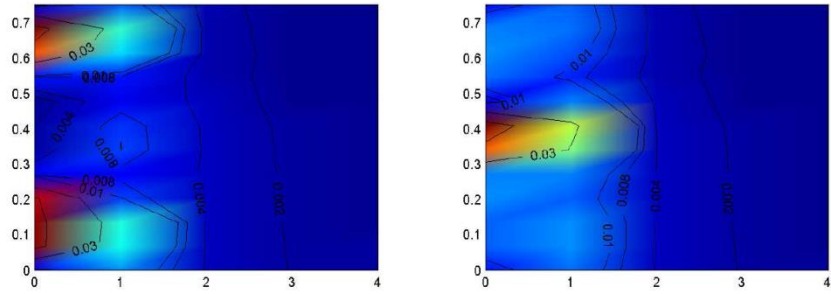
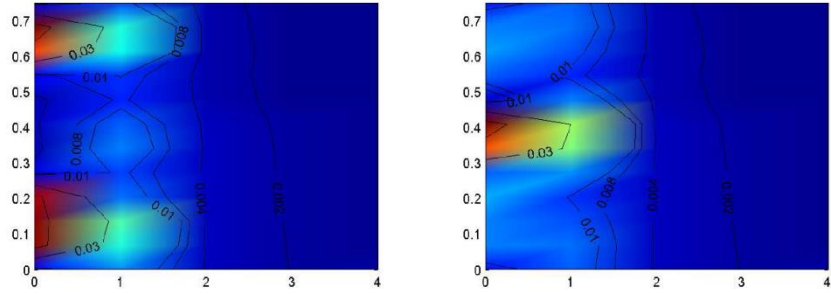
Velocidades de entrada (29-32).



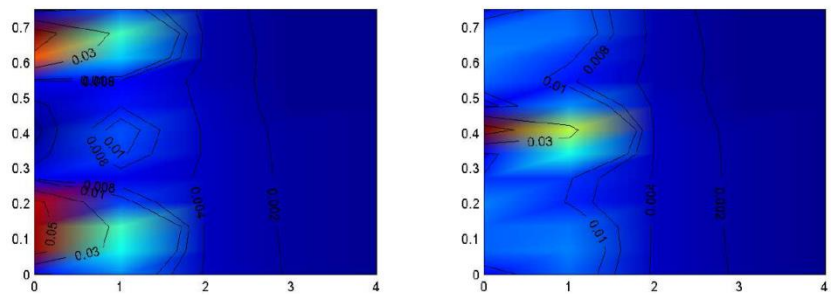
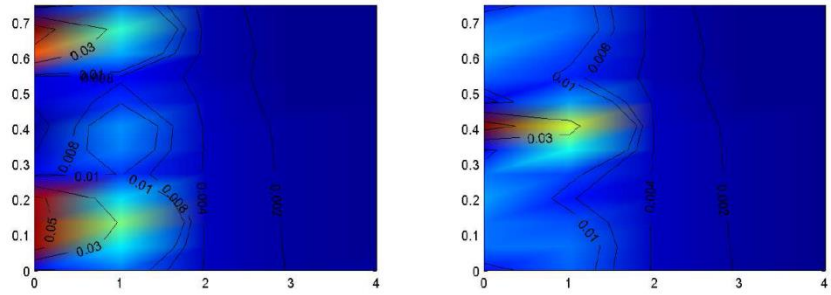
Velocidades de entrada (33-36)



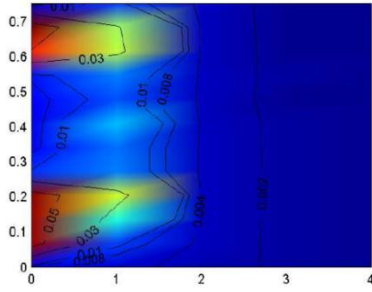
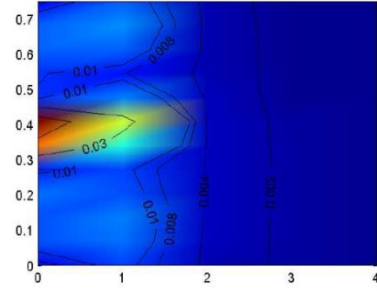
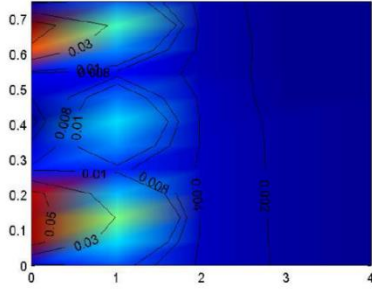
Velocidades de entrada (37-40).



Velocidades de entrada (41-44).



Velocidades de entrada (45-48).



Velocidades de entrada (49-51).

BIBLIOGRAFÍA

- Al-Sammarraee, M., Chan, A., Salim, S., & Mahabaleswar, U. (2009). *Large-eddy simulations of particle sedimentation in a longitudinal sedimentation basin of a water treatment plant. Part I: Particle settling performance*. Selangor, Malasia: ELSEVIER.
- Arboleda, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua* (Tercera ed., Vol. 1). (R. P. Molina, Ed.) Santa Fé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.
- Camp, T. R. (1946). *Sedimentation and the Desing of Settling Tanks. III*.
- CEPIS. (2005). *Evaluación de plantas de tecnología apropiada* (Vol. III). Lima, Perú: Organización Panamericana de la salud.
- CONAGUA. (2011). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*. Comisión Nacional del Agua.
- Crittenden, J. C. (2012). *Water treatment: principles and desing* (Segunda ed.). Hoboken, New Jersey, EUA: John Wiley & Sons, Inc.
- Fernández, J. M. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos*. Barcelona: Reverté. S.A.
- Fernández, J. M. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluídos: Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos*. Barcelona: Reverté.
- Garrido Hoyos, S. E., & Vázquez Tirado, G. (2008). *Proyecto Funcional y Términos de Referencia para la Licitación Llave en Mano de la Planta Potabilizadora de Xicotepec, Puebla*. Informe Técnico, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Potabilización, Jiutepec, Morelos, México.
- Ghawi, A., & Jozef, K. (2009). *A CFD methodology for the design of rectangular sedimentation tanks in potable water treatment plants*. Bratislava, Eslovaquia: Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA.
- Hazen, A. (July de 1904). On Sedimentation. *LIII*(2), 45-71.
- K.M., Y. (February de 1970). Theoretical Study of High-Rate Sedimentation. *42*(2), 10.
- Kawamura, S. (2000). *Integraded desing and operation of water treatment facilities* (Second ed.). Nueva York, EUA: John Wiley & Sons, Inc.
- Martín Domínguez, A., Avilés Flores , M., Flores Ordeñana, L. M., González Herrera, A., Montellano Palacios, L., Piña Soberanis, M., y otros. (1998). *Manual de Evaluación de Plantas Potabilizadoras*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Subcoordinación Potabilización, Jiutepec, Morelos.

- NOM-127-SSA1-1994. (1994). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental, Agua para Uso y Consumo Humano-Límites Permisibles de Calidad y Tratamientos a que debe Someterse el Agua para su Potabilización. México: Diario Oficial de la Federación.
- Romero, J. (2000). *Purificación del agua* (Primera ed.). Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero, J. A. (2000). *Purificación del agua* (Primera ed.). Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Roza, T., & Asterios, P. (2014). *The influence of lamellar settler in sedimentation tanks for potable water treatment— A computational fluid dynamic study*. Xanthi, Grecia: ELSEVIER.
- Santacruz, L. (2005). *Aplicación de modelos para evaluación hidrodinámica de un sedimentador de alta tasa*. México D.F.: Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Seddon. (1889). Cleaning Water by Settlement. 477.
- Sotelo. (2002). *Hidráulica de canales* (Primera ed.). México: Facultad de ingeniería.
- Spellman, F. R. (2014). *Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations* (Third ed.). Boca Raton, Florida, EUA: Taylor & Francis Group.
- Spiegel, M. R. (1970). *Teoría y problemas de estadística*. (A. L. Jose Luis Gómez Espadas, Trad.) Naucalpan de Juárez, Edo. México, México: McGraw-Hill.
- Xanthos, S., Ramalingam, K., Lipke, S., McKenna, B., & Fillos, J. (2013). *Implementation of CFD modeling in the performance assessment and optimization of secondary clarifiers: the PVSC case study*. New York, USA.: Water Science & Technology.
- Yao, K. (February de 1970). Theoretical Study of High-Rate Sedimentation. 42(2), 10.