



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA



---

---

# MODELACIÓN DE UN REACTOR ELECTROQUÍMICO DE FLUJO CONTINUO POR CFD PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

## T E S I S

Que para obtener el Título de  
Ingeniero civil

Presenta:

**Fabian Cervando Astudillo Luja**

Asesor: Dr. Boris Miguel López Rebollar

Co asesor: Dra. Guadalupe Vázquez Mejía

Toluca, México

noviembre 2020

## RESUMEN

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es utilizada para conocer las características de un flujo en movimiento y determinar las variables que intervienen en su comportamiento. Actualmente se recurre a la CFD para conocer campos de velocidades en reactores electroquímicos, pero pocas son las investigaciones que por medio de esta herramienta modifican la geometría de los reactores o sus componentes internos para lograr mejores resultados en el proceso de electrocoagulación.

En el presente trabajo, se analiza la hidrodinámica de un reactor electroquímico de flujo continuo y sus modificaciones, específicamente las variables de velocidad total, velocidad vertical y energía cinética de turbulencia para distintos caudales de operación, haciendo uso de la herramienta de CFD, demostrando de esta manera que las simulaciones por medio de herramientas computacionales brindan resultados certeros con un tiempo de trabajo bajo.

Los resultados obtenidos brindan información acerca de la eficiencia e importancia de la geometría, ubicación de entrada y salida en reactores electroquímicos. Para modificaciones de ubicación y geometría de la entrada, los valores hidrodinámicos no son tan representativos comparados con el reactor prototipo. La colocación de un mezclador estático interno en el reactor aumenta la energía cinética de turbulencia, pero disminuye la velocidad promedio en algunas de las zonas.

De acuerdo con los datos obtenidos mediante CFD, se relaciona que el aumento de la energía cinética de turbulencia es posible mediante la colocación de mezcladores estáticos internos, los cuales no crearán una acumulación de sedimentos o partículas debido a las velocidades dentro del reactor.

## CONTENIDO

<b>1. CAPÍTULO 1, INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1 Planteamiento del problema .....	5
1.2 Justificación .....	6
1.3 Hipótesis.....	7
1.4 Objetivo general.....	7
1.5 Objetivos específicos.....	7
<b>2 .CAPÍTULO 2, AGUAS RESIDUALES</b> .....	10
2.1 Características de las aguas residuales .....	11
2.2 Procesos de tratamiento.....	12
2.3 Normatividad de México .....	14
<b>3. CAPÍTULO 3, REACTORES ELECTROQUÍMICOS</b> .....	18
3.1 Tratamientos electroquímicos.....	18
3.2 Electrocoagulación .....	20
3.3 Consideraciones generales para los reactores de flujo continuo.....	22
3.3.1 Balance macroscópico.....	23
3.3.2 Balance microscópico .....	27
3.3.3 Parámetros operacionales .....	28
<b>4 CAPÍTULO 4, GENERALIDADES CFD</b> .....	30
4.1 Antecedentes CFD .....	30
4.2 Proceso general de la dinámica de fluidos computacional .....	33
4.3 Modelos y ecuaciones de la CFD .....	37
4.3.1 Ecuaciones de Navier-Stokes .....	37
4.3.2 Turbulencia y modelo de turbulencia $k-\epsilon$ .....	39
4.3.3 Ecuaciones Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS) .....	40
4.3.4 Modelo de turbulencia $\kappa-\epsilon$ .....	42
4.4 CFD-ANSYS-FLUENT .....	43
4.4.1 Geometría.....	45
4.4.2 Malla .....	45
4.4.3 SET-UP .....	46

4.4.4 Condiciones iniciales y de frontera .....	46
4.4.5 Monitoreo de la simulación .....	46
4.4.6 Post-Procesamiento.....	47
<b>5 CAPÍTULO 5, METODOLOGÍA .....</b>	<b>48</b>
5.1 Programa de actividades.....	49
5.2 Antecedentes del reactor.....	56
5.3 Simulación de reactor prototipo (Reactor entrada – salida perpendicular) .....	57
5.3.1 Características geométricas y datos de entrada .....	57
5.3.2 Modelo conceptual del reactor prototipo.....	58
5.3.3 Proceso de modelación .....	59
5.3.4 Geometría del reactor.....	59
5.3.5 Creación de malla para el reactor prototipo .....	60
5.3.6 Valores de entrada y solución .....	62
5.4 Simulación de reactores modificados.....	64
5.4.1 Modelo conceptual de los reactores modificados .....	64
5.4.2 Modelación de los reactores modificados .....	67
5.4.3 Establecimiento de la malla de los reactores modificados .....	68
5.4.4 Valores de entrada y solución de los reactores modificados .....	73
<b>6 CAPÍTULO 6, RESULTADOS Y ANÁLISIS .....</b>	<b>77</b>
6.1 Comparación de resultados entre el R.E.S.P. y los reactores con distintas .....	77
configuraciones geométricas de entrada y salida.....	77
6.1.1 Velocidad total R.E.S.P .....	80
6.1.2 Velocidad vertical R.E.S.P .....	86
6.1.3 Turbulencia del R.E.S.P.....	92
6.1.4 Resultados comparativos entre R.E.S.P. y reactores modificados .....	96
6.1.5 Comparación velocidad total máxima .....	97
6.1.6 Comparación energía cinética de turbulencia máxima.....	101
6.2 Comparación de resultados entre el R.E.S.P. y el reactor con R.E.S.P.M .....	105
6.2.1 Velocidad total R.E.S.P.M.....	105
6.2.2 Velocidad vertical R.E.S.P.M.....	108
6.2.3 Turbulencia del R.E.S.P.M.....	113
6.2.4 Resultados comparativos entre R.E.S.P. y R.E.S.P.M.....	116

6.2.5 Comparación velocidad total máxima .....	117
6.2.6 Comparación energía cinética de turbulencia máxima.....	120
6.2.7 Comparativa gradiente de velocidad promedio, máximo y número de Reynolds.....	124
<b>7 CAPÍTULO 7, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>128</b>
A. Anexo 1.....	130
B. Anexo 2.....	142
C. Anexo 3.....	153
D. Anexo 4.....	155
E. Anexo 5.....	157
<b>Bibliografía .....</b>	<b>160</b>





## ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1-1 Reactores de mezcla completa. ....	3
Ilustración 1-2 Reactor de flujo pistón .....	3
Ilustración 3-1 Esquema de un proceso de electrocoagulación. ....	18
Ilustración 4-1 Etapas de la simulación CFD-ANSYS-FLUENT .....	44
Ilustración 5-1 Etapas realizadas para el desarrollo de la investigación .....	48
Ilustración 5-2 Diagrama desarrollado de las etapas .....	49
Ilustración 5-3 Equipos utilizados para el funcionamiento del reactor. ....	52
Ilustración 5-4 Modelo físico del reactor .....	53
Ilustración 5-5 Geometría y competentes del reactor prototipo .....	53
Ilustración 5-6 Extracción de volumen de control. ....	55
Ilustración 5-7 Detalle de malla CutCell en la geometría del reactor. ....	56
Ilustración 5-8 Escala de calidad ortogonal .....	56
Ilustración 5-9 Gráfica de calidad de elementos .....	57
Ilustración 5-10 Convergencia de iteraciones del reactor prototipo para caudal de 20ml/min .....	58
Ilustración 5-11 Geometría R.E.S.T. ....	60
Ilustración 5-12 Geometría R.E.A.S.T. ....	60
Ilustración 5-13 Geometría R.E.S.P.M. ....	61
Ilustración 5-14 Malla R.E.S.T. ....	62
Ilustración 5-15 Gráfica de calidad de los elementos para el R.E.S.T.....	63
Ilustración 5-16 Malla del R.E.A.S.T. ....	63
Ilustración 5-17 Gráfica de calidad de los elementos para el R.E.A.S.T. ....	64
Ilustración 5-18 Malla R.E.S.P.M. ....	65
Ilustración 5-19 Gráfica de calidad de los elementos para el reactor R.E.S.P.M. ....	66
Ilustración 5-20 Proceso de iteraciones del R.E.S.T. ....	67
Ilustración 5-21 Proceso de iteraciones del R.E.A.S.T. ....	67
Ilustración 5-22 Proceso de iteraciones del R.E.S.P.M. ....	67
Ilustración 6-1 Proceso de convergencia. ....	70
Ilustración 6-2 Planos de corte sobre los reactores. ....	71
Ilustración 6-3 Perfil de velocidad total máxima y promedio para el R.E.S.P. ....	74
Ilustración 6-4 Comparación de contornos de velocidad total R.E.S.P. ....	75
Ilustración 6-5 Comparación de líneas de corriente de velocidad total R.E.S.P. ....	76
Ilustración 6-6 Perfil de velocidad vertical promedio, R.E.S.P. ....	77
Ilustración 6-7 Perfil de velocidad vertical positiva, R.E.S.P. ....	78
Ilustración 6-8 Perfil de velocidad vertical máxima, R.E.S.P. ....	

79 Ilustración 6-9 Comparativa contorno y líneas de corriente de velocidad vertical, R.E.S.P. ....	80
Ilustración 6-10 Perfil de energía cinética de turbulencia promedio del R.E.S.P. ....	82
Ilustración 6-11 Perfil de energía cinética de turbulencia máxima del R.E.S.P. ....	83
Ilustración 6-12 Contorno de energía cinética de turbulencia del R.E.S.P.. ....	84
Ilustración 6-13 Modelos tridimensionales de los reactores. ....	86
Ilustración 6-14 Perfiles de velocidad total máxima, para caudal de operación. ....	86
Ilustración 6-15 Perfiles de velocidad total máxima, para caudal máximo. ....	87
Ilustración 6-16 Contornos longitudinales de velocidad total, para caudal de operación ...	87
Ilustración 6-17 Contornos transversales de velocidad total, para caudal de operación. ...	88
Ilustración 6-18 Perfiles de energía cinética de turbulencia máxima, para caudal de operación. ....	89
Ilustración 6-19 Perfiles de energía cinética de turbulencia máxima, para caudal máximo. ....	90
Ilustración 6-20 Perfiles de energía cinética de turbulencia promedio, para caudal de operación. ....	90
Ilustración 6-21 Contornos longitudinales de energía cinética de turbulencia, para caudal de operación. ....	91
Ilustración 6-22 Contornos transversales de energía cinética de turbulencia, para caudal de operación. ....	92
Ilustración 6-23 Perfil de velocidad total promedio, R.E.S.P.M. ....	94
Ilustración 6-24 Perfil de velocidad total máxima, R.E.S.P.M. ....	95
Ilustración 6-25 Comparativa de contorno y líneas de corriente de velocidad total, R.E.S.P.M. ....	96
Ilustración 6-26 Perfil de velocidad vertical promedio, R.E.S.P.M. ....	97
Ilustración 6-27 Perfil de velocidad vertical máxima, R.E.S.P.M. ....	98
Ilustración 6-28 Comparativa de contorno y líneas de corriente de velocidad vertical, R.E.S.P.M. ....	99
Ilustración 6-29 Perfil de energía cinética de turbulencia promedio, R.E.S.P.M. ....	101
Ilustración 6-30 Perfil de energía cinética de turbulencia máxima, R.E.S.P.M. ....	102
Ilustración 6-31 Contorno de energía cinética de turbulencia, R.E.S.P.M. ....	103
Ilustración 6-32 Modelos tridimensionales de los reactores. ....	104

Ilustración 6-33 Perfiles de velocidad total máxima, para caudal de operación. ....	105
Ilustración 6-34 Contornos longitudinales de velocidad total, para caudal de operación.	106
Ilustración 6-35 Contornos transversales de velocidad total, para caudal de operación.	106
Ilustración 6-36 Perfiles de energía cinética de turbulencia máxima, para caudal de operación. ....	108
Ilustración 6-37 Perfiles de energía cinética de turbulencia promedio, para caudal de operación. ....	108
Ilustración 6-38 Contornos longitudinales de energía cinética de turbulencia, para caudal de operación. ....	109
Ilustración 6-39 Contornos transversales de energía cinética de turbulencia, para caudal de operación. ....	110
Ilustración 6-40 Contornos para gradientes de velocidad. ....	112
Ilustración 6-41 Gradiente promedio de velocidad para R.E.S.P. y R.E.S.P.M. ....	114
Ilustración 6-42 Gradiente de velocidad promedio para R.E.S.P. y R.E.S.P.M. ....	114
Ilustración 6-43 Número de Reynolds para R.E.S.P. y R.E.S.P.M. ....	114
Ilustración A-1 Perfil de velocidad total promedio, R.E.S.T. ....	118
Ilustración A-2 Perfil de velocidad total máxima, R.E.S.T. ....	119

Ilustración A-3 Comparativa de contorno y líneas de corriente de velocidad total, R.E.S.T. ....	120
Ilustración A-4 Perfil de velocidad vertical promedio, R.E.S.T. ....	121
Ilustración A-5 Perfil de velocidad vertical máxima, R.E.S.T. ....	122
Ilustración A-6 Comparativa contorno y líneas de corriente de velocidad vertical, R.E.S.T. ....	123
Ilustración A-7 Perfil de energía cinética de turbulencia promedio, R.E.S.T. ....	125
Ilustración A-8 Perfil de energía cinética de turbulencia máxima, R.E.S.T. ....	125
Ilustración A-9 Contorno de energía cinética de turbulencia, R.E.S.T. ....	126
Ilustración B-1 Perfil de velocidad total promedio, R.E.A.S.T. ....	128
Ilustración B-2 Perfil de velocidad total máxima, R.E.A.S.T. ....	129
Ilustración B-3 Comparativa de contorno y líneas de corriente de velocidad total, R.E.A.S.T. ....	130
Ilustración B-4 Perfil de velocidad vertical promedio, R.E.A.S.T. ....	131
Ilustración B-5 Perfil de velocidad vertical máxima, R.E.A.S.T. ....	132

Ilustración B-6 Comparativa contorno y líneas de corriente de velocidad vertical, R.E.A.S.T. ....	133
Ilustración B-7 Perfil de energía cinética de turbulencia promedio, R.E.A.S.T. ....	135
Ilustración B-8 Perfil de energía cinética de turbulencia máxima, R.E.A.S.T. ....	135
Ilustración B-9 Contorno de energía cinética de turbulencia, R.E.A.S.T. ....	136
Ilustración C-1 Perfiles de velocidad total, para caudal de operación. ....	137
Ilustración C-2 Perfiles de velocidad total máxima, para caudal máximo. ....	137
Ilustración D-1 Perfiles de velocidad total, para caudal de operación. ....	139
Ilustración D-2 Perfiles de velocidad total, para caudal máximo. ....	139
Ilustración E-1 Geometría Mezclador Estático Interno.. ....	141



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Límites permisibles para contaminantes básicos. ....	14
Tabla 2-2 Límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales. ....	15
Tabla 2-3 Límites permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas. ....	15
Tabla 5-1 Valores características de la malla del reactor prototipo .....	56
Tabla 5-2 Datos de entrada y convergencia del reactor prototipo .....	58
Tabla 5-3 Valores de la malla del R.E.S.T. ....	62
Tabla 5-4 Valores de la malla del R.E.A.S.T. ....	64
Tabla 5-5 Valores de la malla del R.E.S.P.M. ....	65
Tabla 5-6 Datos de entrada para los reactores modificados. ....	66
Tabla 6-1 Valores de velocidad total promedio y máxima de todos los caudales de entrada. ....	73
Tabla 6-2 Velocidad vertical promedio a diferentes alturas, R.E.S.P. ....	77
Tabla 6-3 Valores de velocidad vertical positiva a diferentes alturas, R.E.S.P. ....	78
Tabla 6-4 Valores de velocidad vertical máxima a diferentes alturas, R.E.S.P. ....	79
Tabla 6-5 Turbulencia promedio a diferentes alturas, R.E.S.P. ....	81
Tabla 6-6 Turbulencia máxima a diferentes alturas, R.E.S.P. ....	82
Tabla 6-7 Velocidad total promedio, R.E.S.P.M. ....	94
Tabla 6-8 Velocidad total máxima, R.E.S.P.M. ....	94
Tabla 6-9 Velocidad vertical promedio, R.E.S.P.M. ....	97
Tabla 6-10 Velocidad vertical máxima, R.E.S.P.M. ....	97
Tabla 6-11 Turbulencia promedio diferentes alturas, R.E.S.P.M. ....	100
Tabla 6-12 Turbulencia máxima a diferentes alturas, R.E.S.P.M. ....	101
Tabla 6-13 Gradientes de velocidad y número de Reynolds R.E.S.P. ....	112
Tabla 6-14 Gradientes de velocidad y número de Reynolds R.E.S.P.M. ....	113
Tabla A-1 Velocidad total promedio, R.E.S.T. ....	117
Tabla A-2 Velocidad total máxima, R.E.S.T. ....	118
Tabla A-3 Velocidad vertical promedio, R.E.S.T. ....	121
Tabla A-4 Velocidad vertical máxima, R.E.S.T. ....	122
Tabla A-5 Turbulencia promedio a diferentes alturas, R.E.S.T. ....	124
Tabla A-6 Turbulencia máxima a diferentes alturas, R.E.S.T. ....	124

Tabla B-1 Velocidad total promedio, R.E.A.S.T. ....	127
Tabla B-2 Velocidad total máxima, R.E.A.S.T. . . . .	128
Tabla B-3 Velocidad vertical promedio, R.E.A.S.T.....	131
Tabla B-4 Velocidad vertical máxima, R.E.A.S.T . . . . .	131
Tabla B-5 Turbulencia promedio a diferentes alturas, R.E.A.S.T..	134
Tabla B-6 Turbulencia máxima a diferentes alturas, R.E.A.S.T. ....	134



## LISTA DE ACRÓNIMOS

CFD	Computational Fluid Dynamics [Dinámica de Fluidos Computacional]
NASA	National Aeronautic and Space Administration [Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio]
RANS	Reynolds – Avaraged Navier Stokes
CAD	Computer – Aided Design [Diseño asistido por computadora]
EC	Electrocoagulación
AR	Aguas Residuales
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
COT	Carbón Orgánico Total
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
R.E.S.P.	Reactor de Entrada Salida Perpendicular
R.E.S.T.	Reactor de Entrada Salida Tangencial
R.E.A.S.T.	Reactor de Entrada en Arco Salida Tangencial
R.E.S.P.M.	Reactor de Entrada Salida Perpendicular con Mezclador Estático Interno





## LISTA DE SÍMBOLOS Y UNIDADES

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
D	Dimensiones del reactor	mm,cm
<i>u</i>	Velocidad en dirección x	mm/seg
<i>v</i>	Velocidad en dirección y	mm/seg
<i>w</i>	Velocidad en dirección z	mm/seg
<i>k</i>	Energía cinética de Turbulencia	mm <sup>2</sup> /seg <sup>2</sup>
Q	Caudales de operación	ml/min, lps
	Flujo másico	Kg/seg
<i>t</i>	Tiempo	Seg
m	Viscosidad dinámica	Kg/ms
<i>ρ</i>	Densidad del agua	Kg/m <sup>3</sup>
G	Gradiente de Velocidad	s <sup>-1</sup>
V	Volumen del reactor	l
A	Área	cm <sup>2</sup>



# 1. CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

En años recientes, el tratamiento de aguas residuales (AR) se ha convertido en un tema de vital importancia a nivel mundial. La preservación del agua y la protección del medio ambiente son problemáticas emergentes que deben ser atendidas necesariamente. Ante una creciente y constante contaminación, surge la necesidad de aplicar los métodos y/o tecnologías actuales del tratamiento de AR, ya sea para la retención de un número mayor de contaminantes para dar una mejor calidad al agua tratada.

Actualmente, existen diversos métodos para el tratamiento de AR como los biológicos y químicos. Derivándose de los últimos, los procesos electroquímicos son considerados reacciones redox, donde la energía liberada por alguna reacción espontánea es transformada en electricidad, o la electricidad es utilizada para inducir una reacción química (Chan, 2010).

En la electroquímica se encuentran diversos métodos de tratamiento de AR como electrocoagulación (EC), electroflotación, y electrooxidación. La EC es un fenómeno en el cual las partículas suspendidas son neutralizadas por medio de iones que las aglomeran y debido a su peso caen para posteriormente sedimentarse. El tratamiento con EC tiene muchas aplicaciones debido a las ventajas que ofrece: brinda agua de calidad, requiere de un equipo simple para ser utilizada, proporciona una cantidad menor de sólidos disueltos comparado a otros tratamientos, remueve partículas coloidales pequeñas, entre otras (Mollah & Robert Schennach, 2001).

La EC hace uso de reactores de flujo pistón y reactor continuo de mezcla completa, son en su forma más simple, una celda electrolítica formada con un ánodo y un

cátodo, los cuáles son los responsables de llevar a cabo todo el proceso de EC, cada uno aportando las características especiales de su funcionalidad y operación. Para comprender el problema, es necesario conocer el concepto de los reactores utilizados en la EC, conocer su definición y las características de cada uno.

El reactor de mezcla completa, se caracteriza por presentar una concentración uniforme en todo su volumen. Puede ser cerrado con funcionamiento en régimen no estacionario o transitorio y el rendimiento depende del tiempo, también puede ser abierto con un caudal volumétrico de entrada y salida idénticos (*Ilustración 1-1*). La concentración a la salida de este reactor es igual a la concentración uniforme dentro del reactor, excepto en la cercanía de los electrodos. El tiempo durante el que los elementos de los fluidos residen dentro, puede tomar cualquier valor, por lo tanto, existe una distribución de tiempo de residencia en torno a un tiempo de residencia medio (Coeuret, 1992).

Para el reactor de flujo pistón, los elementos fluidos se desplazan a velocidad uniforme, además de permanecer el mismo tiempo en el interior del reactor (*Ilustración 1-2*). Cabe mencionar que la concentración del elemento transformado varía de forma continua entre la entrada y salida (Coeuret, 1992).

Es importante mencionar que los reactores abiertos o “continuos” se alimentan y se vacían sin interrupción, éstos reactores funcionan en régimen no estacionario con concentraciones constantes con respecto al tiempo, o en régimen estacionario con concentraciones constantes con respecto al tiempo.

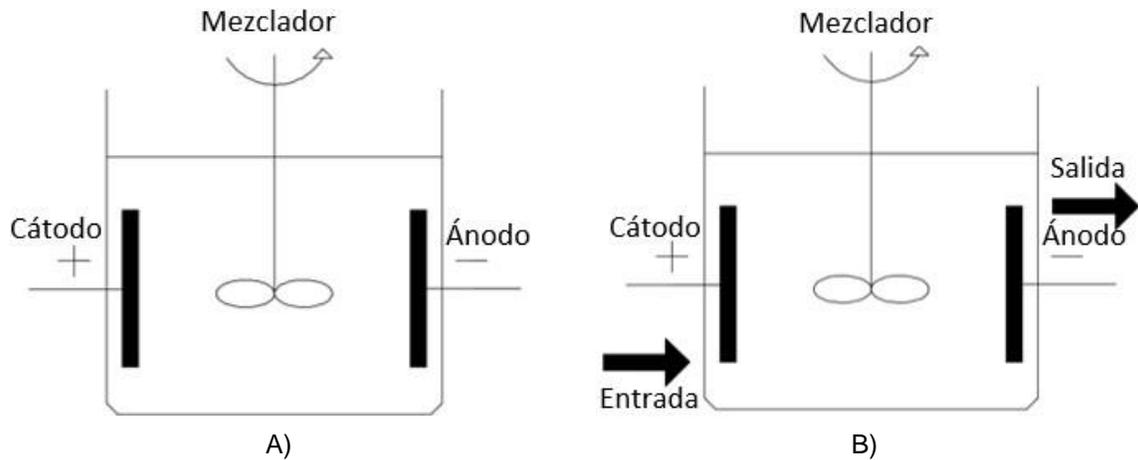


Ilustración 1-1 Reactores de mezcla completa. A) Reactor de mezcla completa cerrado; B) Reactor de mezcla completa abierto.

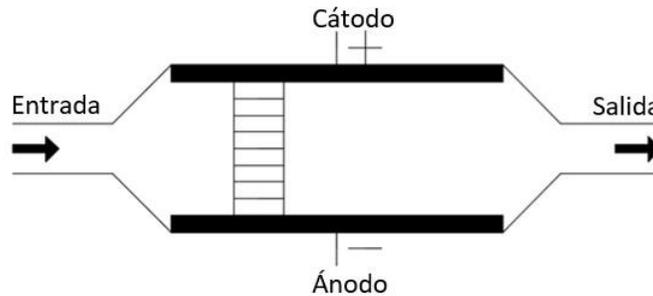


Ilustración 1-2 Reactor de flujo pistón

El proceso de EC utiliza una celda electroquímica para el tratamiento de agua, los ánodos de aluminio o hierro utilizados se corroen para liberar el “catión coagulante activo”. El suministro del coagulante y su naturaleza influyen en los procesos de EC y la trayectoria de eliminación. El catión de aluminio tiene diferentes formas de interactuar con los contaminantes: los hidroliza o precipita. El funcionamiento del cátodo en los reactores consiste en que el catión metálico reacciona con iones de hidróxido, que funcionan como un coagulante con las partículas de contaminante formando agregados más grandes que se sedimentan (Holt, 2002).

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en inglés) ha sido utilizada recientemente para proyectar procesos hidrodinámicos en reactores

electroquímicos en el área industrial (Frías Ferrer, 2004), además se han realizado distintos diseños para el tratamiento de aguas residuales dependiendo de la naturaleza del contaminante a tratar (Holt, 2002).

La presente investigación, se enfoca en simular y analizar la hidrodinámica de un reactor de mezcla completa para identificar los patrones de flujo que se presentan debido a su geometría y componentes, de esta manera se propondrán alternativas de mejora, para esto, se propone aplicar programas de diseño basados en la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Las ventajas de utilizar CFD son diversas, una de las más importantes es llevar a cabo simulaciones en diversos escenarios con diferentes geometrías de una forma práctica, teniendo la opción de modificar sus componentes y propiedades de inicio. Así se podrán proponer relaciones entre la ubicación de la entrada y salida en el reactor que garantice el flujo idóneo que promueva la mezcla de partículas.

La presente investigación está estructurada de la siguiente manera: en el capítulo 1 se describe los elementos fundamentales del trabajo de investigación, necesarios para el entendimiento del mismo; introducción, antecedentes, justificación, hipótesis y objetivos.

En el capítulo 2 se describen las generalidades de las aguas residuales, así como sus características principales, procesos de tratamiento y la normatividad aplicada.

En el capítulo 3 se muestran algunos de los tratamientos electroquímicos en aguas residuales, especialmente en la EC; posteriormente se explican los reactores de flujo continuo; se mencionan antecedentes del uso de los reactores electroquímicos en áreas similares; y por último, se mencionan los balances microscópicos y macroscópicos que intervienen en la funcionalidad de los reactores.

En el capítulo 4 se comentan las generalidades y antecedentes del CFD, se describen los principales modelos y ecuaciones de masa, energía y momentum, así como el procedimiento y etapas generales para llevar a cabo la simulación por CFD. En el capítulo 5 se aborda la metodología que se siguió para la realización de la simulación del reactor original y tres reactores modificados. En este apartado se muestran las diferentes geometrías y la ubicación de sus elementos, así mismo, se presentan las mallas de éstos reactores y la calidad que tienen.

En el capítulo 6 se presentan gráficas comparativas de los resultados entre los cuatro reactores para observar los valores de velocidad, velocidad vertical y energía cinética de turbulencia, de esta forma se presentan los resultados finales globales, los cuales son retomados en el capítulo 7 para dar las conclusiones finales del trabajo.

## **1.1 Planteamiento del problema**

Los reactores electroquímicos de mezcla completa son una herramienta que garantiza el tratamiento de agua residual. La problemática actual en estos reactores es conocer las circunstancias hidrodinámicas que ocurren dentro; es una tarea complicada, no solo por el tiempo que esto lleva, sino también por la utilización de equipos especiales para medición de flujo, aunado la dificultad en la solución de ecuaciones complejas para lograr conocer los resultados requeridos.

Debido a lo anterior, se puede hacer uso de la herramienta Dinámica de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en ingles), ya que permite analizar y visualizar el comportamiento de un flujo en 3D, resultando ser una herramienta útil y novedosa para la resolución de elementos hidrodinámicos en los fluidos, además de poseer la capacidad de simular múltiples escenarios.

Esta herramienta de trabajo se rige fundamentalmente por las ecuaciones de dinámica de fluidos: continuidad, momento y energía; las cuáles están basadas en

tres principios físicos fundamentales en los que se basa la CFD: conservación de la masa, segunda ley de Newton y la conservación de la energía (Wendt, 2009). Es decir que, por medio del uso de éstos principios es posible predecir o suponer lo que sucede dentro de un reactor de mezcla completa, garantizando que el modelo a simular sea muy representativo de acuerdo al fenómeno de estudio. De esta manera evitar la construcción de reactores que no cumplan con lo requerido o que tengan que sufrir una modificación para tener los resultados deseados.

### **1.2 Justificación**

En este trabajo se pretende conocer la eficiencia de un reactor electroquímico de mezcla completa con electrodos de magnesio, mediante la adecuación de la geometría, para aumentar los valores de energía cinética de turbulencia; mientras se realiza el procesos de EC. Comenzando con la geometría de un reactor cilíndrico con entrada y salida perpendicular, modificando la geometría para identificar las diferencias entre la velocidad, velocidad vertical y energía cinética de turbulencia que se presentaran en la simulación, y así conocer la propuesta geométrica más apta; es decir aquella que realice una mayor mezcla de partículas, que a su vez propicie la coagulación de éstas.

En este trabajo se usa la herramienta de CFD, específicamente del programa ANSYS FLENT 19.1 para realizar simulaciones del comportamiento del flujo en 3D y obtener el comportamiento óptimo del flujo dentro del reactor ante diferentes relaciones de caudales y ubicación de entradas y salidas. Con la simulación se conocerán las características de velocidad, velocidad vertical y energía cinética de turbulencia presentes en el reactor, cuya finalidad es conocer la capacidad de mezcla, simulando los fenómenos físicos que se presentan dentro de éstos reactores, además, con esta metodología se conocerá que tan factible será la construcción de un prototipo de reactor y que podrá ser mejorado en la estructura del reactor para una mayor eficiencia antes de ser construido.

La modelación de reactores en CFD abre las puertas a estudio más preciso de las características hidráulicas, no solo de los reactores de mezcla completa, sino también de los reactores de flujo pistón. La aplicación de CFD beneficia a las investigaciones que buscan soluciones en el diseño de reactores electroquímicos empleados en el tratamiento de aguas residuales, municipales o industriales, ya sea para la determinación de la geometría, caudal y tiempo de retención óptimos.

### **1.3 Hipótesis**

La hidrodinámica dentro del reactor electroquímico de mezcla completa es afectada por la ubicación y geometría de la entrada y salida, así como por la colocación de un mezclador estático, influyendo en los valores de energía cinética de turbulencia y por lo tanto en la calidad de la mezcla.

### **1.4 Objetivo general**

Emplear la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en la evaluación hidrodinámica de un reactor cilíndrico electroquímico de mezcla completa; considerando la geometría cilíndrica del reactor, sus elementos internos, la relación entre ubicación y geometría de la entrada y salida, así como la colocación de un mezclador estático, para identificar la opción que proporcione las situaciones óptimas que garanticen los valores más altos de energía cinética de turbulencia dentro del reactor.

### **1.5 Objetivos específicos**

1. Identificar los componentes que integran un reactor electroquímico de mezcla completa, así como sus condiciones de entrada y salida, para ser simulado en ANSYS-FLUENT.

2. Realizar la geometría del reactor en 3D, en un AutoCAD colocando cada una de las partes que lo integran.
3. Simular y analizar mediante ANSYS-FLUENT el modelo del reactor, para conocer los resultados de velocidad, velocidad vertical y energía cinética de turbulencia.
4. Realizar cambios en la geometría y ubicación de la entrada y salida del flujo en el reactor y simular con ANSYS-FLUENT los distintos escenarios de operación del reactor electroquímico para identificar y visualizar los patrones de flujos que fueron generados por las modificaciones a la geometría.
5. Realizar una comparación entre los resultados del reactor original y las tres modificaciones, para conocer el diseño más eficiente del reactor.
6. Con base en los análisis realizados dar recomendaciones respecto a la geometría ideal para los reactores electroquímicos de mezcla completa.

Para el cumplimiento de los objetivos se identificaron las variables que intervienen directa o indirectamente en el trabajo. Para esto fue necesario conocer sobre los procesos de tratamiento en aguas residuales, las bases de los tratamientos electroquímicos, los antecedentes de los reactores electroquímicos y las técnicas de modelación de flujos mediante ANSYS-FLUENT 19.1.



## **2. CAPÍTULO 2 AGUAS RESIDUALES**

El agua residual, es principalmente el agua restante que deshecha una comunidad una vez ya empleada para los diversos usos que haya sido requerida. Las aguas residuales son la combinación de los residuos líquidos o aguas portadoras de residuos que proceden de diversas fuentes como viviendas, instituciones públicas, establecimientos comerciales, zonas industriales, entre otros. También se deben de considerar eventualmente el flujo de las aguas subterráneas, superficiales y pluviales (Metcalf & Eddy, Inc., 2004).

Cuando se habla de tratamiento de aguas residuales se tienen dos objetivos principales: proteger el medioambiente y la preservación del recurso del agua dulce en el planeta (Bukhari, 2007). Recientemente, ha surgido una necesidad mayor de hacer frente al problema de la escasez del agua a causa del crecimiento de la población y la urbanización que poco a poco va disminuyendo las reservas de este líquido. Cabe mencionar que se ha buscado combatir también a este problema por medio de la aplicación de normas oficiales, las cuales regulan diferentes aspectos relacionados con el sector hídrico. Por ello el agua residual tratada es usada actualmente, en muchas ciudades del mundo, como una fuente secundaria de uso para el riego agrícola, actividades industriales, recarga de mantos acuíferos, usos recreacionales entre otras actividades (Metcalf & Eddy, Inc., 2004).

En México, el agua ha sido reconocida como un asunto estratégico y de emergente seguridad nacional. Con el tiempo se ha convertido en una parte central de las políticas ambientales y económicas actuales, así como un factor clave del desarrollo nacional. La iniciativa es lograr que los cuerpos de agua superficiales y subterráneos del país recuperen su salud, aporten los caudales para satisfacer las necesidades de la población y así se contribuya al crecimiento económico y calidad

de vida de la población (BID, 2013). Para esto es necesario que, para cumplir éstas expectativas, se tenga una estrategia en el uso de las tecnologías para el tratamiento de aguas residuales, destacando la modelación de sistemas de tratamiento mediante sistemas computacionales.

## **2.1 Características de las aguas residuales.**

Las aguas residuales (AR), poseen diversas características, divididas en tres grupos: físicas, químicas y biológicas (Metcalf & Eddy, Inc., 2004).

Las propiedades físicas son: color, olor, temperatura, densidad y turbiedad. El color es resultado de los diversos contaminantes domésticos e industriales y/o a la degradación natural de materia orgánica. Estos contaminantes dan el olor característico de las aguas residuales, y son producidos debido a los gases liberados durante el proceso de descomposición. La densidad en las aguas residuales, se define como su masa por unidad de volumen y es una característica física importante, la formación potencial de corrientes de densidad de fangos de sedimentación depende de esta propiedad. La temperatura de las AR suele ser más elevada a la temperatura normal del agua, debido a la incorporación de agua caliente procedente de las casas y de los diferentes usos industriales. Por último, la turbidez se utiliza para indicar la calidad de aguas vertidas, la medición de esta se lleva a cabo mediante la comparación entre la intensidad de la luz dispersada en la muestra y la intensidad registrada en una suspensión de referencia en las mismas condiciones (Metcalf & Eddy, Inc., 2004).

Algunos constituyentes biológicos presentes en las aguas residuales son; animales, plantas, microorganismos (eucariotas, eubacterias y arqueobacterias), dentro de los organismos eucariotas encontramos; algas, hongos, protozoos, etc. En las eubacterias se encuentran las bacterias que se pueden clasificar en cuatro grupos; esferoidales, bastón, bastón curvado y filamentosas.

Los organismos específicos empleados como indicadores de la contaminación humana son; bacterias coliformes, bacterias coliformes fecales, estreptococos, enterococos, entre otros. Por ello, se considera que la presencia de coliformes es un indicador de la posible presencia de organismos patógenos, y la ausencia es un indicador de que las aguas están libres de organismos que puedan causar enfermedades. Algunos procedimientos empleados en la medición de organismos coliformes son la fermentación en tubo simple y filtro de membrana.

Las características químicas del agua residual, se basan en las proteínas, hidratos de carbono, grasas, agentes tensos activos, compuestos orgánicos volátiles y pesticidas. La materia orgánica presente en las AR se mide mediante: la demanda química de oxígeno (DQO), la cual representa una medida de toda la materia orgánica que se encuentra en disolución o suspendida que puede ser químicamente oxidada (Chen, 2003). La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es definida como la cantidad de oxígeno que es utilizado por los microorganismos no fotosintéticos a una temperatura de 20°C, para que se puedan metabolizar los compuestos orgánicos degradables biológicamente. El carbón orgánico total (COT) indica la cantidad de carbono orgánico presente en una muestra. Cabe mencionar, la existencia de algunos componentes y elementos químicos inorgánicos dentro de las aguas residuales y naturales como lo son; la concentración de ion de hidrógeno, concentración de cloruros, alcalinidad, nitrógeno, fósforo, azufre, gases, metales pesados, metano, etc.

### **2.2 Procesos de tratamiento.**

La creciente problemática de las aguas residuales ha llevado a la investigación de nuevas tecnologías e innovaciones para el tratamiento de aguas residuales de una manera eficiente y rentable. Los procesos biológicos son considerados el método principal de cualquier tratamiento de agua residual municipal. Cabe mencionar que

los procesos biológicos dependen, de factores como es la concentración de DBO, DQO, valor de pH, temperatura (Bukhari, 2007).

Previamente al tratamiento de las aguas residuales municipales, se considera pertinente el pretratamiento con el fin de remover, reducir o modificar componentes del agua como sólidos gruesos y flotantes, materiales inertes rigurosos o grasas que puedan afectar al proceso de purificación del agua. Asimismo, con el fin de proteger al equipo de bombeo y equipos electromecánicos y evitar daños o atascamientos de válvulas.

En la actualidad existen procesos convencionales y no convencionales para el tratamiento de aguas residuales, del primer proceso mencionado se derivan los *procesos convencionales biológicos*, los cuales están integrados por métodos aerobios (fangos activados, lagunas aireadas, digestión aerobia, filtros percoladores), anaerobios (desnitrificación con cultivo en suspensión y la desnitrificación de película fija), anóxicos (digestión anaerobia, filtro anaerobio, y lecho expandido) y tratamientos facultativos (lagunas). El propósito de estos procesos biológicos es la eliminación de la materia orgánica carbonosa del agua residual, medida como DBO, COT o DQO; la nitrificación; la desnitrificación; la eliminación de fósforo; y la estabilización de fangos (CONAGUA , 2016).

Un tren de tratamiento de AR convencional en una planta tratadora municipal consta de diferentes procesos. Un tratamiento primario el cual puede estar compuesto de estructuras como el cribado y desarenado, de la floculación y coagulación, y/o sedimentación primaria. El tratamiento secundario que puede constituirse por; lodos activados, filtro percoladores, biodiscos, reactores RAFA, sedimentación secundaria y/o filtración. La desinfección y manejo de lodos suelen considerarse como tratamientos terciarios. La aplicación del agua tratada depende de la localidad, la calidad de agua que recibe y el fin para el cual esté destinado (Chávez, 2018).

Los tratamientos fisicoquímicos para AR son considerados tratamientos no convencionales debido a que su uso es menos común a los tratamientos anteriormente mencionados. Los tratamientos son aditivos debido a que, para la remoción de contaminantes es necesario la adición de otra sustancia, lo que incrementa la cantidad de sólidos disueltos.

Los procesos fisicoquímicos son utilizados regularmente para la remoción de metales pesados, elementos orgánicos, nutrientes y para la desinfección del efluente antes de su descarga. Los principales procesos en estos tratamientos son coagulación, floculación, precipitación, desinfección, oxidación avanzada, intercambio iónico y neutralización química. (CONAGUA , 2016).

### **2.3 Normatividad de México**

En México se cuentan con normas que regulan diversos aspectos hídricos, referente al tratamiento de aguas residuales, se consideran las normas oficiales mexicanas

NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996 y NOM-003SEMARNAT-1997 como normas reguladoras de límites permisibles de contaminantes en aguas residuales.

La NOM-001-SEMARNAT-1996, establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Esta norma tiene el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos, y es de observancia para los responsables de dichas descargas, los límites permisibles para contaminantes básicos se presentan en la *Tabla 2-1*.

Los contaminantes básicos que se encuentran en las aguas residuales son aquellos compuestos que se presentan en las descargas de aguas residuales y pueden ser removidos mediante tratamientos convencionales. En lo que corresponde a la

normativa solo se consideran: grasas, aceites, materia flotante, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno total, fósforo total, pH, temperatura, metales pesados (arsénico, cadmio, cianuro, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo y zinc), organismos patógenos (huevos de helmito y coliformes fecales. Los límites permisibles son variables de acuerdo al cuerpo receptor y al uso destinado de esta agua.

Tabla 2-1 Límites permisibles para contaminantes básicos. (NOM-001-SEMARNAT-1996)

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES BÁSICOS																
PARÁMETROS  (miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	RÍOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS COSTERAS					
	Uso en riego agrícola (A)		Uso Público Urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		Estuarios (B)	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Temperatura °C (1)	N.A.	N.A.	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Grasas y Aceites (2)	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25
Materia Flotante (3)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
Sólidos Sedimentables (ml/l)	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Sólidos Suspendidos Totales	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	150	200	75	125	75	125
Demanda Bioquímica de Oxígeno <sub>5</sub>	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	150	200	75	150	75	150
Nitrógeno Total	40	60	40	60	15	25	40	60	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	15	25
Fósforo Total	20	30	20	30	5	10	20	30	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	5	10

Los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano municipal se encuentran en la NOM-002-SEMARNAT-1996 presentados en la *Tabla 2-2*.

Tabla 2-2 Límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales. (NOM-002SEMARNAT-1996)

## CAPÍTULO 2: AGUAS RESIDUALES

PARAMETROS (miligramos por litro, excepto cuando se especifique otra)	PROMEDIO MENSUAL	PROMEDIO DIARIO	INSTANTÁNEO
Grasas y aceites	50	75	100
Sólidos sedimentables (mililitros por litro)	5	7.5	10
Arsénico total	0.5	0.75	1
Cadmio total	0.5	0.75	1
Cianuro total	1	1.5	2
Cobre total	10	15	20
Cromo hexavalente	0.5	0.75	1
Mercurio total	0.01	0.015	0.02
Níquel total	4	6	8
Plomo total	1	1.5	2
Zinc total	6	9	12

La NOM-003-SMARNAT-1997, establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas (*Tabla 2-3*) que se reúsen en servicios al público, con el fin de proteger la salud del medio ambiente y de la población. Esta norma considera además las concentraciones máximas de metales pesados señaladas en la NOM-001-SEMARNAT-1996.

*Tabla 2-3 Límites permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas. (NOM-003-SEMARNAT-1997)*

TIPO DE REUSO	PROMEDIO MENSUAL				
	Coliformes fecales NMP/100 ml	Huevos de helminto (h/l)	Grasas y aceites mg/l	DBO <sub>5</sub> mg/l	SST mg/l
SERVICIOS AL PÚBLICO CON CONTACTO DIRECTO	240	≥ 1	15	20	20
SERVICIOS AL PÚBLICO CON CONTACTO INDIRECTO U OCASIONAL	1,000	≤ 5	15	30	30



## 3. CAPÍTULO 3 REACTORES ELECTROQUÍMICOS

En el siguiente apartado se presentan las características y procesos de los tratamientos electroquímicos más comunes, principalmente el tratamiento de EC, el cuál fue utilizado en la investigación realizada por (Carmona, 2019). También se abordarán las condiciones generales para los reactores de flujo continuo, con el fin de comprender la importancia de éstos dentro del tratamiento electroquímico.

### 3.1 Tratamientos electroquímicos.

Las tecnologías electroquímicas pueden ser el paso indispensable en el tratamiento de aguas residuales que contienen contaminantes refractarios, es decir contaminantes con una degradación biológica muy lenta (fenoles, surfactantes, pesticidas), tendiendo a resistir los tratamientos convencionales. Una de las aplicaciones de la electroquímica es la recuperación de metales la cual se ha practicado en la electrometalurgia desde hace mucho tiempo. Otro uso que se le ha dado a la electroquímica en los últimos dos siglos, es en el almacenamiento de energía, síntesis química, producción de metales, tratamientos de superficies, etc. (Chen, 2003).

Las tecnologías convencionales con las que se disponen actualmente son costosas y en algunas ocasiones éstas tecnologías llegan a tener limitantes para el tratamiento que se quiere tener en las aguas residuales. La introducción de las tecnologías electroquímicas para tratar aguas residuales ha sido de gran influencia, las cuáles han estado reemplazando los tratamientos convencionales. Cabe mencionar que en los últimos años esta tecnología se ha desarrollado con diferentes métodos como: electrooxidación, EC, electroflotación, etc. (Choundary & Mathur, 2017).

La EC utiliza la electricidad para eliminar contaminantes en el agua que se encuentran suspendidos, disueltos o emulsificados. Consiste en colocar corriente eléctrica en el agua residual a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, dentro de los más comúnmente utilizados están el hierro y el aluminio. La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca las reacciones químicas que desestabilizan las formas en las que los contaminantes se encuentran presentes (Arango Ruíz, 2005).

La EC se puede definir como un proceso electroquímico en el que los compuestos procedentes de la disolución de un ánodo, agrupa la materia coloidal existente en un agua residual, posibilitando su separación del agua mediante técnicas convencionales de separación sólido-líquido. El material anódico normalmente utilizado son las planchas de hierro o aluminio. Al aplicar una diferencia de potencial a la celda, se consigue la generación de iones en disolución (Martínez, 2008). Como consecuencia, y al igual que en procesos de coagulación, se obtienen; hidróxidos insolubles sobre los que quedan retenidos los contaminantes y/o hidroxocomplejos catiónicos o aniónicos, que desestabilizan las fuerzas de repulsión.

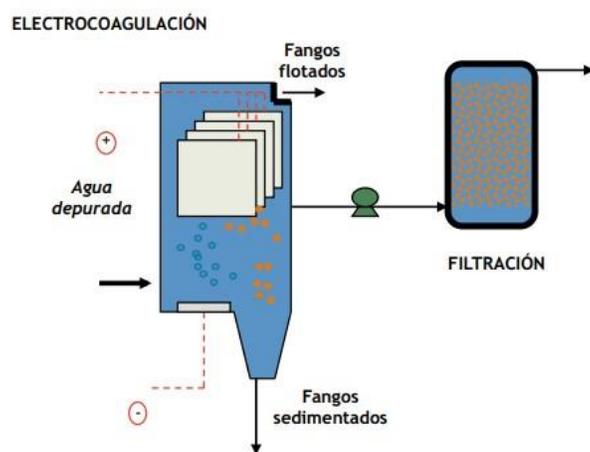


Ilustración 3-1 Esquema de un proceso de electrocoagulación. (Barrera Díaz, 2014)

La electroflotación se define como un proceso en el que los contaminantes flotan en la superficie de un cuerpo de agua debido a las pequeñas burbujas de gases de

hidrógeno y oxígeno generados por la electrólisis del agua. Este proceso crea burbujas extremadamente pequeñas, el tamaño promedio de la burbuja convencional es de 0.9 a 2.0 mm. (Raju & Khangaonkar, 1984).

El rendimiento del proceso de electroflotación se refleja en la eficiencia de eliminación de los contaminantes y del consumo de energía. La eficiencia de remoción depende principalmente del tamaño de formación de la burbuja. El consumo de energía se relaciona con el diseño de la celda, los materiales del electrodo y las condiciones de funcionamiento como la densidad de corriente y la conductividad (Fukui & Yuu, 1985).

La electrooxidación es una tecnología concebida tanto para la oxidación electroquímica en el tratamiento de efluentes residuales con carga orgánica, como para la electrosíntesis. Como técnica para el tratamiento de aguas, la electrooxidación se enmarca dentro del grupo de los procesos de oxidación avanzada, ya que es posible generar radicales hidroxilos bajo ciertas condiciones de operación y con el uso de ciertos electrodos, oxidando la materia orgánica hasta dióxido de carbono (Barrera Díaz, 2014).

Durante las últimas dos décadas, la investigación en los procesos electroquímicos se ha centrado en la eficiencia, oxidando varios contaminantes en diferentes electrodos, mejora de la actividad electrocatalítica y electroquímica; así como en la estabilidad de los materiales del electrodo e investigación de factores que afectan el desempeño del proceso (Azzam & Y. Tahboub, 1999).

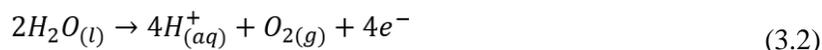
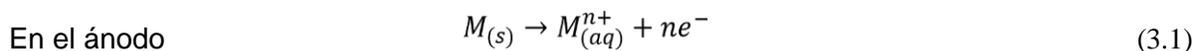
### **3.2 Electrocoagulación**

La EC es un método que se encuentra dentro de los tratamientos electroquímicos. La EC se define como el proceso que involucra mecanismos químicos y físicos que funcionan simultáneamente para eliminar los contaminantes de las aguas residuales. Para ellos se utilizan electrodos reactivos, como hierro o aluminio, los

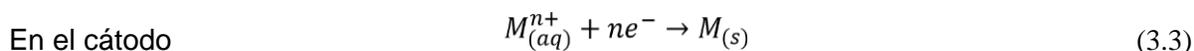
cuáles producen iones metálicos mismos que provocan la eliminación de sólidos suspendidos. El proceso de EC ha demostrado tener potencial en el tratamiento de aguas residuales textiles, urbanas y aguas grises para remover metales pesados (Vlyssides, et al., 2000; Gurses, et al., 2002; Adhoun, et al., 2004).

El proceso de EC tiene tres etapas: A) formación de coagulantes por oxidación electrolítica; B) Desestabilización de los contaminantes y suspensión de las partículas; C) Incorporación de las fases desestabilizadas para formar flóculos (Mollah & Robert Schennach, 2001).

Las reacciones electroquímicas que se llevan a cabo en el electrodo de material M, pueden resumirse como sigue: la oxidación del material anódico (ecuación 3.1 y 3.2).



La reducción del agua a hidrógeno gas y a iones hidroxilo en el cátodo (ecuaciones 3.3 y 3.4) (Mollah, et al., 2004).



Dónde: M es el material del ánodo y n es el número de electrones involucrados en la reacción de oxidación/reducción. Algunos materiales utilizados como electrodos son el Al y Fe, generando iones metálicos solubles en el ánodo, reaccionando con los iones hidróxido; los cuales se forman en el cátodo (ecuación 3.5).



Algunas ventajas de la EC, son las siguientes: incluye una mínima cantidad de reactivos, baja producción de fangos, efectiva eliminación de materia orgánica y

compuestos refractarios, incremento del pH del agua favoreciendo la decantación de hidróxidos metálicos, alta eficiencia con corrientes eléctricas y tiempos de tratamiento aplicados bajos, efectividad con aguas poco cargadas y menor coste de implantación y mantenimiento que con los sistemas convencionales (Marín Galvín, 2012).

Otra de las ventajas de la EC es eliminar las partículas coloidales. Esto se debe a que el campo eléctrico aplicado las pone en movimiento más rápido, lo que facilita la coagulación.

El uso de ésta técnica puede emplearse convenientemente en áreas rurales donde la electricidad no está disponible. La EC no es un proceso exclusivo de zonas industriales o urbes urbanas, lo que otorga ventajas sobre otros sistemas de tratamiento. Mollah and Schennach, 2001 demostraron que con la ayuda de un panel solar conectado a la unidad puede ser suficiente para llevar a cabo el proceso.

Algunas veces es necesario utilizar dos o más métodos para el tratamiento, es decir procesos combinados o híbridos, para asegurar así un tratamiento eficiente de aguas residuales. La tecnología de EC se puede diseñar en sistemas de tratamiento para incluir los métodos de separación de membrana, ósmosis inversa, electrofiltración, deshidratación de lodo, termo oxidación entre otras (Mollah & Robert Schennach, 2001).

### **3.3 Consideraciones generales para los reactores de flujo continuo**

El reactor de mezcla completa y el reactor de flujo pistón son los dos tipos de reactores electroquímicos. El diseño de estos reactores depende del diseño del electrodo a utilizar. La selección y/o diseño del electrodo se hace garantizando que la reacción electroquímica transcurra en condiciones de difusión límite, es decir en máxima producción de iones en el electrodo.

El diseño de un reactor electroquímico para EC juega un papel importante en el proceso de tratamiento. La geometría y diseño correcto erradican los problemas comunes en la construcción y funcionamiento. Esto debido a que ayudan a que el fluido sea tratado de manera uniforme sin dejar zonas muertas, canalizaciones y ensuciamiento del electrodo (Rodríguez, et al., 2015).

La metodología desarrollada en Ingeniería Química para describir el funcionamiento de los reactores químicos se ha introducido poco a poco en el área de la Ingeniería Electroquímica. Es así que, se puede asimilar todo reactor electroquímico industrial, de hidrodinámica compleja, a una asociación adecuada de reactores ideales. (Frías Ferrer, 2004).

En las consideraciones generales de los reactores electroquímicos tenemos los balances microscópicos y macroscópicos (masa, energía, calor y movimiento); son fundamentales en la realización y funcionalidad de los reactores electroquímicos, haciendo necesario conocer las reacciones, sus propiedades y los intercambios de energía que se presentan.

### **3.3.1 Balance macroscópico**

Las variaciones que ocurren dentro de un reactor electroquímico son percibidas solamente en las propiedades de entrada y salida del electrolito. Así como en los intercambios de energía generados en el cuerpo del reactor y el interior del mismo. El seguimiento de magnitudes materia, calor y cantidad de movimiento constituye un examen completo del balance macroscópico (Coeuret, 1992).

El balance macroscópico de materia es una generalización de la ley de la conservación de la masa a sistemas abiertos (sistemas con posibles entradas y salidas de materia al exterior). Al aplicar esta ley se puede simplificar todo tipo de situaciones macroscópicas en intercambios de materia (Costa López, et al., 1991).

Para el caso concreto del balance de materia la expresión general es la siguiente

$$\left( \begin{array}{c} \text{ACUMULACIÓN} \\ \text{DE MATERIA} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{CAUDAL NETO DE} \\ \text{ENTRADA DE MATERIA} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{CAUDAL DE GENERACIÓN} \\ \text{DE MATERIA} \end{array} \right) \quad (3.6)$$

El término caudal neto de entrada puede ser negativo o positivo según sea menos materia la que sale o la que entre. El término caudal de generación de materia puede ser nulo cuando no se realicen reacciones químicas en el sistema.

La ecuación de la conservación de la materia; en la hidráulica se expresa de la forma:

$$\text{div}(pv) + \frac{\partial pVx}{\partial x} + \frac{\partial pVy}{\partial y} + \frac{\partial pVz}{\partial z} \quad (3.7)$$

Dónde: Pv son las funciones de punto y tiempo respectivamente, los subíndices x,y,z corresponden a las componentes de la función Pv.

La ecuación 3.7 es una forma de expresar la ecuación diferencial de continuidad, que es la más general para un flujo compresible no permanente.

Pero al tratarse en este caso de un fluido incompresible como es el agua, se puede simplificar de la siguiente manera:

Siendo,  $p = \text{constante}$

$$\text{div } v = 0 \quad (3.8)$$

En la aplicación del balance macroscópico para los reactores electroquímicos los iones que entran más los iones que aparecen o en su caso desaparecen deben de ser igual a los iones que salen, por lo cual no se puede tener una ganancia o pérdida en la salida de iones durante éste proceso.

El balance macroscópico de energía se define como el primer principio de la termodinámica aplicado a un sistema abierto, el cual tiene una entrada y salida de materia. Por otro lado en régimen estacionario, se establece que la variación macroscópica de energía global del sistema se debe a la cantidad de energía calorífica que la masa entrega o recibe desde o hacia el medio exterior (Coeuret, 1992).

La ecuación de Bernoulli es fundamental para el desarrollo de este trabajo. Por ello es necesario conocer esta ecuación la cual es un caso especial de éste balance, y toma en cuenta los términos de energía mecánica (presión, potencial, cinética) y que relaciona la caída de presión que sufre el líquido en la entrada y salida del volumen con otras variaciones de energía mecánica del sistema y las pérdidas por rozamiento.

Desde un punto de vista físico se define a la ecuación de energía para una vena líquida de la siguiente manera (Sotelo Ávila, 1997).

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + \sum_1^2 hr + \frac{1}{g} \int_1^2 \frac{\partial(\beta V)}{\partial t} ds \quad (3.9)$$

Dónde:  $Z$  es la carga de posición en metros,  $\frac{P}{\gamma}$  es la carga de presión en metros,  $\frac{V^2}{2g}$  la carga de velocidad en metros,  $\sum_1^2 hr$ : pérdida de carga y  $\frac{1}{g} \int_1^2 \frac{\partial(\beta V)}{\partial t} ds$ : Carga de cambio local de velocidad.

Para el caso del reactor de mezcla completa se supondrá que el flujo es permanente por lo cual la expresión se reduce a:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + \sum_1^2 hr \quad (3.10)$$

La ecuación 3.10 es fundamental ya que se debe de buscar la geometría y configuración adecuada del reactor, además las condiciones del electrolito, para obtener la caída de presión sufrida por el electrolito en el circuito hidráulico. Por último, el balance macroscópico de cantidad de movimiento es útil para analizar las fuerzas a las que se encuentra sometido el sistema cuando existe una variación en la cantidad de movimiento de la masa del fluido. Para una correcta aplicación de este balance es necesario plantear un balance de las fuerzas de gravedad, arrastre y presión, aplicados al volumen considerado, así como las de inercia y cantidad de movimiento que provocan una acumulación o reducción de la cantidad de movimiento del mismo (Coeuret, 1992).

El balance macroscópico se escribe:

$$\begin{aligned} & \text{Suma de fuerzas de gravedad, presión, arrastre o tangenciales y normales a las paredes} \\ & = \text{fuerza de inercia o caudal neto de entrada de cantidad de movimiento} \end{aligned}$$

La ecuación de cantidad de movimiento se define como la suma vectorial de las fuerzas  $F$  que actúan sobre una masa de fluido es igual a la rapidez del cambio del vector lineal cantidad de movimiento de la masa del fluido, en hidráulica Sotelo Ávila, 1997, ecuación 3.11.

$$F = \frac{d(Mv)}{dt} \quad (3.11)$$

Dónde:  $F$  es la suma vectorial de todas las fuerzas que actúan sobre una masa de fluido,  $Mv$  la cantidad de movimiento de la masa de fluido y  $t$  el tiempo.

Cabe mencionar que las fuerzas externas son de dos tipos:

- a) Fuerzas de superficie: Son aquellas que actúan sobre la masa del fluido, las cuáles pueden ser fuerzas normales ( $F_p$ ) y tangenciales ( $F_T$ ) a la frontera de la masa.
- b) Fuerzas de cuerpo ( $F_c$ ): son las fuerzas conocidas como de peso propio.

Para un flujo permanente, e incompresible y de densidad constante, la ecuación puede expresarse de la siguiente manera:

$$F_p + F_T + F_c = p \sum(QBV) \quad (3.12)$$

Cuya ecuación se puede descomponer en sus componentes:

$$F_{pX} + F_{TX} + F_{cX} = p \sum(QBV_x) \quad (3.13)$$

$$F_{pY} + F_{TY} + F_{cY} = p \sum(QBV_y) \quad (3.14)$$

$$F_{pZ} + F_{TZ} + F_{cZ} = p \sum(QBV_z) \quad (3.15)$$

### 3.3.2 Balance microscópico

Para conocer con precisión la transformación en el interior de un reactor electroquímico, en particular de las cercanías del electrodo, es necesario plantear los balances microscópicos de materia, calor y cantidad de movimiento.

El balance de conservación de la masa en un volumen, se reduce a considerar lo que sucede, por unidad de tiempo, con la masa de fluido en volumen y por lo tanto con el caudal másico (Coeuret, 1992).

$$\left( \frac{\text{CAUDAL MÁSSICO QUE}}{\text{ENTRA EN EL VOLUMEN}} \right) + \left( \frac{\text{CAUDAL MÁSSICO PRODUCIDO}}{\text{EN EL VOLUMEN}} \right) = \left( \frac{\text{CAUDAL MÁSSICO QUE SALE}}{\text{DEL VOLUMEN}} \right) + \left( \frac{\text{CAUDAL MÁSSICO ACUMULADO}}{\text{EN EL VOLUMEN}} \right) \quad (3.16)$$

La diferencia entre el caudal másico que sale del volumen y el caudal másico que entra en el volumen, representa el caudal másico neto que sale del reactor. El caudal másico producido por unidad de volumen es mayor a 0 si hay producción y menor a 0 cuando se presenta eliminación

### 3.3.3 Parámetros operacionales

Los parámetros operacionales del proceso son el gradiente de velocidad y el tiempo de retención.

Los valores de estos parámetros, según los estudios realizados por Villegas y Letterman (1976), son los que en forma conjunta van a producir la mayor eficiencia. Investigaciones efectuadas, se ha determinado que el rango óptimo de gradientes de velocidad para floculación varía entre 20 y 75 s<sup>-1</sup> y el de tiempos de retención entre 10 y 30 min, dependiendo de la calidad del agua.



## 4. CAPÍTULO 4 GENERALIDADES CFD

En el siguiente apartado se presentan las bases y generalidades de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), debido a que esta herramienta rige el presente trabajo de investigación. Se describen las aplicaciones de CFD en la modelación y simulación de fluidos, especialmente las aplicaciones en el campo de los reactores electroquímicos. Así como las etapas y procedimientos para que se realice correctamente la simulación de un fluido. Al ser la creación de energía cinética de turbulencia el punto principal de esta investigación se describen los modelos de turbulencia más comunes para el análisis con CFD.

### 4.1. Antecedentes CFD

La Dinámica de Fluidos Computacional está especialmente dedicada para los fluidos que se encuentran en movimiento, y conocer como el comportamiento del flujo influye en los procesos que pueda incluir la transferencia de calor y posiblemente reacciones físicas en los flujos de combustión. Las características físicas del movimiento usualmente se pueden describir a través de ecuaciones matemáticas fundamentales, generalmente en forma diferencial parcial, que se denominan ecuaciones de gobierno. La parte computacional se basa en el estudio del fluido a través del cálculo de simulaciones numéricas, lo que implica el uso de programas y computadoras de alta velocidad para lograr este cálculo (Jiyuan, et al., 2018).

La CFD es aplicada en el diseño de aeronaves, turbomaquinaria, barcos, automóviles, etc. Actualmente, algunos campos en los que también se maneja la CFD es la meteorología, oceanografía, astrofísica, biología y arquitectura (Blazek,

2007). En la ingeniería, la aplicación de la CFD radica principalmente en la mecánica de fluidos, es decir en el comportamiento de un fluido o fluidos en un medio (López Rebollar, 2015).

Con el rápido avance de los equipos de cómputo, la CFD se posiciona como una herramienta muy útil y novedosa para la investigación de la dinámica de fluidos en muchas ramas y transferencia de calor. Una de las ventajas de la CFD es el desarrollo de las ciencias computacionales se enfoca en la solución de ecuaciones gobernantes. (Jiyuan, et al., 2018). Como se mencionó anteriormente, otra de las ventajas es la realización de simulaciones en prototipos digitales, evitando así gastos en la construcción de modelos físicos. Lo anterior permite que se realicen mejoras desde la etapa de modelación. Por ello, se considera adecuado el realizar ajustes al uso de la CFD para la simulación de reactores electroquímicos.

El diseño de reactores electroquímicos en la CFD ha sido abordado por diversos investigadores en los últimos años. Algunas de las razones es que el tratamiento electroquímico es muy eficaz para la producción de hidrógeno, tratamiento de aguas residuales o como un tratamiento para disminuir la cantidad de elementos orgánicos (Rodríguez, et al., 2015).

López-García (2013) utilizó la CFD para conocer el comportamiento hidrodinámico de un reactor electroquímico de placa paralela, en el cuál se electro depositó platino sobre la superficie del electrodo de titanio. El papel principal de la CFD en esta investigación fue el estudio dinámico en el análisis de datos. El análisis permitió que el coeficiente de dispersión axial aumenta linealmente con la velocidad del flujo y que el recubrimiento de platino coincidió en la distribución de espesores con el proyectados por la CFD. Esto demuestra la capacidad del uso de la CFD en la modelación de reactores electroquímicos. Otros ejemplos que soportan esta condición son los de Nelissen (2003), Martínez – Delgadillo (2013), Vázquez et al. (2014) y Rosales et al. (2016).

Nelissen (2003), estudió un reactor utilizando un modelo k-w, para resolver la turbulencia en una solución en estado estable 2D para la electroquímica del reactor, en una región cercana a la pared de la superficie del cátodo. Con ayuda de la CFD, se realizaron y validaron cálculos de transferencia de masa turbulenta en un reactor de placa paralela con electrodos largos y cortos fueron realizados y validados, comparándose con correlaciones utilizadas en literatura, siendo un modelo efectivo.

Martínez-Delgadillo (2013), utilizaron simulaciones de la CFD para un reactor rotativo usado para la remoción de cromo hexavalente de las aguas residuales industriales. La dependencia del tiempo de reacción de la velocidad angular fue demostrada experimentalmente y estos resultados se examinaron utilizando la velocidad del flujo y la turbulencia obtenidos por simulaciones de CFD, con esto se descubrió que el campo de velocidad de flujo y la intensidad de turbulencia no son homogéneas dentro del reactor.

Vázquez, et al. (2014), estudiaron los aspectos de la distribución y la hidrodinámica de una celda en un reactor para conocer el desempeño del proceso de EC. Para este análisis solo consideraron las distribuciones primarias y la densidad de corriente. El comportamiento se analizó mediante la CFD y utilizando el modelo de turbulencia K- $\epsilon$ , tomando en cuenta solamente el movimiento del fluido entre los electrodos. Este análisis de CFD indicó que la disposición de geometría de la celda genera perfiles de baja velocidad entre los electrodos. Además, el modelo mostró que el rendimiento de la EC mejoró cuando se lograron densidades de potencial y corriente uniforme con perfiles de baja velocidad de flujo.

Rosales, et al., (2016), realizaron simulaciones con CFD para el flujo monofásico en un reactor de electrodo cilíndrico giratorio en modo de operación continuo. Se obtuvieron perfiles de velocidad y líneas de corriente resolviendo las ecuaciones de

Navier-Stokes con modelo de turbulencia K- $\epsilon$ . Los resultados de la simulación 3D del campo de velocidad muestran la formación de un vértice de flujo turbulento y zona de baja velocidad. Además, se comprobó que el tiempo de retención fue muy parecido entre la simulación de CFD y los datos experimentales, nuevamente comprobando la utilidad de la CFD.

Las investigaciones anteriores, como ya se mencionó, respaldan el hecho de que la CFD para el estudio de los fluidos garantiza resultados confiables. Esta herramienta permite, además, diseñar componentes o modificar las ubicaciones de los mismos para mejorar su funcionamiento, ofreciendo la visualización del fluido para conocer su comportamiento para este significa que mediante el uso de la CFD se puede realizar prototipos virtuales, en los cuáles conoceremos el comportamiento de sus propiedades hidrodinámicas. Lo que permitirá, de ser necesario, modificar o sustituir componentes sin la necesidad de construir un modelo físico para la búsqueda o comprobación de mejoras. Lo anterior se reflejará en ahorros económicos y avances científicos con respaldo matemático. Por lo cual es una herramienta que resulta útil para facilitar el estudio del comportamiento de flujo e hidrodinámicas de reactores electroquímicos.

#### **4.2. Proceso general de la dinámica de fluidos computacional**

El proceso general para realizar un análisis de la CFD, se describe por la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio (NASA), en el archivo NPARC Alliance CFD Verification and Validation Web Site. Este documento es una referencia para comprender los diversos aspectos de la simulación.

##### *1. Formulación del problema*

La primera etapa del proceso consiste en formular el problema de flujo, es decir: definir el objetivo del análisis, la forma de solucionar el problema, la geometría adecuada, condiciones de operación y el tipo de dimensionamiento espacial. Este

último para conocer el tipo de modelo que es requerido su análisis (unidimensional, bidimensional o tridimensional). También se debe de realizar un análisis para conocer si el flujo es estacionario o transitorio, además de la naturaleza viscosa del flujo (laminar, turbulento o no viscoso).

### *II. Modelo geométrico y dominio fluido*

La segunda etapa se refiere al análisis del flujo que será evaluado y modelado en un cuerpo. Este es dibujado generalmente en una herramienta de dibujo vectorial CAD para realizar la geometría. Al establecer la geometría se pueden requerir simplificaciones a la geometría para tener un análisis óptimo y razonable. Algunas de las zonas de frontera del dominio del flujo coinciden con la superficie del cuerpo geométrico. Otras superficies son fronteras libres en las cuáles el flujo entra o sale. La geometría y el dominio de flujo se modelan de tal manera que proporcionen información para la generación de la malla, ya que la modelación toma como punto fundamental la estructura y topología de la generación de la malla.

### *III. Establecimiento de las condiciones iniciales y de frontera*

La tercera etapa consta de la especificación de las condiciones físicas en los límites del dominio de flujo. La simulación generalmente comienza con una solución inicial y utiliza un método iterativo para llegar a una solución final del campo de flujo.

### *IV. Generación de malla*

El dominio de flujo es discretizado en una cuadrícula. La generalización de la cuadrícula implica definir la estructura, topología y posteriormente la generación de la cuadrilla de dicha tipología. Actualmente todas las mallas involucran cuadrículas estructuradas de bloques múltiples, sin embargo, los bloques de la cuadrícula pueden ser contiguos, no contiguos y superpuestos. La malla debe exhibir una

calidad de malla definida por las medidas de ortogonalidad, los espacios máximos deben ser consistentes con la resolución deseada de las características importantes. Se debe tomar en cuenta la calidad de la malla en zonas donde se requieren ver los fenómenos de capa límite.

*V. Establecimiento de estrategias de simulación*

La estrategia para realizar la simulación implica determinar cosas como los aspectos de espacio y temporales. Esto se refiere a la evolución de la propiedad principal en función de la velocidad, densidad, presión, concentración, temperatura, etc. a través de las dimensiones independientes como coordenadas espaciales y tiempo. También se refiere a la elección de un modelo turbulento o químico, así como la elección de los algoritmos.

*VI. Establecimiento de parámetros de entrada*

Los códigos de CFD requieren de un archivo de entrada que enumere los valores de parámetros iniciales que sean consistentes con la estrategia planteada. Además, requiere un archivo de malla que contenga información y la estructura de la malla. La malla deberá también contener la información de las condiciones de frontera para generar una solución inicial de flujo y solucionar el dominio completo.

*VII. Realización de la simulación*

La simulación se realiza con varias posibles opciones en procesamiento interactivo o por secciones y con procesamiento distribuido, esto para generar una solución en un tiempo óptimo.

*VIII. Monitoreo de la simulación*

La solución es monitoreada para determinar si se ha obtenido una solución convergente llamada convergencia iterativa. Para determinar la convergencia se pueden utilizar criterios como:

- **Residuales:** Los residuos de las ecuaciones son el cambio en las ecuaciones sobre una iteración. Estos generalmente están escalados o normalizados. Se busca que los residuos alcancen un cierto nivel para indicar una convergencia.
- **Resultados:** La situación de CFD tiene el objetivo de determinar alguna cantidad como arrastre, recuperación, etc. Se puede rastrear los valores de tales cantidades con respecto a la interacción y definir la convergencia iterativa cuando estas cantidades convergen.

### *IX. Post – procesamiento para obtención de los resultados*

El post – procesamiento implica extraer las propiedades de flujo deseadas (empuje, elevación, arrastre, etc.), calculadas computacionalmente.

### *X. Comparación de resultados*

Las propiedades de flujo calculadas se comparan con los resultados de estudios analíticos, computacionales o experimentales para establecer la validez de los resultados calculados.

### *XI. Análisis de sensibilidad*

La sensibilidad de los resultados calculados debe examinarse para comprender las posibles diferencias en la precisión de los resultados y/o el rendimiento del cálculo con respecto a parámetros como: dimensiones, condiciones del flujo, condiciones iniciales, estrategia de los pasos, algoritmos, topología y densidad de la malla,

modelo de turbulencia, modelo químico, modelo de flujo, viscosidad, condiciones de frontera y sistema computacional. Se debe considerar realizar repeticiones en el proceso de simulación, hasta llegar a una sensibilidad satisfactoria de los parámetros antes mencionados.

#### *XII. Reporte de resultados*

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en el análisis, incluyendo los pasos anteriores.

La correcta ejecución y validez de los resultados obtenidos mediante un análisis de CFD dependen del desarrollo de los pasos anteriormente mencionados. Siendo una guía para el desarrollo por CFD de un fluido.

### **4.3. Modelos y ecuaciones de la CFD**

La CFD, actualmente es utilizada como una herramienta de estudio y de diseño en diferentes áreas de ingeniería (aeroespacial, biomédica, química, civil, etc.), especialmente en el movimiento de fluidos.

La CFD se basa en ecuaciones para predecir el comportamiento del flujo. Las derivaciones de las ecuaciones principales de la dinámica de fluido se basan en el hecho de que el comportamiento dinámico de un fluido este determinado por las siguientes leyes de conservación; conservación de la masa, energía y momentum, de las cuáles derivan las ecuaciones de movimiento *Navier – Stokes*. Cuando el flujo es turbulento, estas ecuaciones deben promediarse sobre un incremento de tiempo aplicando una descomposición de Reynolds, lo cual resulta en ecuaciones y modelos que describen la energía de turbulencia en el flujo.

#### **4.3.1 Ecuaciones de Navier-Stokes**

La base teórica del modelado de CFD son las ecuaciones de dinámica de fluidos de Navier-Stokes, que se utilizan para modelar parámetros de flujo de fluidos como la velocidad, la temperatura y la presión. Los contornos de velocidad se pueden usar para rastrear las rutas de las partículas que viajan a través del proceso unitario modelado, lo que permite calcular las distribuciones de tiempo de residencia (Xu, 2010).

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

- Ecuación de conservación de la masa simplificada para flujo compresible:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (4.1)$$

- Ecuaciones de cantidad de movimiento

$$M_x \quad \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho u)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial^2(u)}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2(u)}{\partial y^2} + v \frac{\partial^2(u)}{\partial z^2} \quad (4.2)$$

$$M_y \quad \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho u)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + v \frac{\partial^2(u)}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2(u)}{\partial y^2} + v \frac{\partial^2(u)}{\partial z^2} \quad (4.3)$$

$$M_z \quad \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho u)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + v \frac{\partial^2(u)}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2(u)}{\partial y^2} + v \frac{\partial^2(u)}{\partial z^2} \quad (4.4)$$

- Ecuación de la energía

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (4.5)$$

Dónde:  $x, y, z$  son los ejes del sistema coordenado,  $u, v$  y  $w$  son las componentes radial, tangencial y vertical de la velocidad,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $p$  es la presión absoluta,  $T$  es la cantidad de calor del fluido,  $C_p$  es el calor específico del fluido,  $\lambda$  es la conductividad térmica y  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido.

Considerando un flujo incompresible y de viscosidad constante, el desarrollo de las ecuaciones de momentum para un flujo tridimensional y tridireccional es:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (4.6)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (4.7)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4.8)$$

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

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.9)$$

Las ecuaciones de Navier-Stokes son ecuaciones diferenciales parciales acopladas y no lineales y son ecuaciones conocidas. A partir de éstas ecuaciones, se pueden obtener ecuaciones para casos especiales (flujo estacionario, bidimensional) omitiendo los términos adecuados (López Rebollar, 2015).

#### 4.3.2 Turbulencia y modelo de turbulencia $k-\epsilon$

La turbulencia tiene un comportamiento caótico dependiente del tiempo, que se observa en muchos flujos. Generalmente se cree que se debe a la inercia del fluido en su conjunto: la culminación de la aceleración convectiva y del tiempo. Por lo tanto, los flujos donde los efectos de inercia son pequeños tienden a ser laminares (el número de Reynolds cuantifica cuánto afecta el flujo las fuerzas inerciales). Se cree,

aunque no se sabe con certeza, que las ecuaciones de Navier-Stokes describen adecuadamente las turbulencias.

La solución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes para el flujo turbulento es extremadamente difícil, debido a las diferencias significativas en la escala de mezcla – longitud contenida en un flujo turbulento. La solución estable de este conjunto de ecuaciones requiere una resolución de malla muy fina, que resulta en tiempos de cálculo que son costosos.

Para contrarrestar esto, las ecuaciones Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS, por sus siglas en inglés), complementadas con modelos de turbulencia (como el modelo  $k-\epsilon$ ), se utilizan en aplicaciones prácticas de CFD para modelar flujos turbulentos.

### **4.3.3 Ecuaciones Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS)**

Las ecuaciones RANS son el enfoque más antiguo para el modelado de turbulencias. Se resuelve una versión promediada de conjunto de las ecuaciones de gobierno, que introduce nuevas tensiones aparentes conocidas como tensiones de Reynolds. Esto agrega un tensor de incógnitas de segundo orden para el cual varios modelos pueden proporcionar diferentes niveles de cierre. Es un error común pensar que las ecuaciones RANS no se aplican a flujos con un flujo medio variable en el tiempo porque estas ecuaciones tienen un "promedio de tiempo". De hecho, los flujos estadísticamente inestables (o no estacionarios) pueden ser igualmente tratados (Xu, 2010). Los procesos de turbulencia pueden calcularse mediante las ecuaciones RANS:

- Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (4.10)$$

- Ecuaciones de momentum

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}\bar{u})}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{w}\bar{u})}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial(\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( V \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( V \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( V \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left[ V \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ V \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ V \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right] - \left[ \frac{\partial \bar{u}'u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}'u'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}'u'}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}\bar{v})}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{w}\bar{v})}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial(\bar{v})}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( V \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( V \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( V \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left[ V \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ V \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ V \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right] - \left[ \frac{\partial \bar{u}'v'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}'v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}'v'}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}\bar{w})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}\bar{w})}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{w}\bar{w})}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial(\bar{w})}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( V \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( V \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( V \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left[ V \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ V \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ V \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right] - \left[ \frac{\partial \bar{u}'w'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}'w'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}'w'}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (4.13)$$

Donde  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\bar{w}$  y  $\bar{p}$  son valores medios y  $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$ , y  $p'$  son fluctuaciones de turbulencia. El lado izquierdo de esta ecuación representa el cambio en el momento del fluido debido a la inestabilidad en el flujo y la convección por el flujo. Como se observan estas ecuaciones son similares a las de un flujo laminar, la presencia de los términos de la forma  $\bar{a}'\bar{b}'$ , que son los términos llamados esfuerzos de Reynolds. Boussinesq propuso que los esfuerzos de Reynolds pueden estar ligados a la tasa media de deformación, la cual obtiene que:

$$-\overline{p u' u'} = 2\mu_T \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \frac{2}{3} \rho k \quad (4.14)$$

$$-\overline{p v' v'} = 2\mu_T \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \frac{2}{3} \rho k \quad (4.15)$$

$$-\overline{p w' w'} = 2\mu_T \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \frac{2}{3} \rho k \quad (4.16)$$

$$-\overline{p u' v'} = \mu_T \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad (4.17)$$

$$-\overline{p u' w'} = \mu_T \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \quad (4.18)$$

$$-\overline{p v' w'} = \mu_T \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \quad (4.19)$$

De las ecuaciones anteriores, el lado derecho de las ecuaciones es similar a la Ley de Viscosidad de Newton, excepto en los términos de turbulencia o viscosidad turbulenta  $\mu_T$  y la energía de turbulencia  $k$ .

El modelo  $k$ - $\varepsilon$  desarrolla ecuaciones de transporte para adoptar la cantidad de turbulencia  $k$  y la tasa de disipación de la energía de turbulencia  $\varepsilon$ . Desafortunadamente, el modelo  $k$ - $\varepsilon$  no puede predecir adecuadamente el comportamiento en las paredes, excepto bajo capas límite de presión constante. Puesto que Launder y Spalding (1974) propusieron este modelo para el análisis de flujos turbulentos.

#### 4.3.4 Modelo de turbulencia $k$ - $\varepsilon$

Los dos modelos de turbulencia más conocidos son el  $k$ - $\varepsilon$  y  $k$ - $\omega$  ( $K$ -Épsilon y  $k\Omega$ ). Dónde: en ambos modelos  $k$  representa la energía cinética de turbulencia, para el modelo  $k$ - $\varepsilon$ ,  $\varepsilon$  representa la tasa de disipación de la energía cinética de turbulencia dentro del sistema, el modelo  $k$ - $\omega$ ,  $\omega$  representa la relación entre la tasa de disipación de la energía cinética de la turbulencia y la energía cinética de turbulencia.

El modelo k-ε tiene muy buena eficiencia aplicado a flujos confinados con esfuerzos cortantes de Reynolds, flujos circulares, y óptima convergencia para la solución. Éste modelo fue el utilizado para ésta investigación, que consiste en éstas ecuaciones:

□ Modelo de turbulencia k-ε

$$(k) \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uk)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vk)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho wk)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right] + (P - D) \quad (4.20)$$

$$(\varepsilon) \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uk)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vk)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho wk)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right] + \frac{1}{k} (C_1 P - C_2 D) \quad (4.21)$$

$$P = 2\mu_T \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \mu_T \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} \mu_T \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 - \frac{2}{3} \rho \mu_T k \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (4.22)$$

Donde:

$$D = \rho \quad (4.23)$$

$$k = \frac{1}{2} u'_i u'_i, \text{ con } i = 1, 2, 3 \quad (4.24)$$

$$\varepsilon = \mu_T \left( \frac{\partial u'_i}{\partial u_j} \right) \left( \frac{\partial u'_i}{\partial u_j} \right), \text{ con } i, j = 1, 2, 3 \quad (4.25)$$

$$\mu_T = \frac{c_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad (4.26)$$

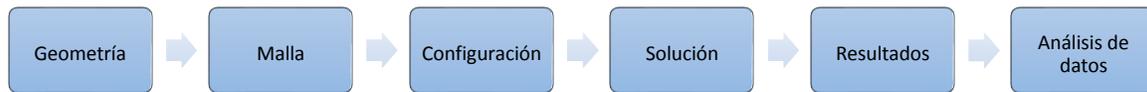
#### 4.4 CFD-ANSYS-FLUENT

Actualmente, el uso de modelos numéricos para predecir flujo, transporte y la dispersión de desinfectantes ha recibido considerable atención. A continuación, se proporciona el análisis del software Fluent Inc. con el cuál fue posible la simulación del trabajo de investigación. Fluent Inc. es un software propiedad de Ansys, Inc., uno

de los desarrolladores de software de simulación de ingeniería líder en el mundo. El producto principal de esta desarrolladora es el software de dinámica de fluidos computacional (CFD)-FLUENT. Éste software está basado en el método de volumen finito, aplicado en una cuadrícula “malla”. La tecnología FLUENT ofrece una amplia gama de modelos físicos que se pueden aplicar a una amplia gama de industrias (Xu, 2010). Algunas de las características de este software son las siguientes:

- **Malla dinámica:** Se configura la malla inicial y prescribe el movimiento, mientras que el software FLUENT modifica automáticamente la malla para seguir el movimiento prescrito. Esto es útil para modelar condiciones de flujo en y alrededor de objetos en movimiento.
- **Turbulencia:** Se pueden utilizar diversos modelos de turbulencia para aproximar los efectos de la turbulencia en una amplia gama de regímenes de flujo.
- **Flujos de reacción:** la tecnología FLUENT tiene la capacidad de modelar la combustión, así como la química de velocidad finita y el modelado preciso de la química de la superficie.
- **Transferencia de calor, cambio de fase y radiación:** el software FLUENT contiene diversas opciones para modelar convección, conducción y radiación.
- **Multifase:** es posible modelar varios fluidos diferentes en un solo dominio con FLUENT.
- **Post-procesamiento:** los usuarios pueden procesar sus datos en el software FLUENT, creando, contornos, líneas y vectores para mostrar los datos de una forma gráfica y más representativa.

De acuerdo a ANSYS-FLUENT, es necesario seguir las etapas principales en orden para tener control de la simulación, como se muestran en la *Ilustración 4-1*. En cada etapa se realizan actividades secundarias esenciales que serán desglosadas en el capítulo de metodología.



*Ilustración 4-1 Etapas de la simulación CFD-ANSYS-FLUENT*

#### 4.4.1 Geometría

El software de Ansys-Fluent, cuenta con una sección de dibujo de CAD en 2D y 3D, llamado Design Modeler. En este módulo se puede dibujar la geometría del sólido que se va a modelar. Además, se pueden nombrar los elementos y la función que cada uno realizará, sea como secciones de entrada o de salida. Este módulo ofrece la opción de importar elementos sólidos o geometría en 2D y 3D, dibujados en paquetería de dibujo como AutoCAD™ o SolidWorks™. El sólido a dibujar o a exportar debe tener un buen aspecto, y tener una geometría precisa, esto para evitar problemas en el proceso de mallado.

#### 4.4.2 Malla

En el módulo de mallado se lleva a cabo la discretización del dominio a modelar. Esto por medio de la fragmentación del sólido en elementos pequeños de volúmenes finitos de tipo hexaédrico, prismático, piramidal y tetraédrico. Con estas formas, se lleva la fragmentación del sólido, ajustando éstos elementos a la topología del dominio a modelar. La calidad de la malla debe ser de buena, ya que la veracidad de resultados depende totalmente de la calidad de la malla. Por eso es que se debe evaluar la malla mediante escalas de calidad, en caso de tener una calidad mala, ésta puede corregirse mediante la generación de más elementos para refinar la malla o cambiar el tamaño máximo y mínimo de estos.

### **4.4.3 SET-UP**

En este apartado se seleccionan parámetros necesarios para la simulación del fluido, tal como las ecuaciones, tipo de fluido, fases, esquemas numéricos de solución, condiciones de convergencia y modelos de turbulencia. Se cuenta con diversas opciones de simulación, como estado del flujo, modelos de turbulencia ( $k\epsilon$  y  $k-\omega$ ), esquema de solución, grado de solución (1er orden, 2do orden, etc.), entre otros. Una parte fundamental en esta sección es colocar el número de iteraciones que se crea necesario para que se llegue a una convergencia. La cantidad de iteraciones necesarias y del tiempo para converger dependerá desde el fenómeno a investigar hasta la capacidad de procesamiento del equipo y la exactitud de las condiciones que se colocaron anteriormente.

### **4.4.4 Condiciones iniciales y de frontera.**

Las condiciones de frontera son establecidas en el dominio a simular, cada una según la zona que se tenga en la geometría. Las condiciones de entradas, salidas, orificios y paredes deben ser establecidas en los elementos geométricos del sólido, las cuáles son declaradas en el módulo de Desing Modeler. En la sección de SETUP se asignan los valores de las condiciones iniciales y de frontera a todas aquellas fronteras correspondientes.

### **4.4.5 Monitoreo de la simulación**

En esta etapa se reporta mediante gráficos el comportamiento de los resultados de cada iteración, esto para conocer si se tiene una tendencia a la convergencia o si se aleja de esta. Las gráficas muestran todos los valores residuales de las ecuaciones a resolver. Para lograr la convergencia éstas gráficas deben llegar a los valores que se colocaron en el apartado de SET-UP, con esto se verifica la precisión alcanzada por cada parámetro. Además, se realiza un procedimiento de verificación de

resultados que arroja el software, para identificar problemas o datos atípicos que perjudiquen la convergencia. Para este trabajo de investigación se comprobó que al terminar la convergencia el valor de entrada y salida fuera el mismo.

#### **4.4.6 Post-Procesamiento**

Por último, se encuentra el apartado de resultados (ANSYS-Results), donde se aprecian los resultados obtenidos después de la simulación y son visualizados en este mismo apartado. Para tener una mejor visualización de la diversidad de los datos, pueden colocarse planos transversales, longitudinales, contornos, animaciones en video, etc. Además, se puede hacer uso de paletas de colores para observar variaciones en fluido en cuestión de velocidad, energía cinética de turbulencia, presión, etc. Los archivos generados por este apartado pueden ser exportados a distintos formatos para el tratamiento, modificación o creación de gráficas para explicar de una mejor manera el comportamiento de los datos.

## 5. CAPÍTULO 5

# METODOLOGÍA

En este capítulo se muestra la metodología utilizada en la elaboración del trabajo de investigación. Para el desarrollo del trabajo fue necesario plantear las etapas claves y su correcto desarrollo para cumplir con los objetivos planteados.

La primera etapa consistió en conocer las características del modelo físico del reactor, las cuáles son sus dimensiones geométricas, volumen de fluido, funcionalidad, capacidad. Su funcionamiento hidráulico, el cual depende del gasto (caudal) y tiempo de concentración. Conociendo estas características la segunda actividad fue la simulación del reactor en su estado original. Esto se realizó mediante la modelación del reactor de mezcla completa, colocando en el software las condiciones de frontera que interactúan en el reactor.

La tercera etapa consistió en la simulación de dos reactores similares al reactor prototipo de entrada y salida perpendicular. La diferencia de los nuevos reactores fue la modificación geométrica del punto de entrada y salida, buscando obtener un porcentaje mayor de energía cinética de turbulencia. La cuarta etapa consistió en la comparación de resultados hidrodinámicos (velocidad total, velocidad vertical y energía cinética de turbulencia) entre el reactor prototipo y los reactores modificados.

La quinta etapa se centró en proponer la geometría del reactor prototipo con un mezclador estático interno para generar energía cinética de turbulencia. Con esta propuesta se realizó la última simulación. Finalmente, en la sexta etapa se realiza la comparación entre cada una de las propuestas de reactores, identificando los puntos de interés, las diferencias entre características de velocidad total, velocidad vertical y energía cinética de turbulencia.

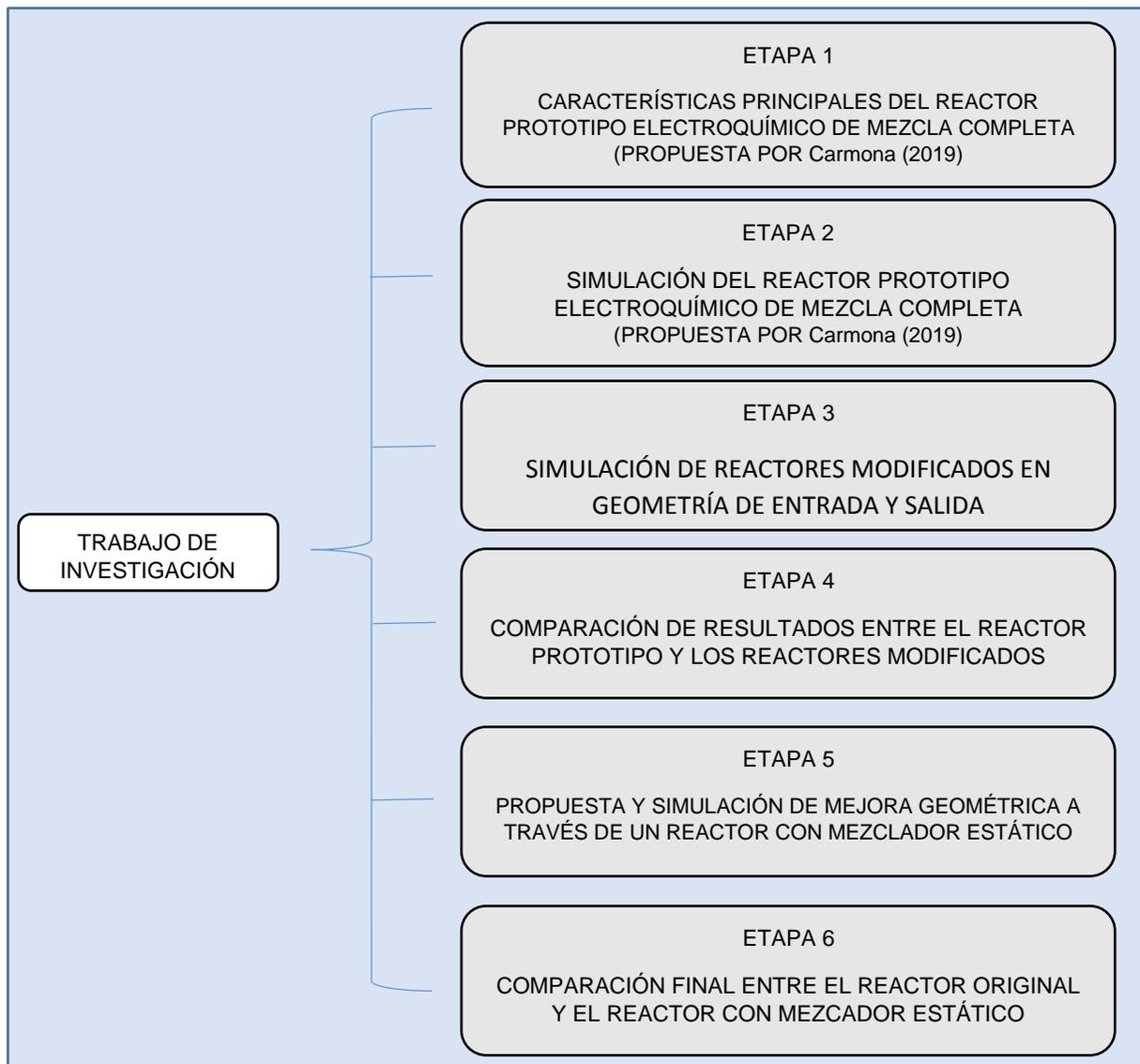
---

---

## CAPÍTULO 5: METODOLOGÍA

### 5.1 Programa de actividades

En la *Ilustración 5-1* se muestra de manera global las etapas realizadas en el desarrollo del trabajo de investigación.



*Ilustración 5-1 Etapas realizadas para el desarrollo de la investigación*

En la *Ilustración 5-2* se muestra el desarrollo de las etapas, iniciando por las características principales del reactor, continuando con las simulaciones de

---

---

diversos modelos modificados en su geometría en ANSYS FLUENT 19.1, y terminando con las comparaciones entre los reactores simulados.

## CAPÍTULO 5: METODOLOGÍA

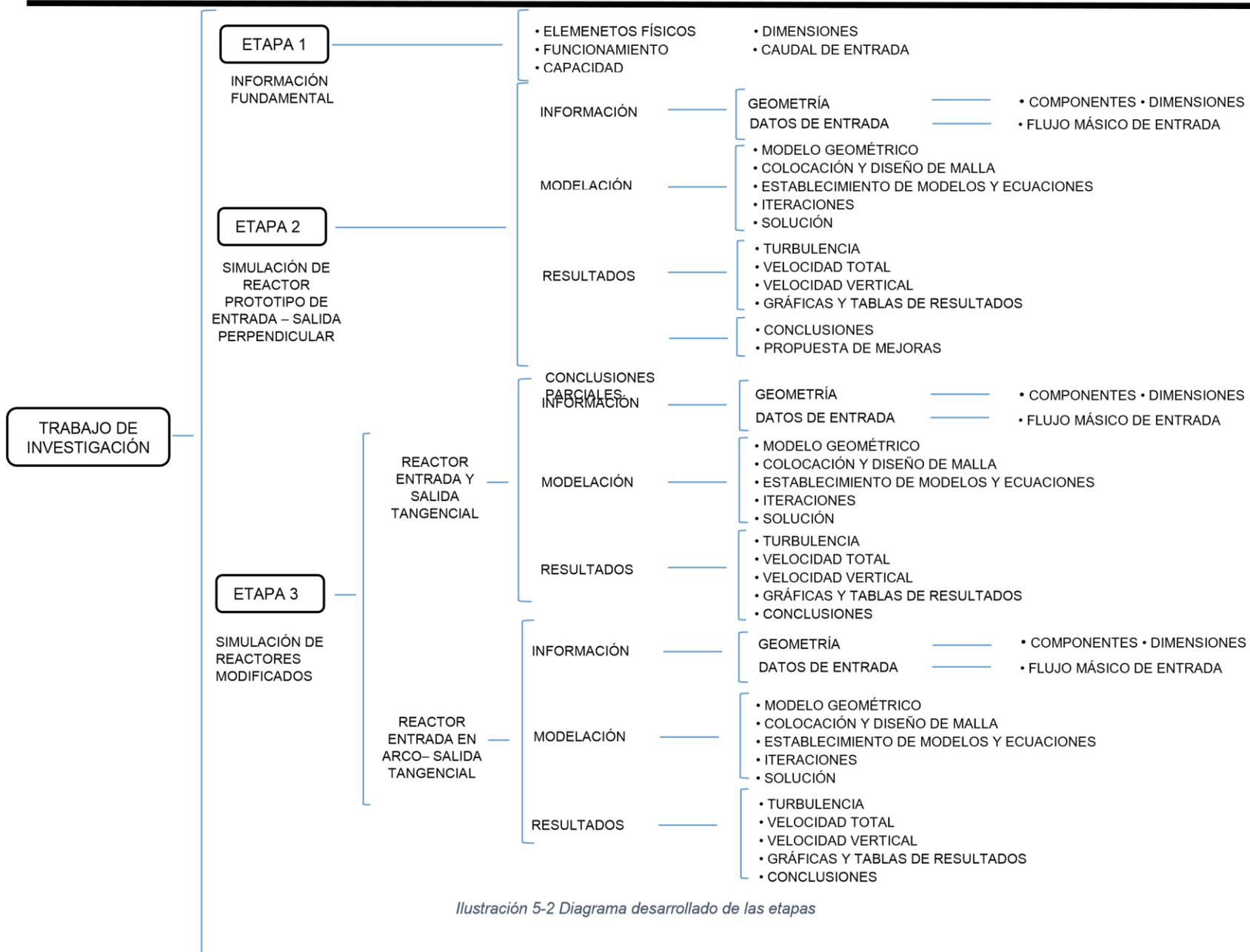


Ilustración 5-2 Diagrama desarrollado de las etapas

CAPÍTULO 5: METODOLOGÍA

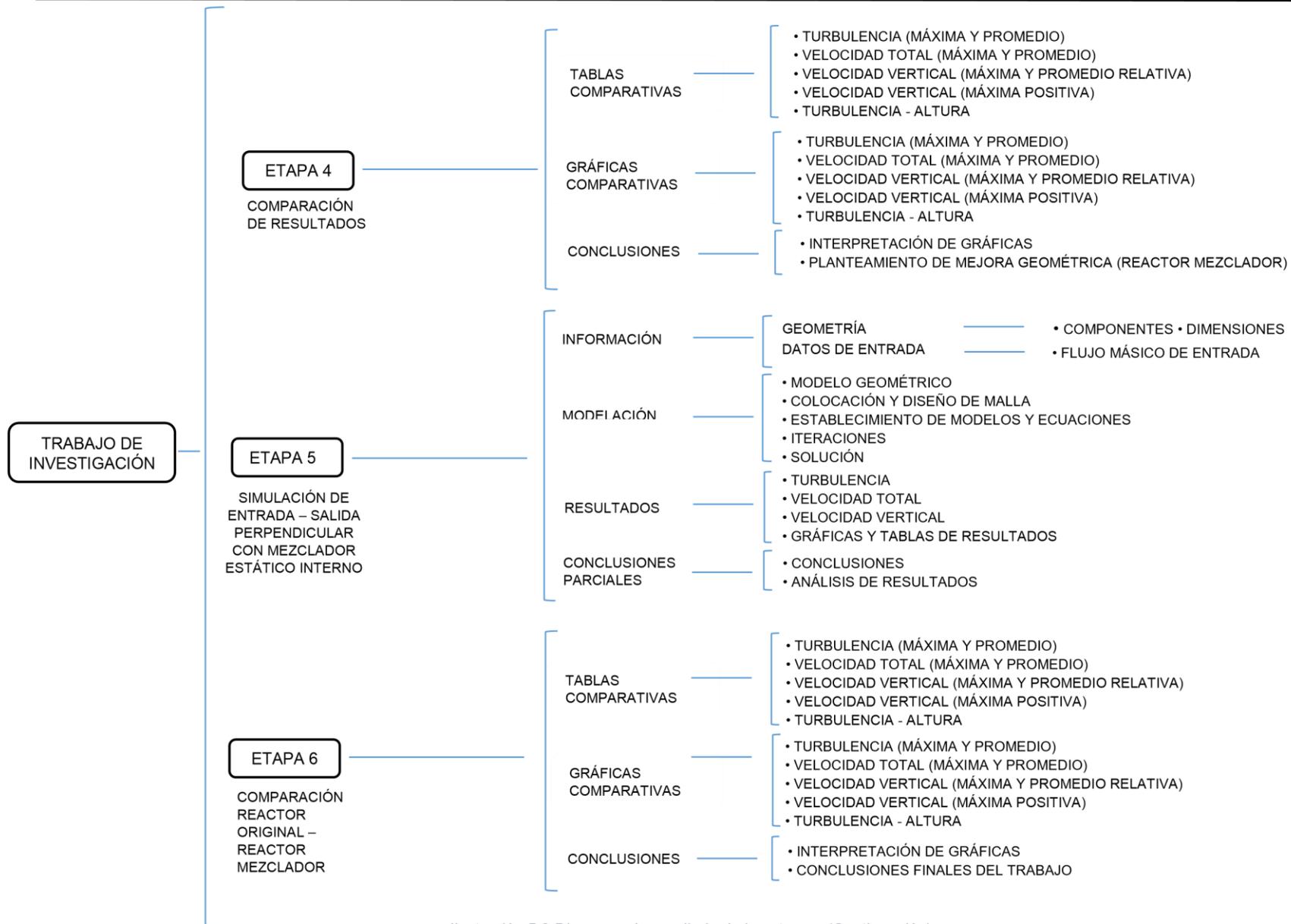


Ilustración 5 2 Diagrama desarrollado de las etapas (Continuación)



## 5.2 Antecedentes del reactor

En este apartado se realizó la recopilación de información para el análisis del reactor original, es decir se obtuvieron datos de: geometría (alto, ancho, largo y secciones), materiales de construcción (tubo de policarbonato, varillas de 1/8", etc.).

El reactor cuenta con componentes especiales como lo son: electrodos de magnesio, varillas y materiales de fijación (tuercas), así como equipos externos: bomba peristáltica, multímetro y fuente de poder. La definición de la entrada y salida, están definidos en la geometría. El funcionamiento del reactor se evaluó con base al proceso electroquímico que se lleva a cabo dentro de este. Además, se recopiló información de los caudales de operación del reactor, éste fue un dato fundamental para la simulación. Cabe mencionar que éstos caudales de funcionamiento fueron proporcionados por un trabajo de investigación anterior, los cuales son considerados óptimos para un tratamiento adecuado de EC (Carmona, 2019).

El trabajo de Carmona (2019) evalúa los efectos de los parámetros de: densidad de corriente, pH inicial, tiempo de contacto, caudal y densidad de corriente, para la remoción de DQO, turbiedad y color, en agua residual industrial. Obteniendo resultados de remoción de DQO en un 47.5%, turbiedad 96.11% y color en 92.16% para un caudal de operación de 20 ml/min, con tiempo de retención de 100 minutos, frecuencia de 12 revoluciones por minuto, densidad de corriente de 440 A/m<sup>2</sup>, y un área de contacto por electrodo de 100 cm<sup>2</sup>.

En la *ilustración 5-3* se muestran los equipos utilizados en el trabajo de Carmona (2019), así como la conexión entre ellos.

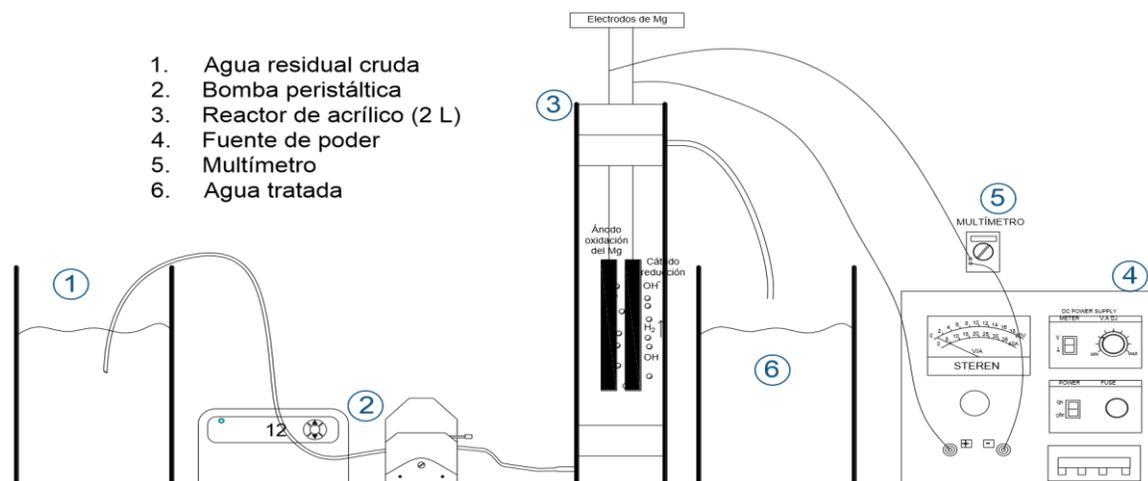


Ilustración 5-3 Equipos utilizados para el funcionamiento del reactor.

### 5.3 Simulación de reactor prototipo (Reactor entrada – salida perpendicular)

#### 5.3.1 Características geométricas y datos de entrada

El reactor es de forma cilíndrica con una altura de 55 cm y un diámetro de 7.62 cm (3"), siendo el cuerpo de éste, de tubo de policarbonato. El funcionamiento del reactor depende de dos secciones primordiales, una sección de entrada circular ubicada a 2.5 cm de forma perpendicular a la base y una sección circular de salida ubicada a 45 cm de la base; tiene un diámetro de 6.35 mm (1/4") y un largo de 2.5 cm. Se utilizó un ánodo y un cátodo de 1.9 cm (3/4") de diámetro y altura de 17 cm ubicados a 8 cm de la base y separados entre ellos 1.9 cm. Estos elementos se encuentran sostenidos de la parte superior mediante varillas de 3.18 mm (1/8") de diámetro, las cuáles pueden permanecer sin recubrimiento, ya que no tiene un impacto sobre los resultados de tratamiento. Se tiene un volumen aproximado de 2 litros desde la base hasta la salida. Se plantearon 5 escenarios para la operación del reactor correspondientes a los caudales de funcionamiento 18.33 ml/min, 20.00 ml/min, 23.33 ml/min, 26.67 ml/min y 28.33 ml/min.



a) Reactor físico

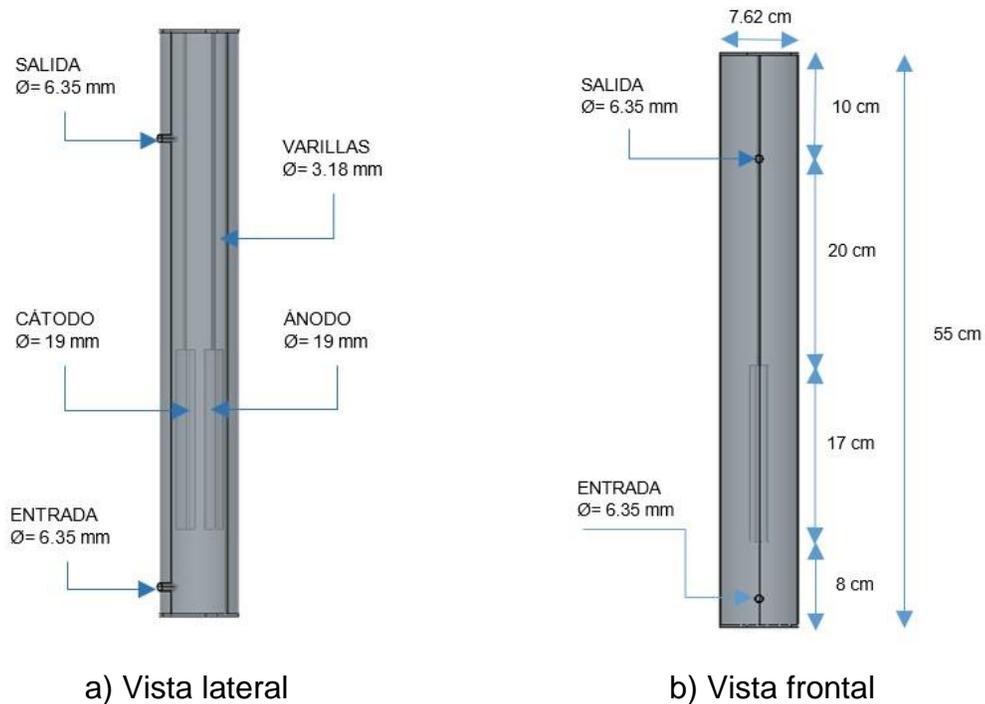


b) Reactor en operación

*Ilustración 5-4 Modelo físico del reactor*

### 5.3.2 Modelo conceptual del reactor prototipo

En esta sección se muestran las características físicas y las dimensiones de los elementos que conforman el reactor, además de las estructuras de entrada, salida, ánodo y cátodo. En la *Ilustración 5-5* se muestran las vistas del reactor, el acomodo de sus componentes y las zonas donde el fluido interviene.



a) Vista lateral

b) Vista frontal

*Ilustración 5-5 Geometría y competentes del reactor prototipo*

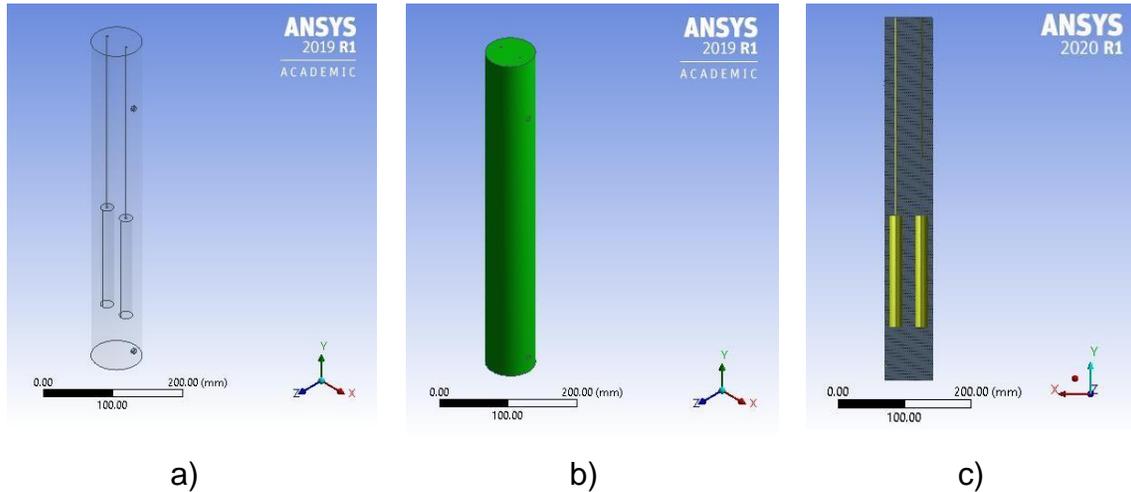
### 5.3.3 Proceso de modelación

La simulación del reactor se realizó en 5 etapas en el programa ANSYS-FLUENT 19.1. La primera consistió en colocar el modelo geométrico en el apartado de “*geometry*” para obtener el dominio de fluido especificando las entradas, salidas y fronteras. En la segunda etapa se realizó la discretización espacial del dominio mediante la generación de la malla seleccionando los parámetros de tamaño y forma para que esta fuese correctamente realizada lo que garantizó una convergencia satisfactoria en la solución. Las condiciones iniciales, selección de modelos y ecuaciones fueron colocadas en la sección de “*set up*”. Las más importantes por mencionar fueron un esquema basado en presión, flujo estacionario no compresible. El modelo de turbulencia fue el  $\kappa$ - $\epsilon$  y se despreciaron fenómenos de transferencia de calor y energía. Posteriormente se iniciaron las iteraciones para la solución de los modelos y se comprobaron que los resultados tenían continuidad en el dominio. Por último se obtuvieron los resultados calculados por el programa, de los cuáles se obtuvieron gráficas y tablas de resultados para su análisis.

### 5.3.4 Geometría del reactor

La geometría del reactor fue dibujada mediante el software de AutoCAD™ y detallada mediante el software CAD SolidWorks™. En este último software se procedió a la definición del sólido, obtenido la geometría que fue exportada al software DesignModeler de ANSYS-FLUENT donde se procedió a nombrar las zonas de entra y salida. Después se procedió a una de las etapas importantes en la definición de la geometría que fue la extracción del volumen de fluido del reactor. Este se refiere al volumen de agua confinado dentro del reactor, capturando las formas geométricas de los propios componentes del mismo.

En la *Ilustración 5-6* se observan el modelo tridimensional del reactor (ánodo, cátodo, varillas, tubo de policarbonato, entrada y salida) y por otro lado el volumen de agua confinado dentro del reactor.



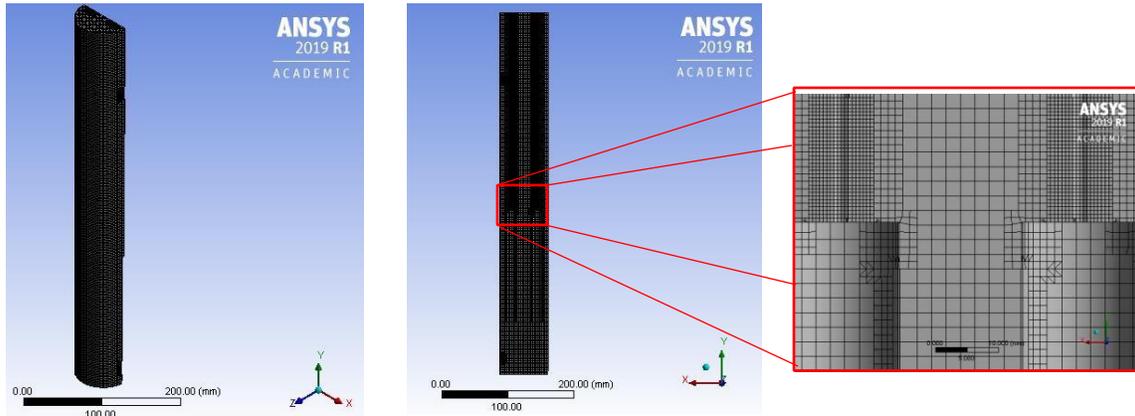
*Ilustración 5-6 Extracción de volumen de control. a) Modelo del reactor; b) fluido dentro del reactor (dominio, volumen de control); c) elementos sólidos dentro del reactor.*

### 5.3.5 Creación de malla para el reactor prototipo

La creación de la malla es una actividad clave para la simulación y la obtención de buenos resultados. De no realizarse una malla adecuada, repercute en los resultados obtenidos y estos no tendrán certeza; existiendo así incertidumbre en los campos de flujo.

Para la creación de una malla adecuada fue necesario seleccionar uno de los métodos de mallado. El método consiste en fragmentar el sólido en volúmenes finitos que conforman el dominio, en este caso se escogió el método cutcell. Este método permite generar una malla para reducir el tiempo para geometrías complejas. Este método principalmente crea elementos hexaédricos con caras que están alineadas a los ejes geométricos. Es importante mencionar que no todos los elementos tienen una simetría idéntica, ya que, en algunas zonas, como las intersecciones de superficies, pueden presentarse elementos con geometrías

prismáticas o tetraédricas. La *Ilustración 5-7* muestra los elementos que conforman la malla, se observa la presencia de elementos pequeños en el interior del reactor.



*Ilustración 5-7 Detalle de malla CutCell en la geometría del reactor.*

La malla que se realizó en el reactor se considera adecuada, debido a las características que enlistan en la Tabla 5-1.

*Tabla 5-1 Valores características de la malla del reactor prototipo*

CONCEPTO	CANTIDAD	CONCEPTO	VALOR
Número de elementos	510,544	Minima calidad ortogonal	0.314
Número de nodos	565,701	Máxima calidad ortogonal	1
	VALOR	Promedio de calidad ortogonal	0.96215
Tamaño máximo de elemento	2.32 mm		
Tamaño mínimo de elemento	0.58 mm		

La malla se considera buena cuando se cumple con la calidad ortogonal. Esta escala está anunciada en la *ilustración 5-8* y es proporcionado por el manual de ANSYS-FLUENT 19.1, la cual muestra escalas de calidad conocida como *Orthogonal Quality*, que se basa en la medición de ortogonalidad de los elementos, para asegurar resultados confiables, siendo el valor 0.1 el mínimo aceptable para la calidad ortogonal.

Inacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.10	0.10-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Ilustración 5-8 Escala de calidad ortogonal

Se considera que la malla es buena debido a los valores mostrados en la Ilustración anterior, teniendo una calidad mínima ortogonal de elemento de 0.314, el cual se considera un calidad “buena” de acuerdo con lo recomendado por ANSYS, Inc., 2013. El 93% de los elementos se encuentra por encima del 0.80 como se muestra en la Ilustración 5-9.

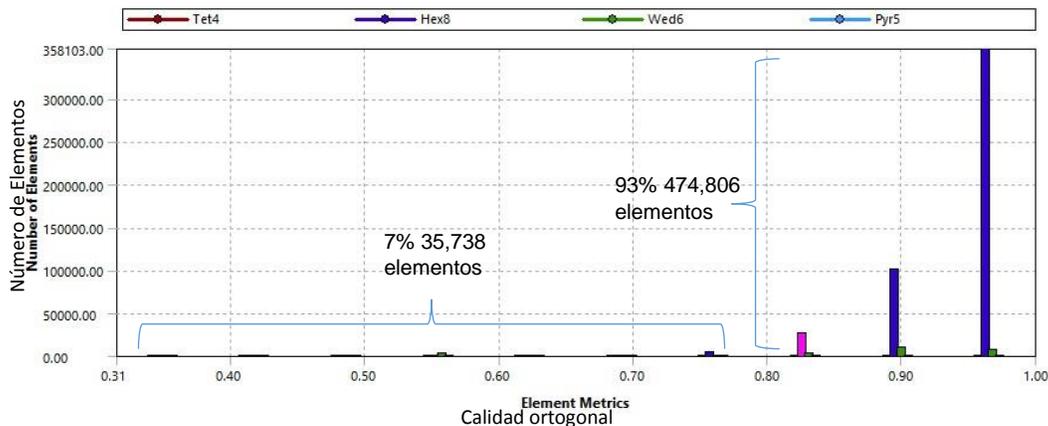


Ilustración 5-9 Gráfica de calidad de elementos

### 5.3.6 Valores de entrada y solución

En este proceso se colocaron las condiciones con las que opera el reactor, así como los datos en entrada, las condiciones de frontera y los modelos matemáticos (entre otros datos). Cabe mencionar que el modelo fue solamente de una fase, por lo que solo fueron introducidos los datos del fluido agua.

Para la etapa de solución en ANSYS-FLUENT se estableció el solucionador basado en presión “pressure based”; posteriormente se colocaron los materiales y sus características que interfieren en el proceso como lo es el agua, cuyo valores de

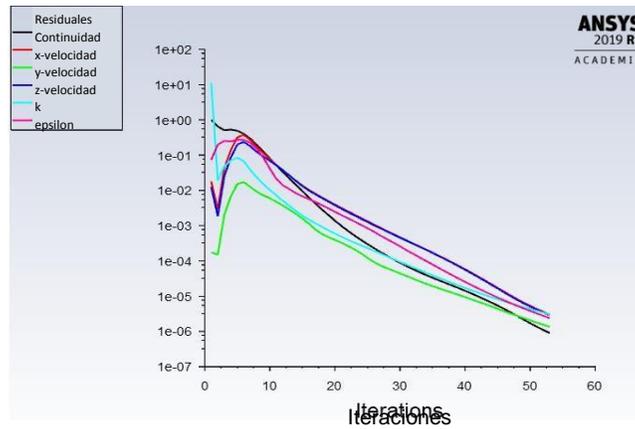
entrada fueron  $998.2 \text{ kg/m}^3$  para la densidad y viscosidad dinámica de  $0.001003 \text{ kg/m-s}$ , declarados los materiales, se procedió a colocar las condiciones de frontera mediante las ecuaciones de continuidad y momentum, además de anexar los diferentes datos de flujo másico con los que operan los diferentes escenarios del modelo original del reactor.

Entre las ecuaciones existentes para el cálculo de la turbulencia, se aplicó el modelo k-Epsilon (K- $\epsilon$ ). Cargados los datos necesarios se procedió al arranque de las condiciones iniciales, para después dar paso a las iteraciones necesarias para que el modelo converja y de esta manera conocer los resultados arrojados por el software. En la *Tabla 5-2* se muestra un resumen de los datos de mayor importancia colocados para la simulación del reactor, mientras en la *Ilustración 5-10* se observa la convergencia de las condiciones de arranque.

*Tabla 5-2 Datos de entrada y convergencia del reactor prototipo*

# DE CAUDAL	CAUDAL EN ML/MIN	FLUJO MÁSIKO KG/S	#ITERACIONES
1	18.33	0.000305	53
2	20.00	0.000332	54
3	23.33	0.000388	53
4	26.67	0.000443	54
5	28.33	0.000471	54

Para la simulación de este reactor, el único valor que cambia es el caudal de entrada que se suministra al reactor, de esta manera se realizaron cinco simulaciones (una por cada caudal). A pesar de que se realizaron las simulaciones con los diferentes caudales todas las imágenes de las iteraciones están basadas en el caudal de 20 ml/min. Lo anterior es debido a que 20 ml/min fue el caudal óptimo en tiempo de permanecía y remoción de contaminantes de la investigación realizada por Carmona (2019).



*Ilustración 5-10 Convergencia de iteraciones del reactor prototipo para caudal de 20ml/min*

La metodología utilizada en la simulación de los siguientes tres reactores (reactor de entrada - salida tangencial, reactor de entrada en arco – salida tangencial y reactor mezclador de entrada – salida perpendicular con mezclador estático interno) es la misma que se utilizó para el reactor original, solamente con variantes de ubicación de piezas y colocación de nuevas piezas. De igual forma cada reactor fue cargado con los mismos 5 caudales, teniendo un total de 20 escenarios.

## 5.4 Simulación de reactores modificados.

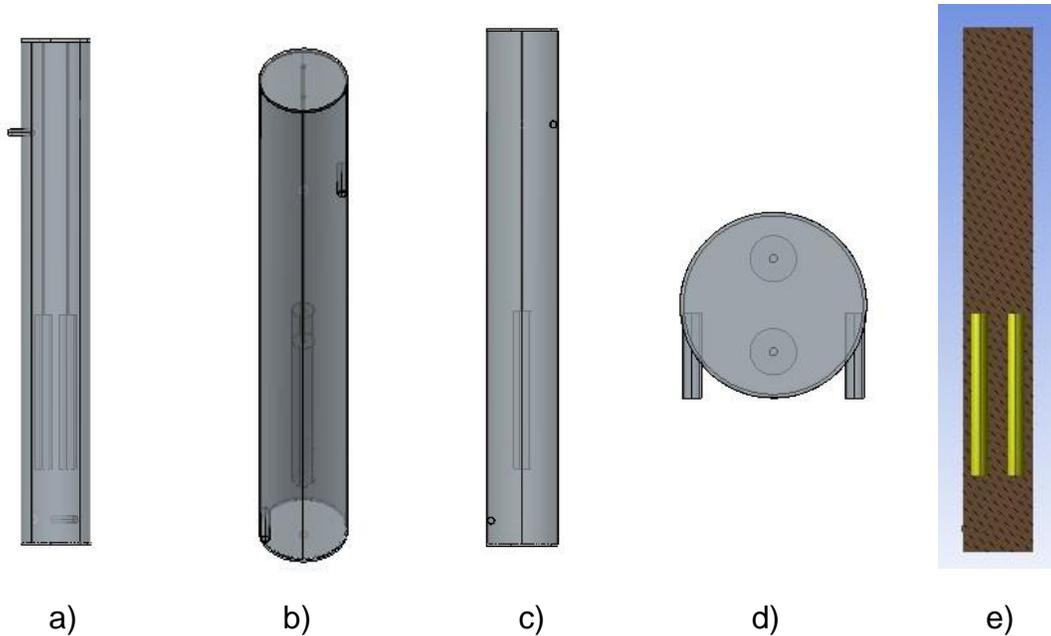
### 5.4.1 Modelo conceptual de los reactores modificados

La *Ilustración 5-11* muestra la propuesta de modificación de la entrada y salida del reactor, conservando sus dimensiones geométricas externas y el volumen del reactor.

Las propuestas de las modificaciones de los reactores tienen la finalidad de crear más energía cinética de turbulencia desde la zona de la entrada hasta la salida, situación que permite una mayor eficiencia en los procesos de electro-coagulación. Para esto fue necesario realizar modificaciones geométricas y de ubicación de elementos, planteando 3 reactores modificados: 1) Reactor de entrada - salida tangencial (R.E.S.T.), (*Ilustración 5-11*); 2) Reactor de entrada en arco – salida

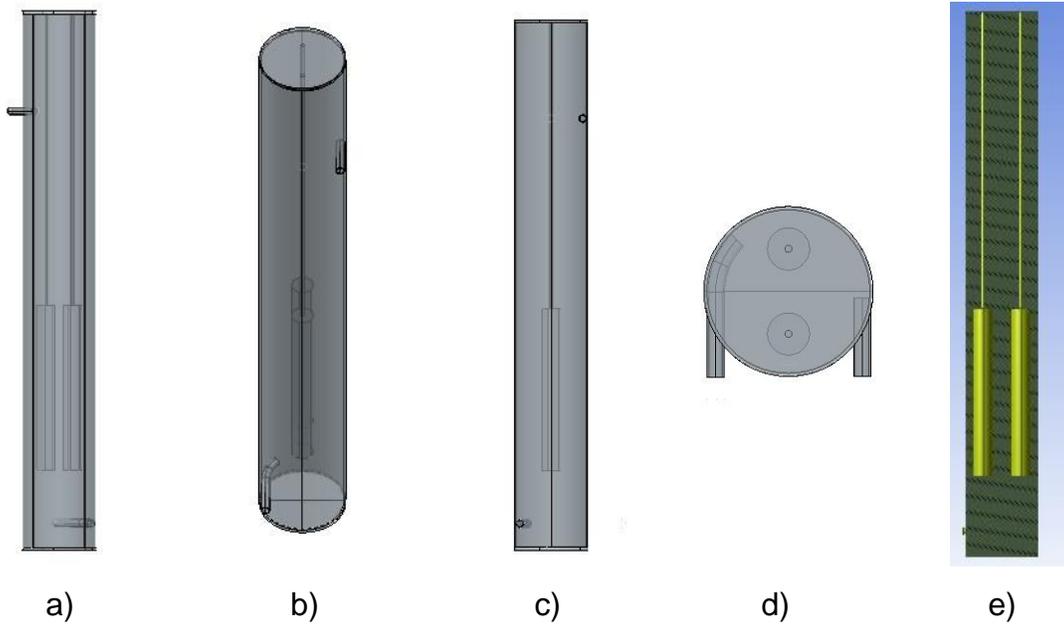
tangencial (R.E.A.S.T.), (*Ilustración 5-12*); 3) Reactor de entrada – salida perpendicular con mezclador estático interno (R.E.S.P.M.), (*Ilustración 5-13*).

En la *Ilustración 5-11* se muestran las diferentes vistas del R.E.S.T., además del detalle de la entrada y salida, así como la configuración de sus elementos.



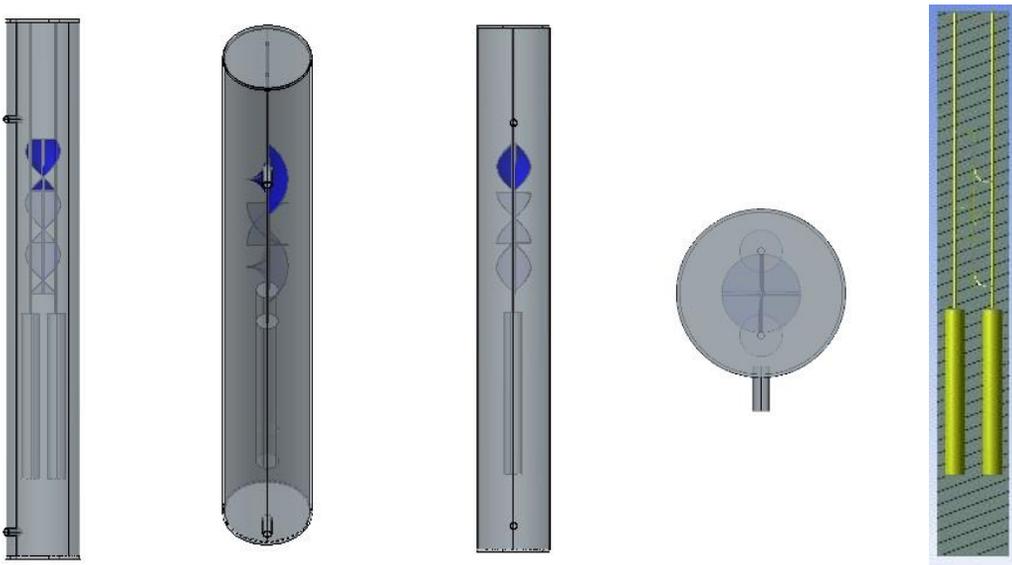
*Ilustración 5-11 Geometría R.E.S.T. a) Vista lateral se aprecia el acomodo de los elementos. b) Vista frontal inclinada, se observa que la entrada y salida se encuentran sobre el mismo sector. c) Imagen frontal, se observa la ubicación tangencial de la entrada y salida del reactor. d) Vista superior. e) Vista transversal, se observan los elementos sólidos dentro del reactor.*

La *Ilustración 5-12* corresponde al R.E.A.S.T., se observa la entrada en arco la cual tiene un desarrollo de  $1/8$  de la circunferencia del reactor.



*Ilustración 5-12 Geometría R.E.A.S.T. a) Se observa el acomodo de los elementos, en la parte baja se aprecia ligeramente la curvatura de la entrada. b) Se observa el desarrollo de la entrada en arco. c) Ubicación tangencial de la entrada y salida. d) Vista superior de la entrada en arco. e) Vista transversal, se observan los elementos sólidos dentro del reactor.*

En la *Ilustración 5-13* se muestra el modelo geométrico para el R.E.S.P.M. Esta propuesta fue establecida como aporte de la presente investigación. El cambio notable en este reactor es la colocación de los mezcladores en la zona intermedia (*ANEXO 5*).



a)

b)

c)

d)

e)

*Ilustración 5-13 Geometría (R.E.S.P.M.). a) Se observa el acomodo de los elementos. b) Se observan los mezcladores anclados entre las varillas, así como la entrada y salida recta en el mismo eje. c) Imagen frontal se observa la ubicación perpendicular de la entrada y salida del reactor, así como los mezcladores. d) Vista se aprecia el área ocupada por los mezcladores, así como su geometría similar a una hélice. e) Vista transversal, se observan los elementos sólidos dentro del reactor.*

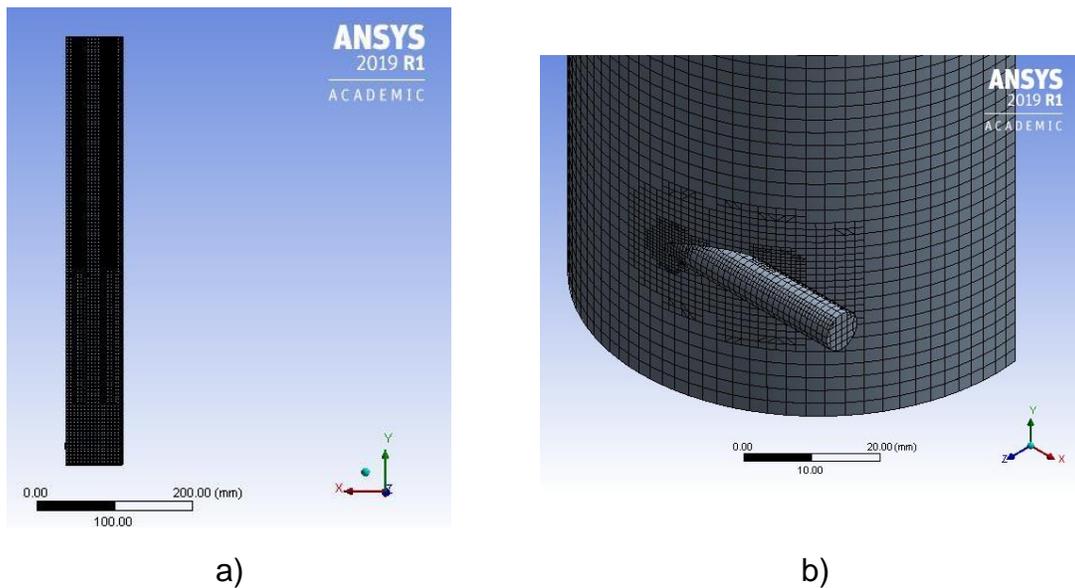
#### **5.4.2 Modelación de los reactores modificados**

La geometría de los reactores modificados, al igual, fue dibujada mediante el software de AutoCAD™. Posteriormente mediante el software CAD SolidWorks™ se procedió a la definición del sólido. Una vez obtenido el sólido la geometría fue exportada al software de ANSYS-FLUENT. Con la geometría exportada se procedió a nombrar los puntos de entra y salida, después se llenó el reactor en las mismas zonas que el primer reactor y se procedió a la colocación de la malla.

### 5.4.3 Establecimiento de la malla de los reactores modificados

El método CutCell fue utilizado para la realización de la malla de todos los reactores. Esta generó que se tuviera una malla con similares características entre todos los reactores, pero diferente en su cantidad de nodos y elementos. En las *ilustraciones 5-14, 5-16 y 5-18* se observa la malla en los distintos reactores, mientras en las *ilustraciones 5-15, 5-17 y 5-19* se observa la cantidad de elementos y su calidad.

La *Ilustración 5-14* muestran la malla realizada y los datos recabados para el R.E.S.T.



*Ilustración 5-14 Malla R.E.S.T. a) Se observa una malla uniforme en el interior del reactor, con hexaedros de menor tamaño en el área del ánodo y cátodo. b) Se observa la malla en la entrada tangencial del reactor con más elementos refinados.*

Para este reactor la malla cumplió con las características necesarias para considerarse adecuada (*Ilustración 5-8*). La *Tabla 5-3* muestra los valores principales con los que cuenta la malla.

*Tabla 5-3 Valores de la malla del R.E.S.T.*

CONCEPTO	CANTIDAD	CONCEPTO	VALOR
Número de elementos	498,477	Minima calidad ortogonal	0.17
Número de nodos	554,242	Máxima calidad ortogonal	1

	VALOR	Promedio de calidad ortogonal	0.96142
Tamaño máximo de elemento	2.32 mm		
Tamaño mínimo de elemento	0.58 mm		

62

La malla se consideró buena con base en los valores anteriores, teniendo un mínimo de 0.17 que se considera una calidad buena, cabe mencionar que el 93.34% de los elementos se encuentra por encima del 0.8 (Ilustración 5-15).

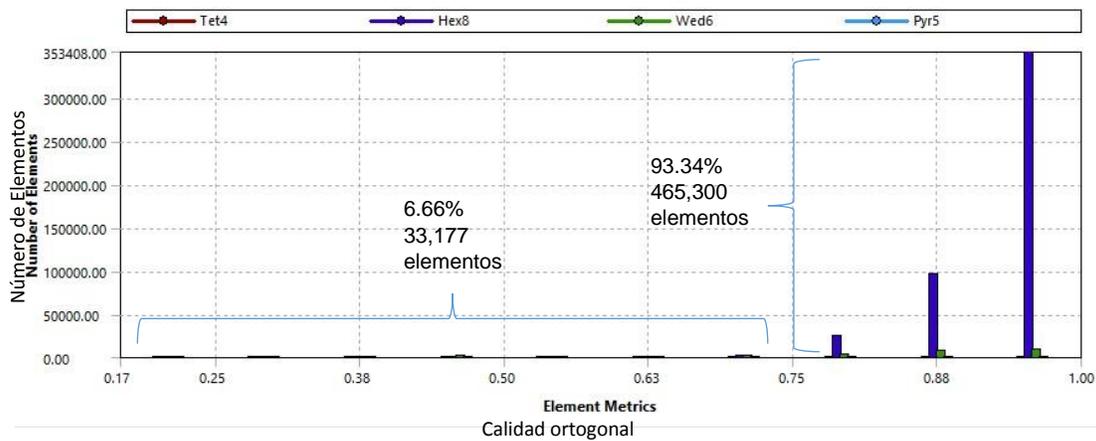
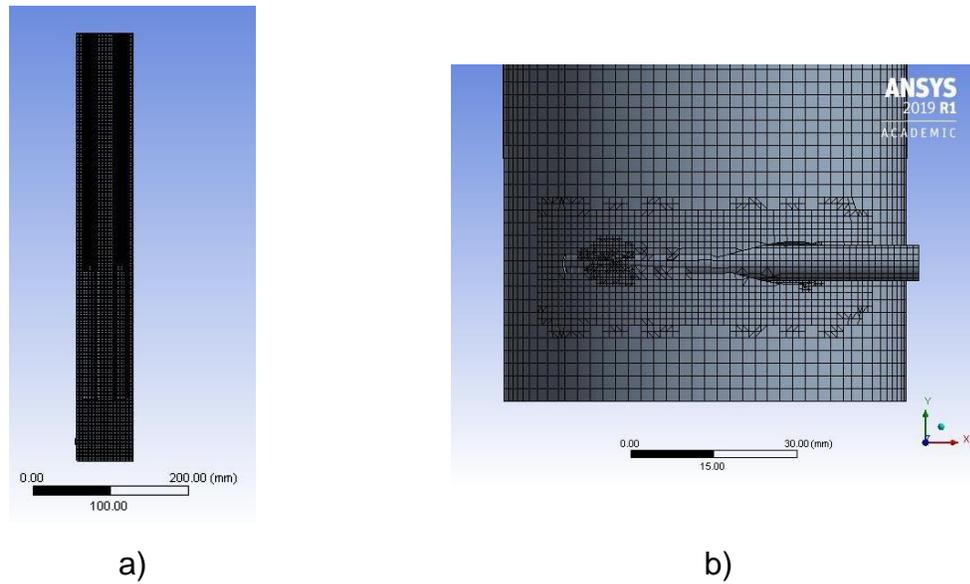


Ilustración 5-15 Gráfica de calidad de los elementos para el R.E.S.T.

La malla realizada y los datos de interés para el R.E.S.T. se muestra a continuación. En la Ilustración 5-16 se observa la calidad de la malla y un mayor refinamiento en la zona de las varillas y de la entrada del reactor.



*Ilustración 5-16 Malla del R.E.A.S.T. a) Se observa una malla uniforme, la malla se encuentra más refinada en la parte de entrada y salida. b) Se observa la entrada en arco al reactor y su acoplamiento a la pared.*

Tabla 5-4 muestra los valores principales de la malla.

*Tabla 5-4 Valores de la malla del R.E.A.S.T.*

CONCEPTO	CANTIDAD	CONCEPTO	VALOR
Número de elementos	502,829	Minima calidad ortogonal	0.05
Número de nodos	559,622	Máxima calidad ortogonal	1
	VALOR	Promedio de calidad ortogonal	0.96032
Tamaño máximo de elemento	2.32 mm		
Tamaño mínimo de elemento	0.58 mm		

Con los resultados arrojados en el proceso de discretización, se considera que la malla es de una calidad regular, derivado de que se obtuvieron valores de un mínimo de 0.05, pero se considera aceptable ya que éstos elementos solo representan el 1.78%, el 98.22% de los elementos se encuentra por encima del 0.85 como se muestra a continuación en la *Ilustración 5-17*.

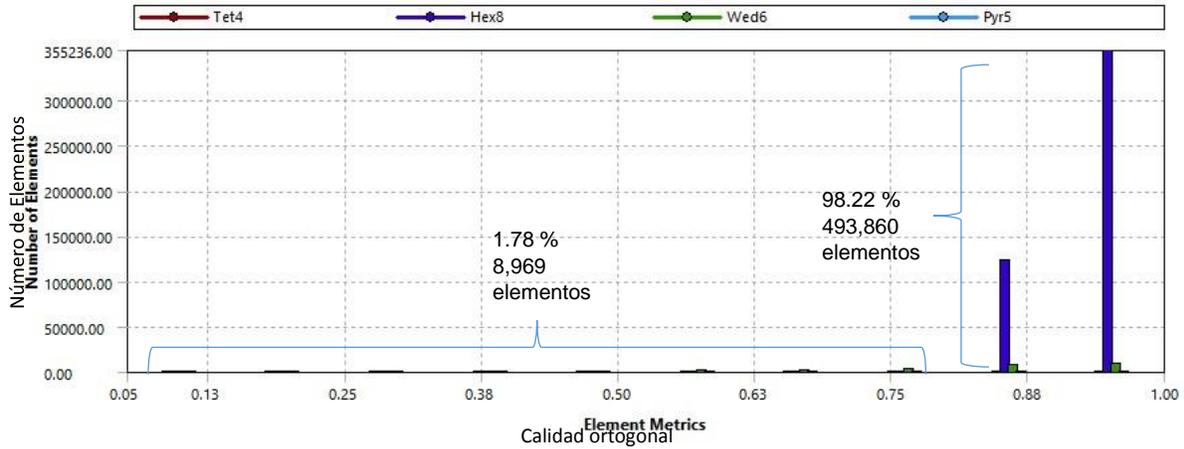
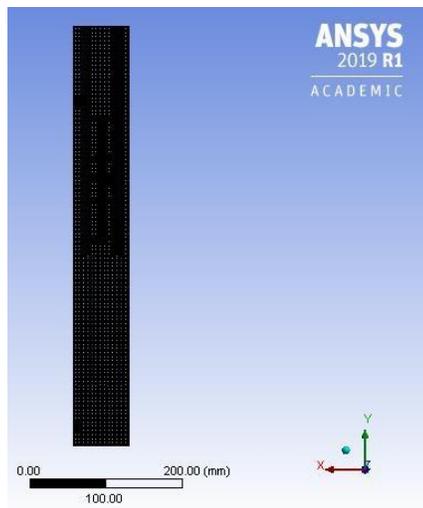


Ilustración 5-17 Gráfica de calidad de los elementos para el R.E.A.S.T.

Para la realización de la malla en el R.E.S.P.M., fue necesario considerar el detalle de la geometría del mezclador estático, por lo cual existe una variación mayor en la calidad ortogonal de la malla, específicamente en el tamaño máximo y mínimo de los elementos las cuáles se describirán a continuación.

64

En la *Ilustración 5-18* se muestra el detalle de la malla para el R.E.S.P.M. Se puede observar un mayor refinamiento en la zona de los mezcladores, comparado con el exterior y zonas laterales internas del reactor.



a)

b)

*Ilustración 5-18 Malla R.E.S.P.M. a) Vista de la zona central del reactor. b) Se observa el refinamiento en la zona del mezclador, la unión de este con las varillas.*

En este caso las características de la malla varían debido a la colocación de los mezcladores, reduciendo un poco su calidad, pero teniendo valores aceptables que hacen que la malla sea adecuada. En la *Tabla 5-5* se muestran los valores principales de la malla.

*Tabla 5-5 Valores de la malla del R.E.S.P.M.*

CONCEPTO	CANTIDAD	CONCEPTO	VALOR
Número de elementos	440,985	Minima calidad ortogonal	0.05
Número de nodos	462,632	Máxima calidad ortogonal	1
	VALOR	Promedio de calidad ortogonal	0.95608
Tamaño máximo de elemento	2.00 mm		
Tamaño mínimo de elemento	1.00 mm		

Se cataloga como una malla regular debido a los valores anteriores, aunque se tengan valores de un mínimo de 0.05 se considera un valor aceptable ya que representan el 6.41%, el 93.59 % de los elementos se encuentra arriba del 0.85 como se muestra a continuación en la *Ilustración 5-19*.

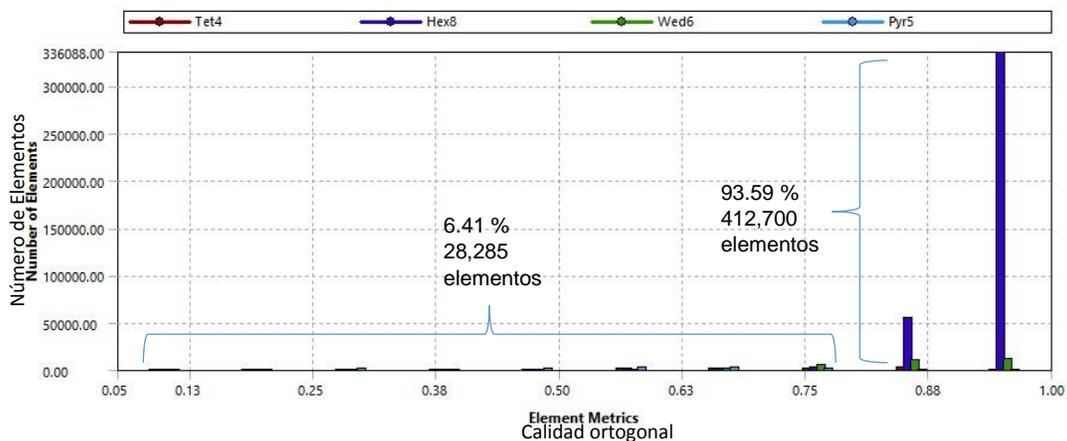


Ilustración 5-19 Gráfica de calidad de los elementos para el reactor R.E.S.P.M.

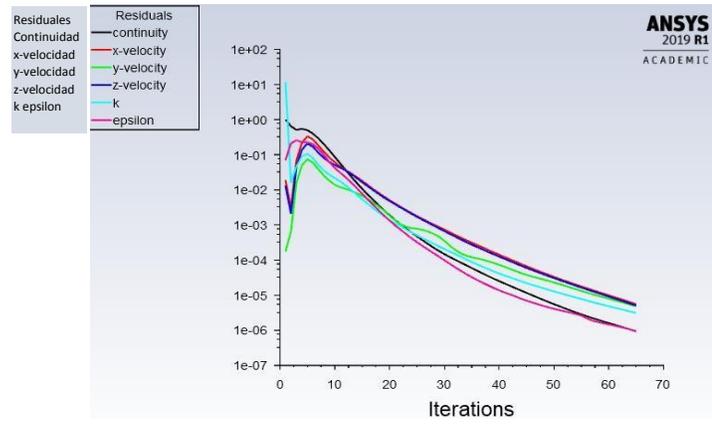
#### 5.4.4 Valores de entrada y solución de los reactores modificados

En este apartado se colocaron para todos los reactores modificados las mismas condiciones de operación, condiciones de frontera y los modelos matemáticos que rigen el comportamiento del flujo.

Cabe mencionar que para todos los reactores fueron introducidos 5 flujos másicos, para su posterior comparación entre ellos. Al igual que en el R.E.S.P. se introdujo los datos para el agua residual de 998.2 kg/m<sup>3</sup> para la densidad y 0.001003 kg/m-s para la viscosidad dinámica. Los valores de los caudales colocados siguen siendo los mismos como se observan en la *Tabla 5-6*, todos las simulaciones convergieron cuando los valores residuales llegaron a 1x10<sup>-3</sup>. En las *ilustraciones 5-20, 5-21 y 522* se observan el proceso de iteración por reactor.

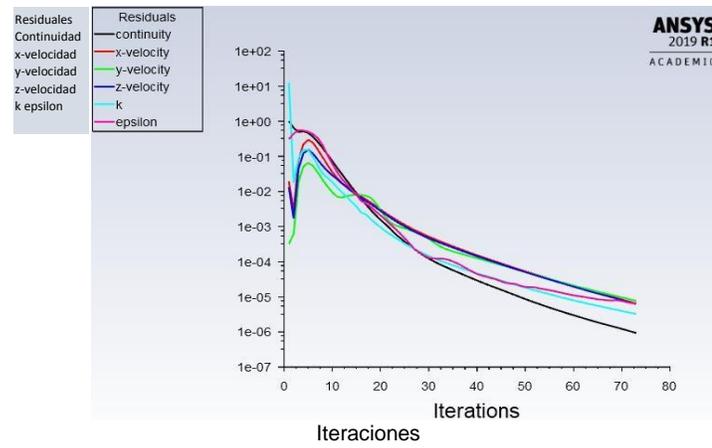
Tabla 5-6 Datos de entrada para los reactores modificados.

# DE CAUDAL	CAUDAL EN ML/MIN	FLUJO MÁSIKO KG/S
1	18.33	0.000305
2	20.00	0.000332
3	23.33	0.000388
4	26.67	0.000443
5	28.33	0.000471



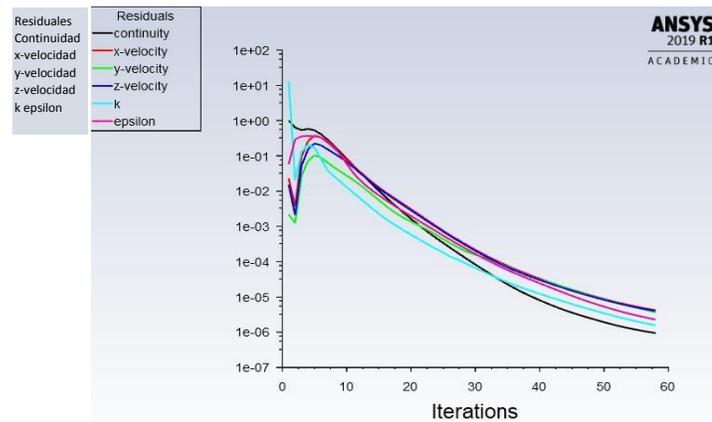
Iteraciones

Ilustración 5-20 Proceso de iteraciones del R.E.S.T. para el caudal de 20 ml/min



Iteraciones

Ilustración 5-21 Proceso de iteraciones del R.E.A.S.T. para el caudal de 20 ml/min



Iteraciones

Iteraciones

*Ilustración 5-22 Proceso de iteraciones del R.E.S.P.M. para el caudal de 20 ml/min*



## 6 CAPÍTULO 6

# RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se hace una comparación de los resultados de los diversos reactores que fueron propuestos y simulados. Como se había mencionado, los resultados de interés son los perfiles de velocidad total, velocidad vertical y campos de energía cinética de turbulencia, siendo este último el parámetro principal a evaluar. Esto se debe a que la turbulencia genera las diversas propuestas a la modificación de elementos de entrada y salida, además de la colocación del mezclador estático en el último reactor.

Los resultados se muestran en dos apartados, en el primero se realiza la comparación de resultados entre el reactor prototipo con entrada y salida perpendicular (R.E.S.P.) versus el (R.E.S.T.) y el (R.E.A.S.T.) En el segundo apartado se compara el (R.E.S.P.) versus el (R.E.S.P.M.).

### **6.1 Comparación de resultados entre el R.E.S.P. y los reactores con distintas configuraciones geométricas de entrada y salida**

En este apartado se muestran los resultados de manera gráfica. Los campos y perfiles de velocidad total, velocidad vertical y energía cinética de turbulencia para diversos caudales y para cada uno de los reactores analizados. También se presentan las tablas y gráficas comparativas entre ellos. Los resultados obtenidos en la simulación son valores muy cercanos a la experimentación física, que justifican el uso del software para el análisis, simulación y procesamiento de resultados para este tipo de reactores; lo cual eliminó la necesidad de construir varios modelos con modificaciones, ya que el software tuvo la capacidad de simularlos.

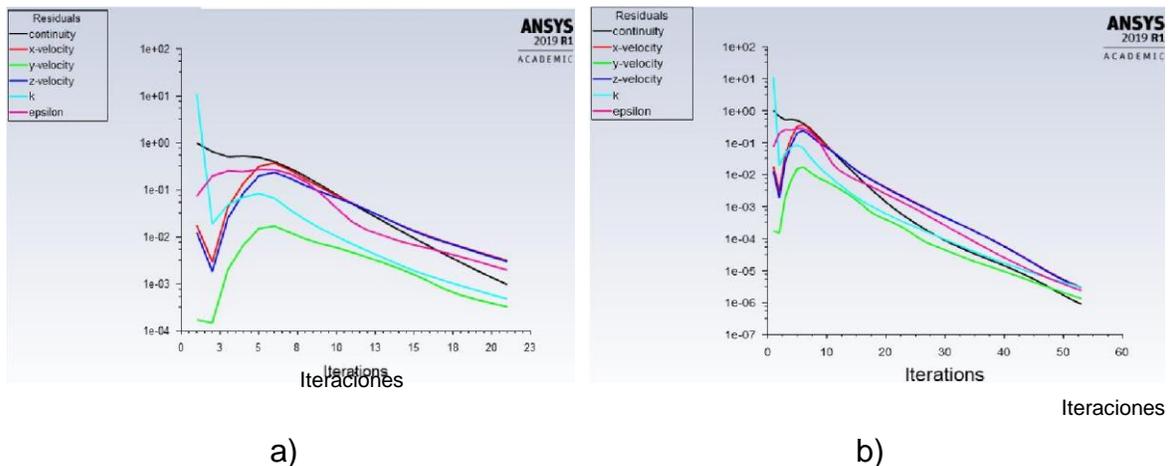
---

---

Como se mencionó anteriormente, al terminar de realizar la simulación de todos los reactores, los modelos convergieron, es decir se obtuvieron los valores de los

## CAPÍTULO 6: RESULTADOS Y ANÁLISIS

residuales para las ecuaciones de continuidad, momentum y turbulencia, con valores de  $1 \times 10^{-3}$ . Para asegurar la conservación de masa, en las simulaciones fue establecido el criterio de residual en  $1 \times 10^{-6}$ , mientras que los demás parámetros lograban alcanzar un valor menor a  $1 \times 10^{-5}$ , teniendo un comportamiento final asintótico, por lo cual no presenta cambios drásticos en la solución final. Se realizó adicionalmente un balance de flujo másico (resultado de la simulación) y se obtuvo un equilibrio en el flujo de entrada (*in*) con el de salida (*outlet*) garantizando que existe continuidad en el sistema. En la *Ilustración 6-1* se observa un proceso de iteraciones en el cuál los residuales van disminuyendo hasta converger.



*Ilustración 6-1* Proceso de convergencia. a) Inicio de iteraciones para convergencia del modelo, b) Convergencia del modelo

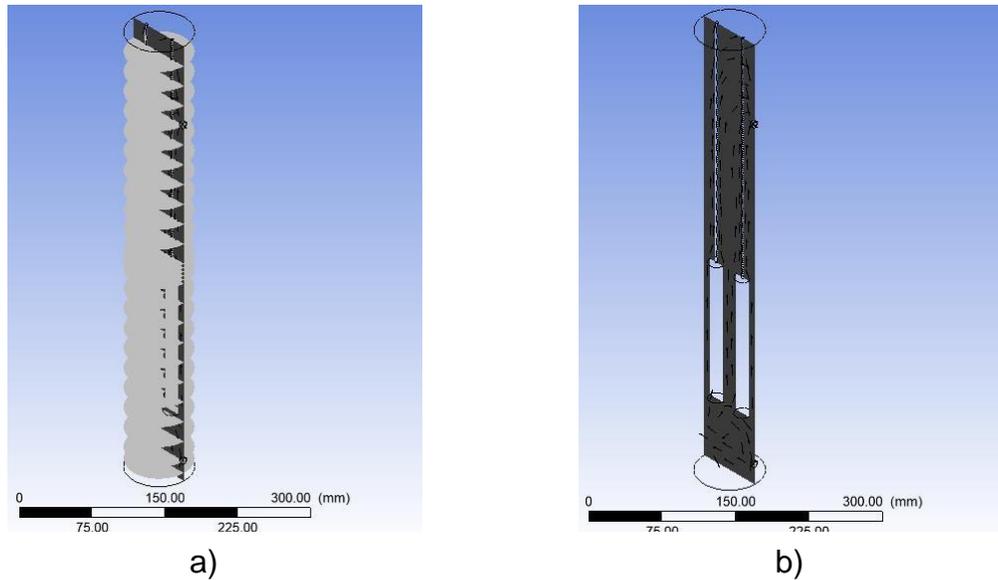
La obtención de los resultados se realizó colocando planos dentro del reactor de forma transversal. Estos planos se ubicaron a diferentes alturas desde 1 cm (parte inferior del reactor) hasta una altura de 52.5 cm (parte superior del reactor), así

---

---

como se aprecia en la *Ilustración 6-2*. Esto se realizó para tener resultados más precisos y obtener un promedio de los valores en cada sección.

## CAPÍTULO 6: RESULTADOS Y ANÁLISIS



*Ilustración 6-2 Planos de corte sobre los reactores. a) Cortes transversales, b) Cortes longitudinales*

Se colocaron adicionalmente planos de análisis coincidentes con las zonas críticas, como lo son la entrada, la salida y la parte superior e inferior de los electrodos. Esta última zona delimita el área transversal que se ve disminuida por la presencia de dichos componentes.

Una vez que se ubicaron los planos de análisis, se procedió a obtener los resultados de velocidad total, velocidad vertical y energía cinética de turbulencia. Con ello se procedió a verificar la hidrodinámica dentro del reactor, y realizar modificaciones geométricas que permitieron tener una mayor turbulencia en el reactor y así lograr las condiciones para garantizar la mezcla y el proceso de coagulación de partículas, principal función del reactor.

Para cada variable se realizó una tabla y gráfica comparativa para los 5 caudales de operación del reactor, sin embargo los contornos de las variables solo fueron

---

---

comparados para el caudal de 20.00 ml/min (valor adecuado para el proceso electroquímico que permite la permanencia del agua por un tiempo de 1 hora dentro del reactor) y el caudal máximo de 28.33 ml/min (Carmona, 2019).

## CAPÍTULO 6: RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 6.1.1 Velocidad total R.E.S.P.

En la *Tabla 6-1* se muestran los resultados de velocidad total máxima y promedio para los 5 caudales del R.E.S.P. (caudal 1=18.33 ml/min, caudal 2=20.00 ml/min, caudal 3=23.33 ml/min, caudal 4=26.67 ml/min y caudal 5=28.33 ml/min), de esta forma se conoce las velocidades máximas y promedio para cada altura del reactor.

La *Ilustración 6-3*, muestra los perfiles de velocidad total promedio para los 5 caudales (lado izquierdo), del lado derecho es la velocidad máxima. Cada punto en las líneas de las gráficas refleja el promedio de los puntos de un plano transversal ubicado a cada altura del reactor. Los valores anteriores a los 10 cm de altura no se toman en cuenta debido a la fluctuación de velocidad ocasionada por los efectos de energía cinética turbulenta, por lo que no es representativo tener un valor promedio de velocidad total en dicha zona, además de que en los primeros 8 cm no existe mezcla con los reactivos. Tampoco se encuentran graficados los valores mayores a 40 cm, ya que a 42.5 cm se encuentra la salida y el valor tampoco es representativo. Lo anterior debido a que después de este punto los valores son muy pequeños y casi nulos, por lo cual observamos que el reactor expulsa el fluido justo al llegar al orificio de salida.

En los perfiles se observa que la tendencia y comportamiento de la velocidad es similar para todos los caudales analizados. Únicamente se observa un desplazamiento del perfil cuando se tiene un aumento del caudal.



## CAPÍTULO 6: RESULTADOS Y ANÁLISIS

*Tabla 6-1 Valores de velocidad total promedio y máxima de todos los caudales de entrada. (Los resultados de velocidad a cada altura están dados en mm/seg).*

REACTOR PROTOTIPO											
VELOCIDAD TOTAL PROMEDIO						VELOCIDAD TOTAL MÁXIMA					
ALTURA (CM)	CAUDAL 1	CAUDAL 2	CAUDAL 3	CAUDAL 4	CAUDAL 5	ALTURA (CM)	CAUDAL 1	CAUDAL 2	CAUDAL 3	CAUDAL 4	CAUDAL 5
1.00	0.337	0.379	0.463	0.549	0.591	1.00	0.725	0.828	1.038	1.258	1.416
2.50	1.500	1.650	1.957	2.260	2.409	2.50	12.800	13.900	15.989	18.071	19.093
5.00	0.286	0.311	0.359	0.407	0.431	5.00	1.010	1.150	1.419	1.680	1.807
7.50	0.159	0.178	0.217	0.257	0.277	7.50	0.404	0.452	0.554	0.656	0.711
10.00	0.072	0.079	0.093	0.106	0.114	10.00	0.182	0.198	0.232	0.267	0.285
12.50	0.072	0.078	0.091	0.104	0.111	12.50	0.183	0.200	0.233	0.266	0.282
15.00	0.072	0.078	0.091	0.104	0.111	15.00	0.184	0.200	0.234	0.267	0.283
17.50	0.072	0.078	0.091	0.104	0.111	17.50	0.184	0.200	0.234	0.267	0.284
20.00	0.072	0.078	0.091	0.104	0.111	20.00	0.184	0.200	0.234	0.267	0.284
22.50	0.072	0.078	0.091	0.104	0.111	22.50	0.184	0.200	0.233	0.267	0.283
25.00	0.029	0.032	0.037	0.042	0.045	25.00	0.177	0.193	0.225	0.258	0.274
25.50	0.046	0.050	0.058	0.066	0.070	25.50	0.169	0.184	0.216	0.248	0.263
26.00	0.053	0.057	0.067	0.076	0.080	26.00	0.160	0.175	0.204	0.235	0.250
26.50	0.057	0.062	0.072	0.082	0.087	26.50	0.152	0.167	0.195	0.224	0.238
27.00	0.059	0.065	0.075	0.086	0.091	27.00	0.148	0.162	0.189	0.216	0.230
27.50	0.061	0.066	0.077	0.088	0.093	27.50	0.147	0.160	0.187	0.214	0.227
30.00	0.062	0.068	0.079	0.091	0.096	30.00	0.152	0.166	0.194	0.221	0.235
32.50	0.062	0.068	0.079	0.091	0.096	32.50	0.153	0.167	0.194	0.222	0.236
35.00	0.062	0.068	0.079	0.091	0.096	35.00	0.153	0.167	0.194	0.222	0.236
37.50	0.062	0.068	0.079	0.091	0.096	37.50	0.152	0.166	0.194	0.222	0.236
40.00	0.063	0.069	0.080	0.091	0.097	40.00	0.151	0.165	0.193	0.220	0.234
42.50	0.068	0.075	0.087	0.100	0.106	42.50	0.143	0.157	0.184	0.212	0.225

45.00	0.312	0.339	0.393	0.447	0.474	45.00	14.600	15.900	18.344	20.796	22.006
47.50	0.021	0.023	0.026	0.030	0.032	47.50	0.064	0.070	0.082	0.094	0.100
50.00	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004	50.00	0.007	0.007	0.009	0.010	0.010
52.50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	52.50	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

## CAPÍTULO 6: RESULTADOS Y ANÁLISIS

---

---

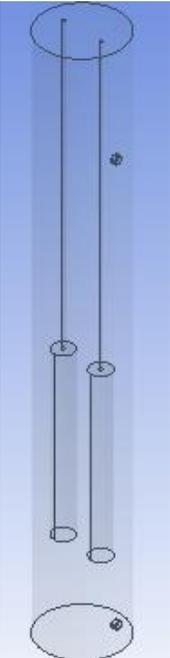
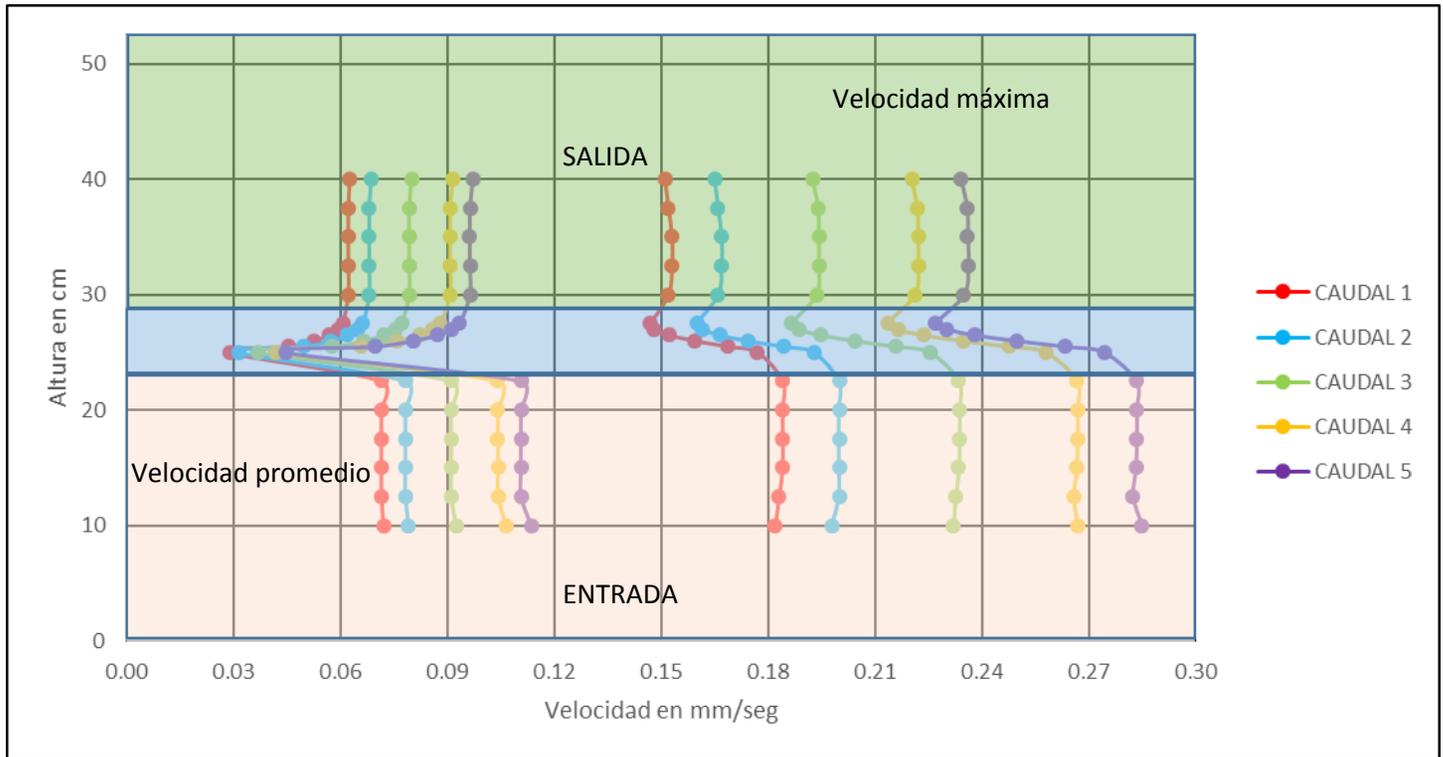
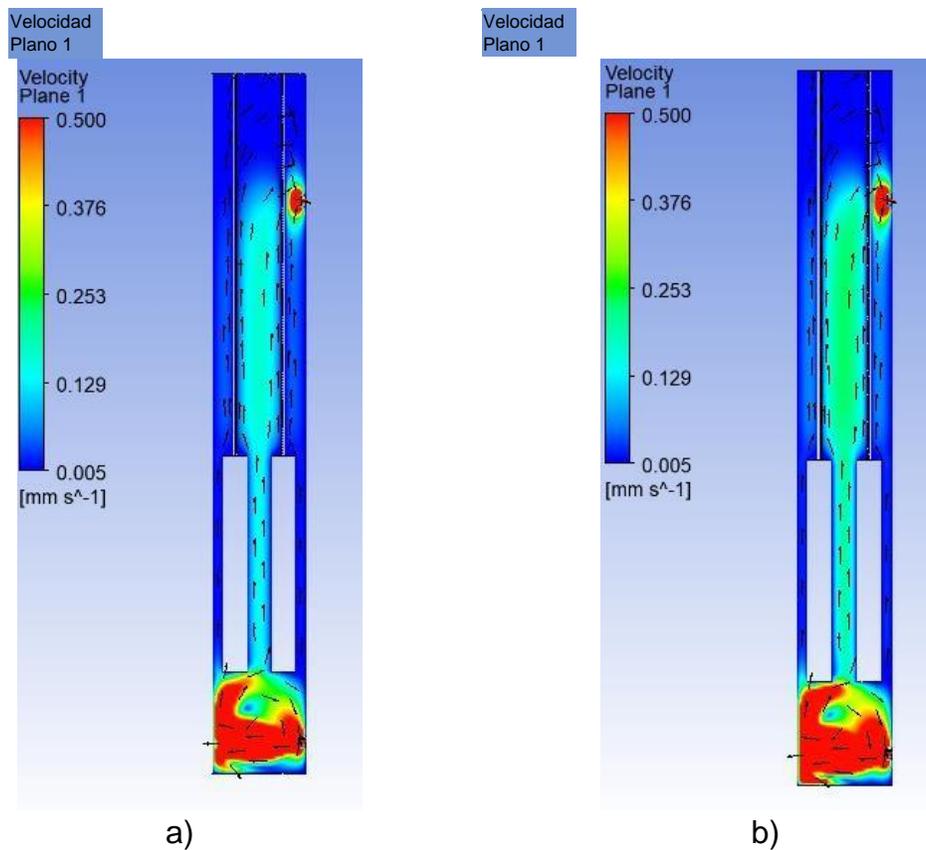


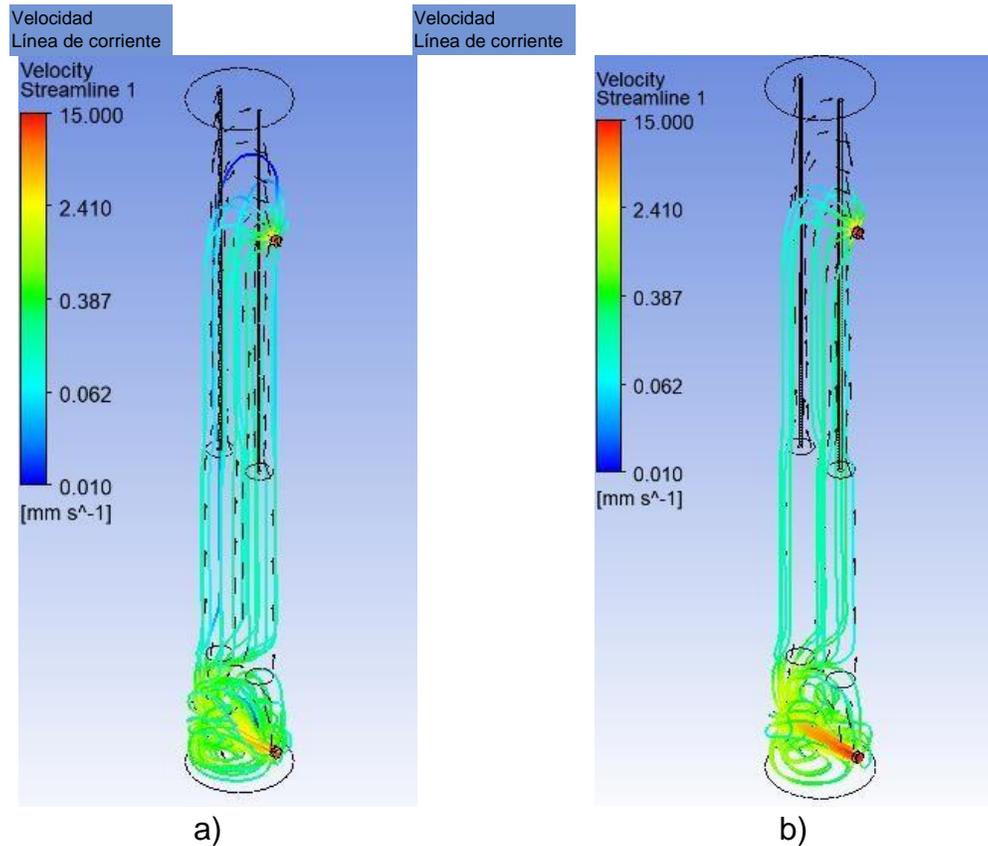
Ilustración 6-3 Perfil de velocidad total máxima y promedio para el R.E.S.P., para distintos caudales de operación.

Con el fin de realizar una comparación se muestra en la *Ilustración 6-4* el contorno de velocidad total a) para el reactor de 20.00 ml/min, se observa una ligera diferencia con el contorno de velocidad total b) para el caudal de 28.33 ml/min en la zona de entrada, manteniéndose uniforme en los costados del ánodo y cátodo. El campo de velocidades es muy similar debido al poco aumento en el caudal. Las diferencias en las velocidades pueden apreciarse de mejor manera en los perfiles verticales *Ilustración 6-3*. Además, el aumento del caudal no cambia de forma significativa los campos de velocidad o turbulencia, pese al cambio de velocidad lo que denota el requerimiento de modificaciones en la geometría. Esto justificó las propuestas planteadas para las distintas geometrías del reactor y el mezclador estático en la parte interna.



*Ilustración 6-4 Comparación de contornos de velocidad total R.E.S.P.*

Para tener una vista mejor del recorrido del fluido se muestra las líneas de corriente que comienzan en la entrada del reactor hasta la salida del mismo. La *Ilustración 65 a)* corresponde al caudal 20.00 ml/min, y la *Ilustración b)* muestra el caudal de 28.33 ml/min.



*Ilustración 6-5 Comparación de líneas de corriente de velocidad total R.E.S.P.*

Como se puede observar tanto en la *Tabla 6-1* como en las ilustraciones, especialmente en la *Ilustración 6-3* se aprecia la diferencia en la velocidad total entre los caudales, teniendo un aumento de velocidad entre el segundo y quinto caudal simulado.

### 6.1.2 Velocidad vertical R.E.S.P.

De acuerdo con los valores observado en el flujo dentro del reactor, se muestran únicamente los datos de velocidad vertical relativa  $v$  (componente vertical de la

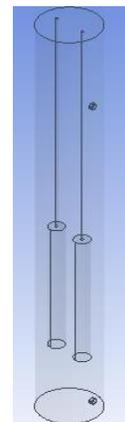
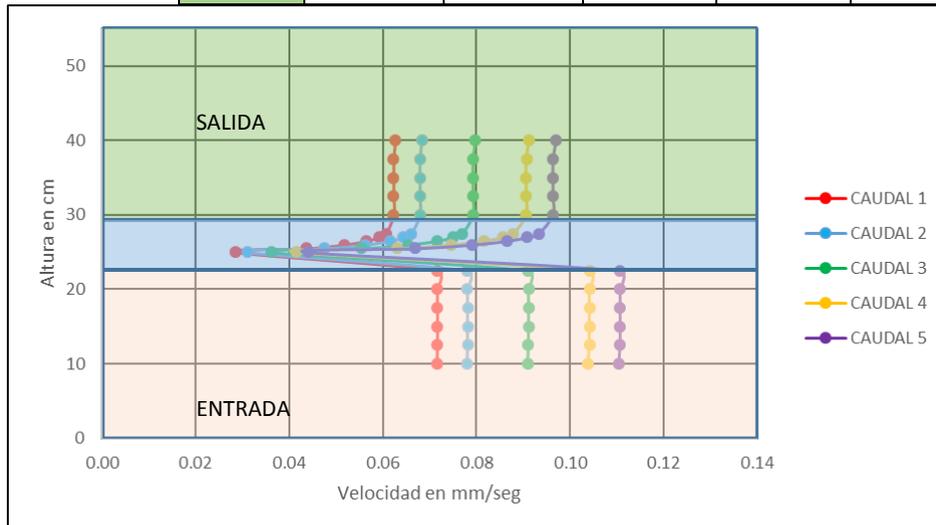
velocidad en dirección  $y$ ). En los resultados se observó que las velocidades  $u$  y  $w$ , componentes de la velocidad en dirección  $x$  y  $z$ , respectivamente, tienen una aportación menor al 2% en la velocidad total del flujo. Por lo cual no fueron consideradas para el análisis, al no influir significativamente en los resultados. Así se establece que la velocidad ascendente,  $v$ , es la que domina en el flujo dentro del reactor.

En la *Tabla 6-2* se muestran los valores de velocidad vertical relativa (diferencia de velocidades positivas y negativas). Mientras que en la *Ilustración 6-6* se observa gráficamente el comportamiento de la velocidad vertical relativa a diferentes alturas del reactor.

*Tabla 6-2 Velocidad vertical promedio a diferentes alturas, R.E.S.P. (Resultados en mm/seg)*

## CAPÍTULO 6: RESULTADOS Y ANÁLISIS

ALTURA (CM)	CAUDAL 1	CAUDAL 2	CAUDAL 3	CAUDAL 4	CAUDAL 5
10.00	0.072	0.078	0.091	0.104	0.110
12.50	0.072	0.078	0.091	0.104	0.111
15.00	0.072	0.078	0.091	0.104	0.111
17.50	0.072	0.078	0.091	0.104	0.111
20.00	0.072	0.078	0.091	0.104	0.111
22.50	0.072	0.078	0.091	0.104	0.111
25.00	0.029	0.031	0.036	0.041	0.044
25.50	0.044	0.048	0.055	0.063	0.067
26.00	0.052	0.056	0.065	0.075	0.079
26.50	0.057	0.062	0.072	0.082	0.087
27.00	0.059	0.064	0.075	0.086	0.091
27.50	0.061	0.066	0.077	0.088	0.093
30.00	0.062	0.068	0.079	0.091	0.096
32.50	0.062	0.068	0.079	0.091	0.096
35.00	0.062	0.068	0.079	0.091	0.096
37.50	0.062	0.068	0.079	0.091	0.096
40.00	0.063	0.068	0.080	0.091	0.097



*Ilustración 6-6 Perfil de velocidad vertical promedio, R.E.S.P.*

En la *Tabla 6-3* se muestran los datos de velocidad vertical positiva, en el reactor original. En la *Ilustración 6-7* se observa que los perfiles tienen un comportamiento y tendencia similar a los valores de la *Ilustración 6-6*. Esto indica que las velocidades predominantes son las de ascenso, y aquellas magnitudes con signo negativo correspondientes a las velocidades de descenso no son significativas. Esto significa que no existe un flujo vertical de descenso representativo del reactor. Por ello el flujo dominante es el ascendente en sentido vertical. Derivado de ello, se consideró tomar únicamente las velocidades verticales relativas para resultados posteriores.

Tabla 6-3 Valores de velocidad vertical positiva a diferentes alturas, R.E.S.P. (Resultados en mm/seg)

ALTURA (CM)	CAUDAL 1	CAUDAL 2	CAUDAL 3	CAUDAL 4	CAUDAL 5
10.00	0.087	0.095	0.111	0.127	0.134
12.50	0.087	0.095	0.111	0.127	0.135
15.00	0.087	0.095	0.111	0.127	0.135
17.50	0.087	0.095	0.111	0.127	0.135
20.00	0.087	0.095	0.111	0.127	0.135
22.50	0.087	0.095	0.111	0.127	0.135
25.00	0.082	0.090	0.105	0.120	0.127
25.50	0.047	0.051	0.060	0.068	0.072
26.00	0.056	0.061	0.071	0.081	0.085
26.50	0.061	0.066	0.077	0.088	0.093
27.00	0.064	0.070	0.081	0.092	0.098
27.50	0.065	0.071	0.083	0.095	0.101
30.00	0.067	0.073	0.086	0.098	0.104
32.50	0.067	0.073	0.086	0.098	0.104
35.00	0.067	0.073	0.086	0.098	0.104
37.50	0.067	0.073	0.086	0.098	0.104
40.00	0.068	0.074	0.086	0.099	0.104

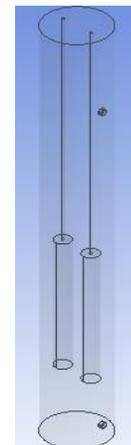
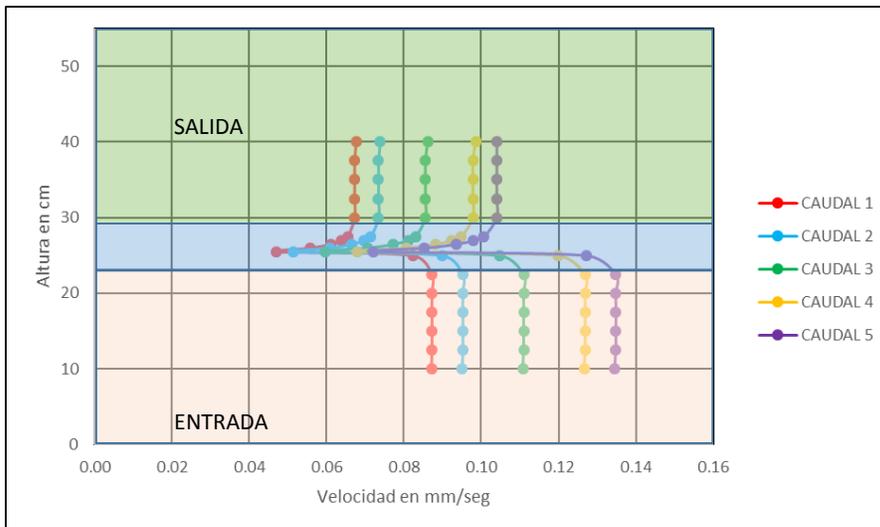


Ilustración 6-7 Perfil de velocidad vertical positiva, R.E.S.P.

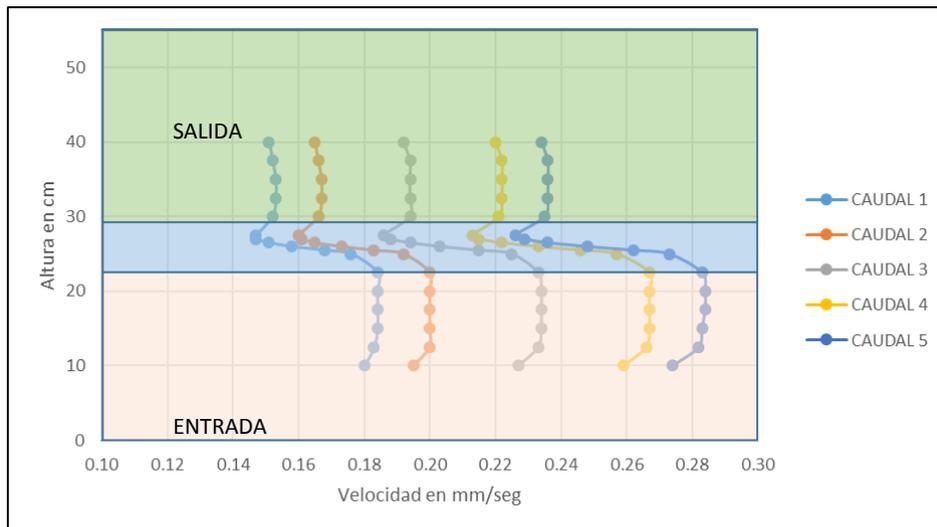
La *Tabla 6-4* y la *Ilustración 6-8* muestran los datos de velocidad vertical máxima para el R.E.S.P. Estos datos permiten identificar la velocidad máxima de ascenso que se presenta dentro del reactor y así determinar si la velocidad es adecuada para los procesos de coagulación.

Tabla 6-4 Valores de velocidad vertical máxima a diferentes alturas, R.E.S.P. (Resultados en mm/seg)

ALTURA (CM)	REACTOR 1	REACTOR 2	REACTOR 3	REACTOR 4	REACTOR 5
-------------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

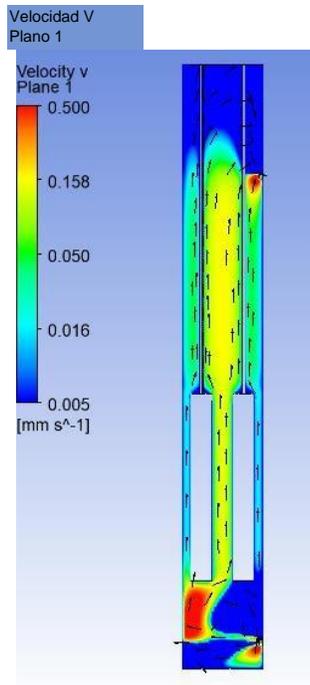
## CAPÍTULO 6: RESULTADOS Y ANÁLISIS

10.00	0.180	0.195	0.227	0.259	0.274
12.50	0.183	0.200	0.233	0.266	0.282
15.00	0.184	0.200	0.234	0.267	0.283
17.50	0.184	0.200	0.234	0.267	0.284
20.00	0.184	0.200	0.234	0.267	0.284
22.50	0.184	0.200	0.233	0.267	0.283
25.00	0.176	0.192	0.225	0.257	0.273
25.50	0.168	0.183	0.215	0.246	0.262
26.00	0.158	0.173	0.203	0.233	0.248
26.50	0.151	0.165	0.194	0.222	0.236
27.00	0.147	0.161	0.188	0.215	0.229
27.50	0.147	0.160	0.186	0.213	0.226
30.00	0.152	0.166	0.194	0.221	0.235
32.50	0.153	0.167	0.194	0.222	0.236
35.00	0.153	0.167	0.194	0.222	0.236
37.50	0.152	0.166	0.194	0.222	0.236
40.00	0.151	0.165	0.192	0.220	0.234

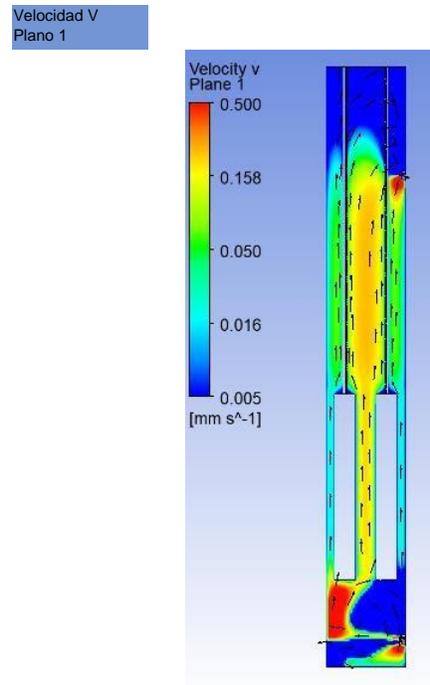


*Ilustración 6-8 Perfil de velocidad vertical máxima, R.E.S.P.*

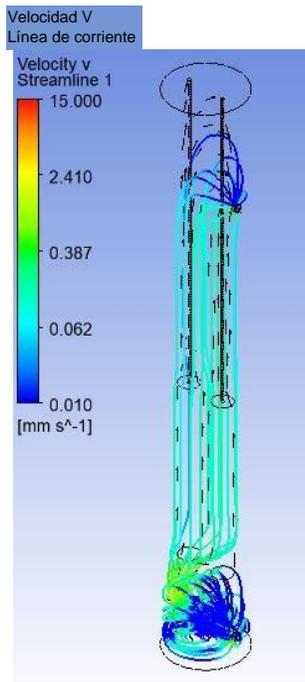
La *Ilustración 6-9 a) y c)* presentan el contorno de velocidad vertical máxima y las líneas de corriente para el caudal de 20.00 ml/min respectivamente. Por otro lado el inciso *b) y d)* se observa el contorno de velocidad vertical y las líneas de corriente, éstas ilustraciones corresponden al caudal de 28.33 ml/min.



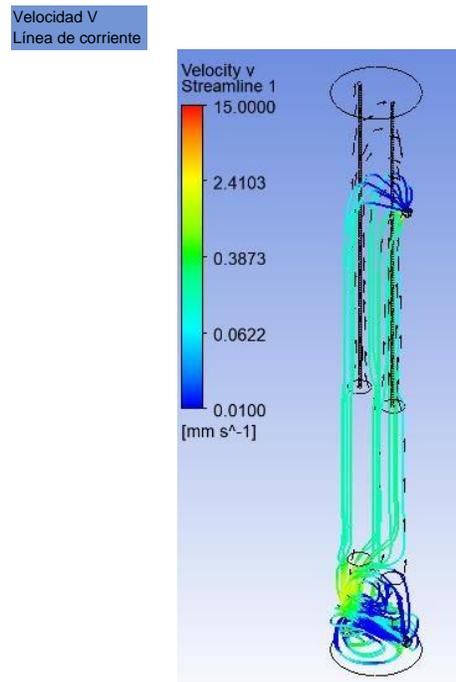
a)



b)



c)



d)

*Ilustración 6-9 Comparativa contorno y líneas de corriente de velocidad vertical, R.E.S.P.*  
Se observa una mayor velocidad vertical en la *Ilustración 6-9 b*, la mayor diferencia se encuentra en la entrada ya que presentan velocidades mayores, aunque en la parte central del reactor la velocidad se iguala para ambos reactores. Por lo tanto,

se establece que para la geometría del R.E.S.P. no hay cambio notorio en los campos de flujo, aun cuando existe un aumento del caudal en la entrada. En los escenarios anteriores se cumple una velocidad de ascenso dominante lo que beneficia la canalización de sólidos hacia la salida del reactor.

### 6.1.3 Turbulencia del R.E.S.P.

En el siguiente apartado se muestran los resultados correspondientes a la energía cinética de turbulencia promedio y máxima, específicamente en las *Tablas 6-5 y 66*. Es importante mencionar que el principal objetivo del presente trabajo fue mejorar el diseño geométrico del reactor para incrementar la energía cinética de turbulencia y así mejorar los procesos de coagulación. Por lo cual los resultados mostrados a continuación son los de mayor interés.

*Tabla 6-5 Turbulencia promedio a diferentes alturas, R.E.S.P., unidades en mm<sup>2</sup>/seg<sup>2</sup>*

ALTURA (CM)	CAUDAL 1	CAUDAL 2	CAUDAL 3	CAUDAL 4	CAUDAL 5
10.00	0.070	0.077	0.093	0.109	0.118
12.50	0.059	0.064	0.074	0.085	0.090
15.00	0.058	0.063	0.072	0.082	0.087
17.50	0.057	0.062	0.072	0.082	0.087
20.00	0.057	0.062	0.072	0.082	0.087
22.50	0.058	0.062	0.072	0.082	0.087
25.00	0.042	0.045	0.052	0.058	0.062
25.50	0.043	0.047	0.054	0.061	0.064
26.00	0.043	0.047	0.054	0.061	0.065
26.50	0.044	0.048	0.055	0.062	0.066
27.00	0.044	0.048	0.056	0.063	0.067
27.50	0.045	0.049	0.056	0.064	0.067
30.00	0.045	0.048	0.056	0.064	0.067
32.50	0.044	0.048	0.056	0.063	0.067
35.00	0.044	0.048	0.055	0.063	0.067
37.50	0.044	0.048	0.055	0.063	0.067
40.00	0.045	0.049	0.056	0.064	0.067

*Tabla 6-6 Turbulencia máxima a diferentes alturas, R.E.S.P., unidades en mm<sup>2</sup>/seg<sup>2</sup>*

ALTURA (CM)	REACTOR 1	REACTOR 2	REACTOR 3	REACTOR 4	REACTOR 5
10.00	0.108	0.119	0.141	0.162	0.173
12.50	0.095	0.105	0.124	0.143	0.153
15.00	0.094	0.102	0.120	0.139	0.148
17.50	0.094	0.102	0.120	0.138	0.147
20.00	0.094	0.102	0.120	0.138	0.147
22.50	0.094	0.103	0.121	0.139	0.148
25.00	0.091	0.099	0.117	0.134	0.143
25.50	0.060	0.066	0.076	0.087	0.092
26.00	0.055	0.060	0.069	0.079	0.083
26.50	0.071	0.078	0.091	0.105	0.111
27.00	0.081	0.089	0.104	0.120	0.128
27.50	0.086	0.094	0.111	0.129	0.137
30.00	0.091	0.100	0.118	0.138	0.147
32.50	0.090	0.100	0.118	0.137	0.147
35.00	0.091	0.100	0.118	0.138	0.147
37.50	0.091	0.101	0.120	0.139	0.149
40.00	0.096	0.105	0.126	0.147	0.157

Cómo se observa en la *Ilustración 6-10*, los resultados de la energía cinética de turbulencia promedio se mantiene prácticamente constantes en toda la sección del vertical del reactor. Sin embargo, se observa un incremento de la turbulencia en los primeros 10 cm debido a la entrada del flujo. Este efecto se presenta de igual manera en la salida. Por otro lado, en la sección intermedia se observa una disminución drástica en la cantidad de turbulencia que coincide con la zona ubicada en el extremo superior de los electrodos. Este efecto puede estar asociado al cambio súbito de la geometría en ese punto. Sin embargo, conforme el flujo sigue ascendiendo lo hace de igual manera la energía cinética en el extremo superior.

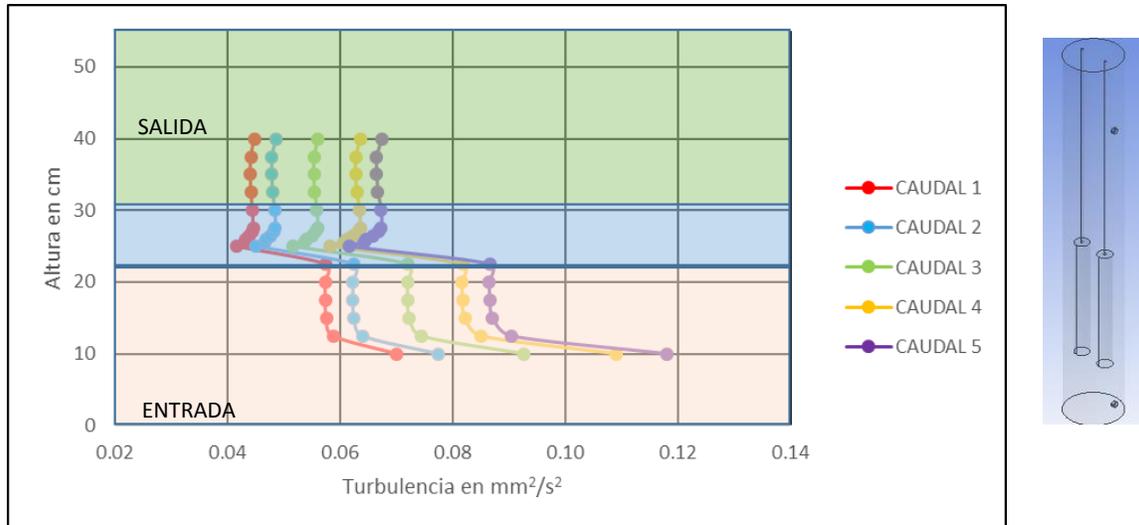


Ilustración 6-10 Perfil de energía cinética de turbulencia promedio del R.E.S.P.

Por otro lado, en la *Ilustración 6-11* se observa que el valor de energía cinética de turbulencia máxima se encuentra en la entrada del reactor. Por otro lado, conforme el fluido asciende la turbulencia disminuye. Esto se debe al aumento del área transversal en la zona superior que permite dispersar las fluctuaciones de la velocidad. En esta área donde se encuentran las varillas de soporte, la turbulencia permanece constante hasta la salida del reactor.

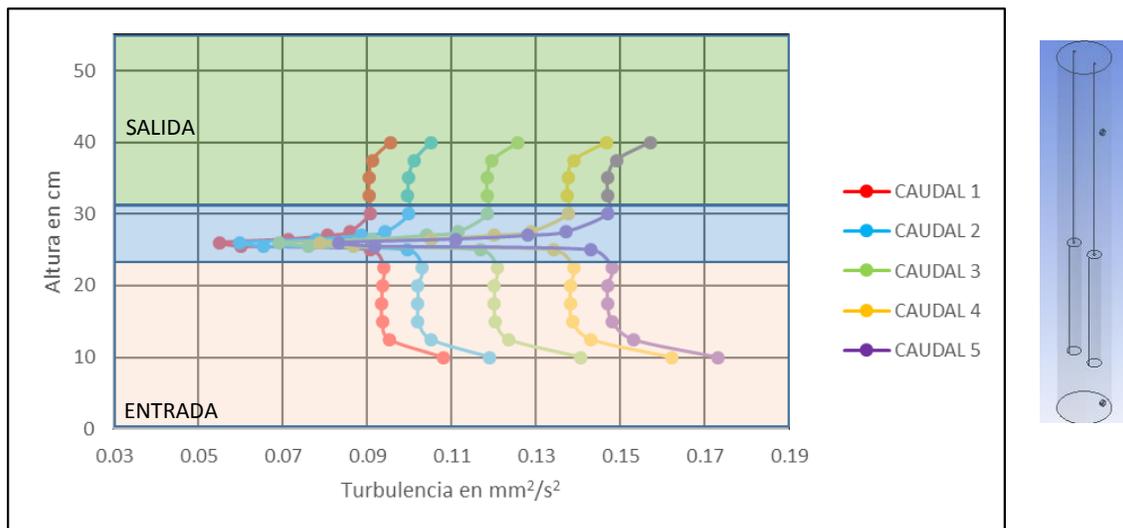
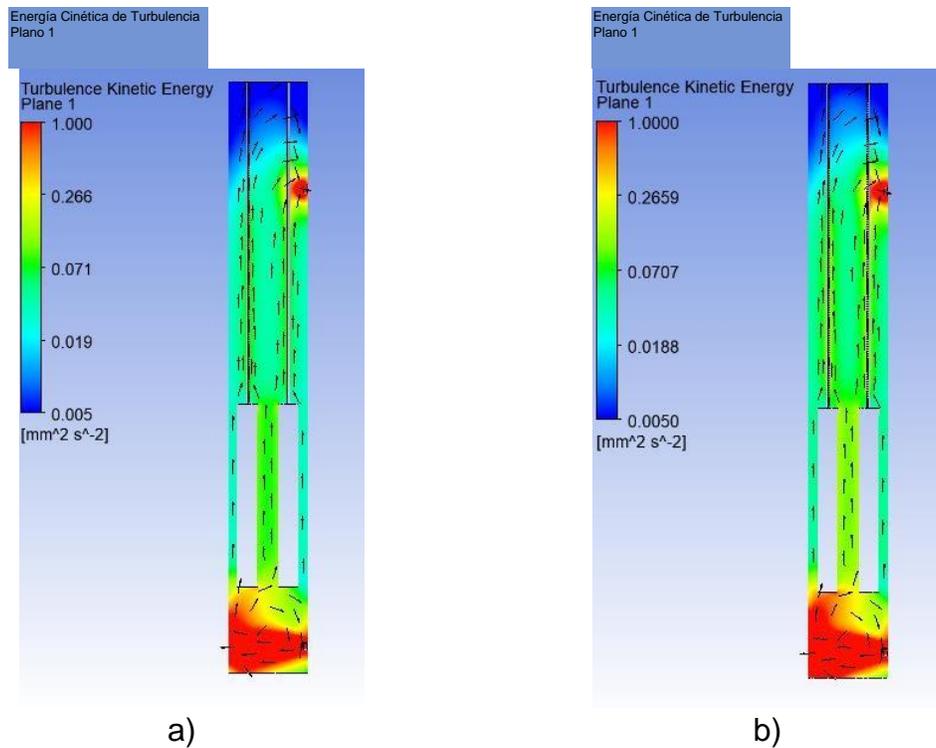


Ilustración 6-11 Perfil de energía cinética de turbulencia máxima del R.E.S.P.

La siguiente *Ilustración 12* muestra los contornos asociados a la energía cinética de turbulencia para el caudal de operación 20ml/min y el caudal máximo 28 ml/min,

respectivamente. Ésta Ilustración expresan resultados muy similares entre ellos, notándose una mínima diferencia en la turbulencia en la zona donde se ubican las varillas de soporte.



*Ilustración 6-12 Contorno de energía cinética de turbulencia del R.E.S.P. a) Caudal promedio, b) Caudal máximo.*

De acuerdo con los resultados de energía cinética de turbulencia obtenidos, se estableció la base de comparación para las modificaciones geométricas del reactor que lograron incrementar la turbulencia y así mejorar los procesos de coagulación de las partículas. Éstos resultados incluyen la comparación de los contornos de velocidad total y velocidad vertical. Para ello se plantearon dos nuevos reactores modificados: R.E.S.T. y R.E.A.S.T., descritos previamente en el apartado de metodología.

Los campos de velocidad total, velocidad vertical y energía cinética de turbulencia, así como sus respectivos perfiles y tablas, para cada reactor propuesto se muestran

en los ANEXOS. En el apartado siguiente únicamente se realizó la comparativa entre el R.E.S.P. y los reactores modificados y propuestos en este trabajo.

#### **6.1.4 Resultados comparativos entre R.E.S.P. y reactores modificados.**

En este apartado se realiza la comparación numérica y gráfica de las condiciones hidrodinámicas de velocidad vertical y energía cinética de turbulencia, entre el R.E.S.P. versus el R.E.S.T. y el R.E.A.S.T.

Esta comparación se realizó con el fin de determinar las posibles mejoras del reactor que promuevan un comportamiento más eficiente en torno a las condiciones hidrodinámicas y por ende en los procesos de coagulación al interior del reactor. Así, se logró observar el efecto de las modificaciones geométricas principalmente en los campos de energía cinética de turbulencia, con el objetivo último de incrementarla para mejorar la mezcla conservando las condiciones hidráulicas de caudal y tiempo de residencia.

En la siguiente Ilustración se ejemplifican los planos de estudio por reactor. Es decir, que en los resultados comparativos de velocidad vertical y energía cinética de turbulencia se contará con un plano longitudinal, planos transversales cerca de la entrada, zona de ánodo, cátodo y la salida. La *Ilustración 6-13 A* representa las zonas del R.E.S.P., mientras la *Ilustración 6-13 B* muestra las zonas del R.E.S.T., a su vez en la *Ilustración 6-13 C* se observan las zonas para el R.E.A.S.T. Las dimensiones generales del R.E.S.P. son las mismas para los reactores modificados, las cuáles son especificadas en la ilustración 5-4.

La zona 1 corresponde a la sección de entrada ubicada entre el inicio del reactor y los 25 cm; zona 2 entre los 25 cm y 27.5 cm; por último, la zona 3 ubicada entre los

27.5 cm y la salida del reactor, esto para monitorear las zonas de interés de los reactores.

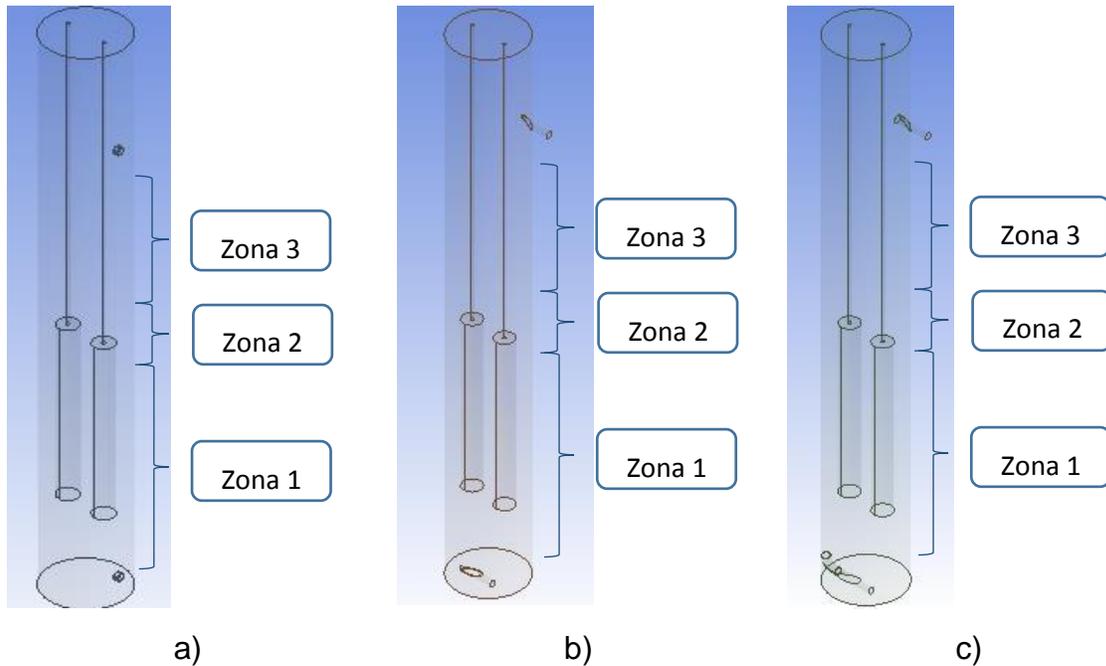


Ilustración 6-13 Modelos tridimensionales de los reactores: a) R.E.S.P.; b) R.E.S.T. c) R.E.A.S.T.

### 6.1.5 Comparación velocidad total máxima

En el siguiente apartado son colocados los contornos y gráficas correspondientes a la velocidad total máxima para el caudal de operación y el caudal máximo, para cada reactor analizado. Para cada gráfica el reactor 1 corresponde al R.E.S.P., el reactor 2 al R.E.S.T. y por último el reactor 3 al R.E.A.S.T.

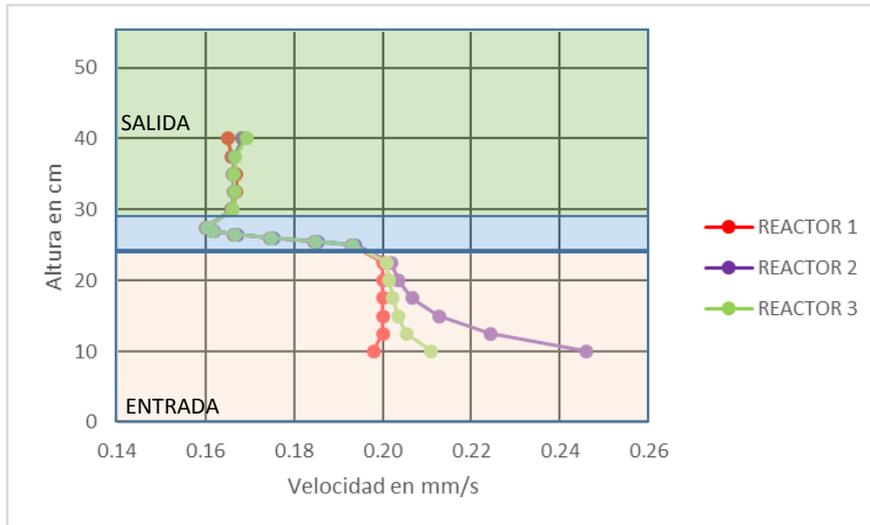


Ilustración 6-14 Perfiles de velocidad total máxima, para caudal de operación.

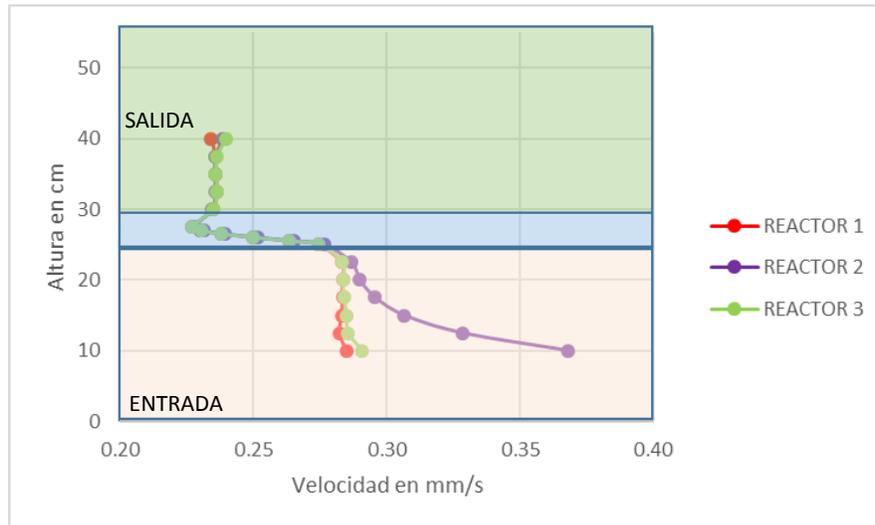


Ilustración 6-15 Perfiles de velocidad total máxima, para caudal máximo.

Los perfiles de velocidad total máxima para el caudal de operación y el caudal máximo, mantuvieron la misma tendencia, debido a que los valores incrementan de manera proporcional al tener más caudal, por lo cual los análisis posteriores, solo se basarán en el caudal de operación.

Velocidad  
Plano 1

Velocidad  
Plano 1

Velocidad  
Plano 1

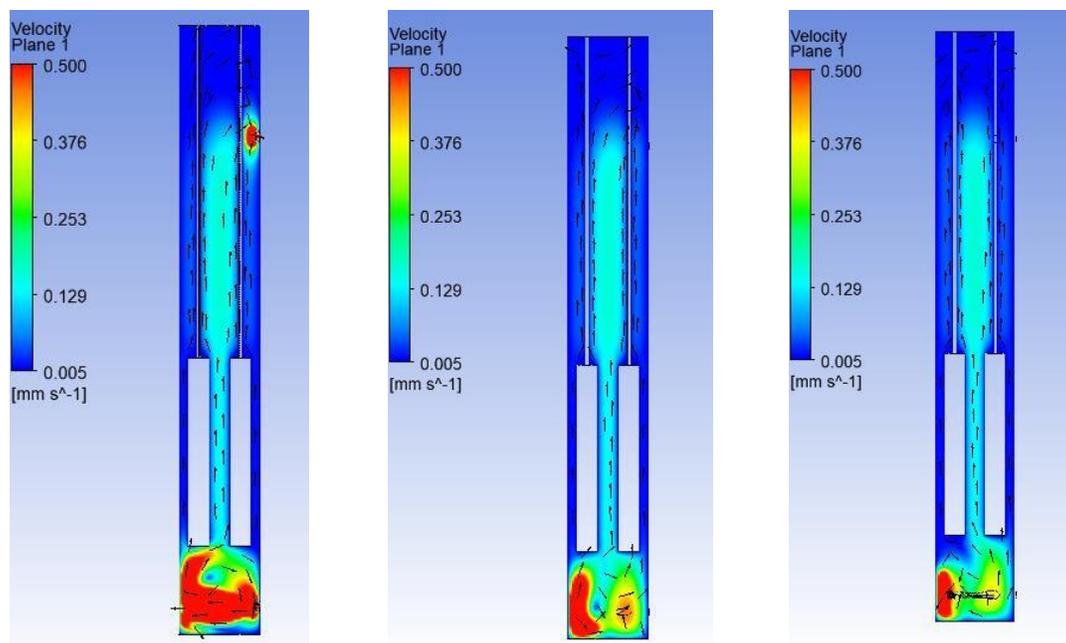


Ilustración 6-16 Contornos longitudinales de velocidad total, para caudal de operación. a) R.E.S.P. b) R.E.S.T. y c) R.E.A.S.T.

Se observa en las *ilustraciones 6-14 y 6-15* que los valores de velocidad total máxima, tanto para el caudal de operación y el caudal máximo para los reactores modificados son ligeramente mayores al inicio comparado al R.E.S.P., siendo el R.E.S.T. el que presenta valores más altos, la *Ilustración 6-16* reafirma los perfiles, al notarse variaciones a la entrada y mantenerse constante en la zona central y final del reactor.

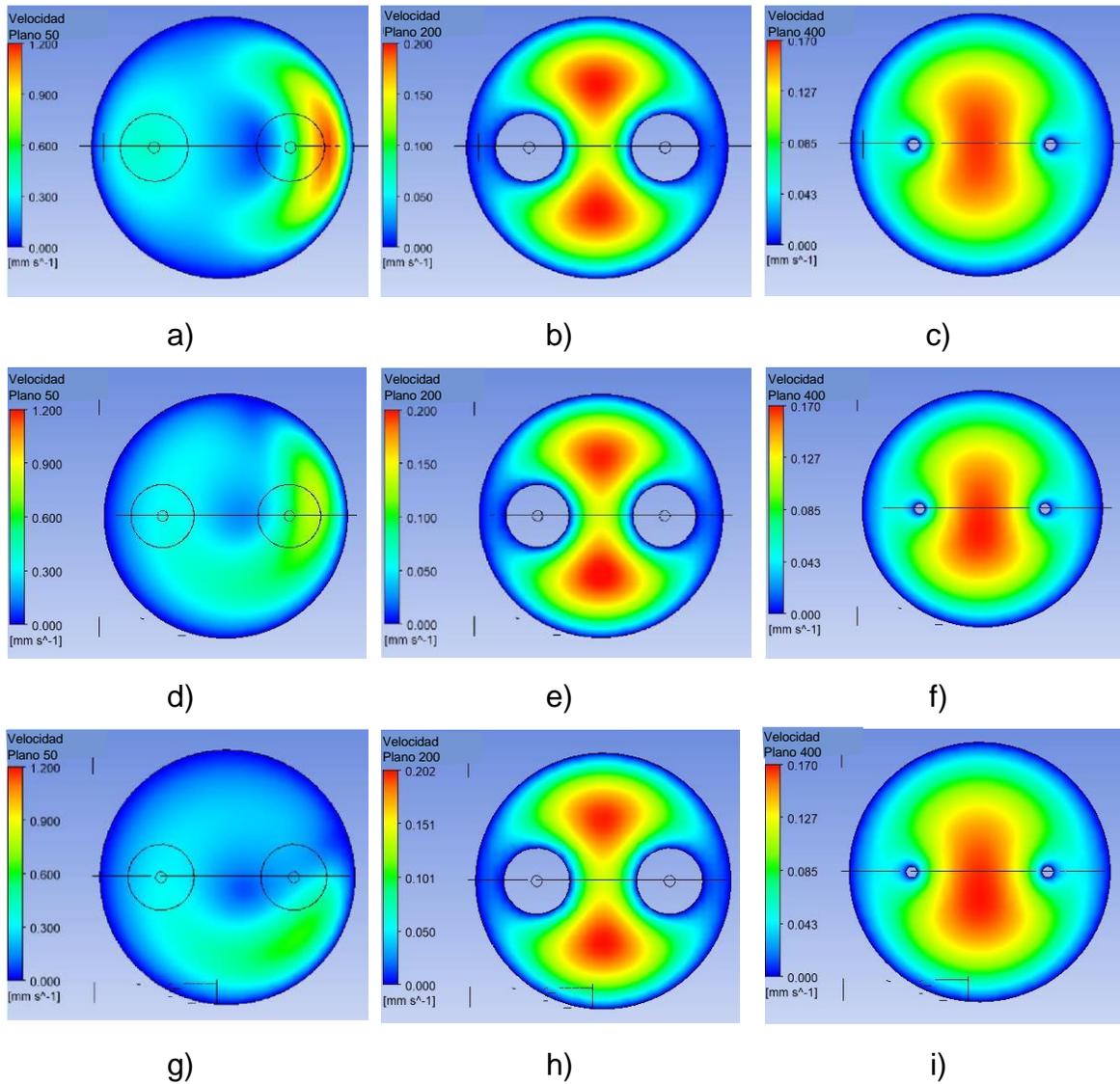


Ilustración 6-17 Contornos transversales de velocidad total, para caudal de operación.

En la *Ilustración 6-17* los incisos a) b) y c) corresponden al R.E.S.P., los cuáles están a 5 cm, 20 cm y 40 cm de la altura del reactor respectivamente. Los incisos d), e) y f) corresponden al R.E.S.T., mientras los incisos g), h) y i) R.E.A.S.T., para las mismas alturas. Se observan ligeras diferencias en la entrada de estos contornos, pero al igual que en las ilustraciones anteriores, no representan una diferencia mayor. Los perfiles comparativos de velocidad total, al ser muy similares y no tener un impacto mayor en la investigación se encuentran en el *ANEXO 3*.

Se concluye que la modificación de la geometría en la entrada afecta menos que la modificación de ubicación de elementos, aun así, los aumentos de las modificaciones son menores, por lo cual se procede a la comparación de energía cinética de turbulencia.

### 6.1.6 Comparación energía cinética de turbulencia máxima

En el siguiente apartado se muestran los contornos y gráficas correspondientes a la energía cinética de turbulencia para el caudal de operación y el caudal máximo, para cada reactor analizado.

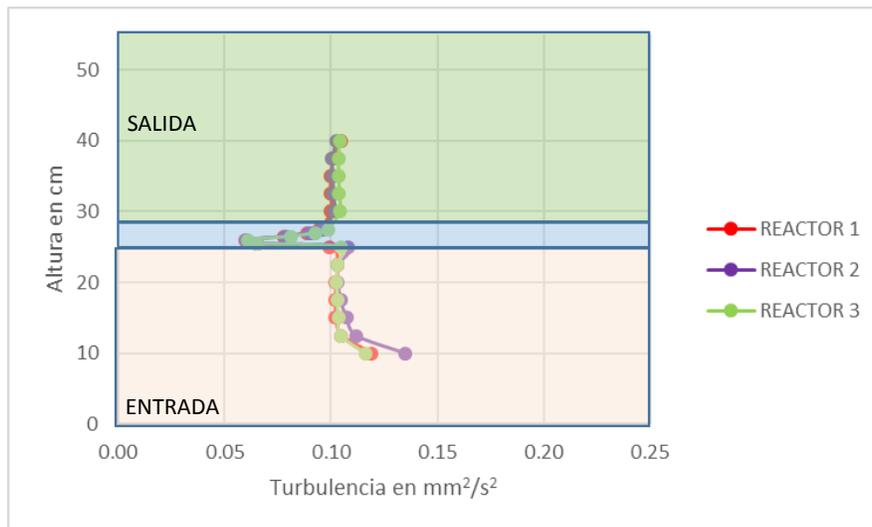


Ilustración 6-18 Perfiles de energía cinética de turbulencia máxima, para caudal de operación.

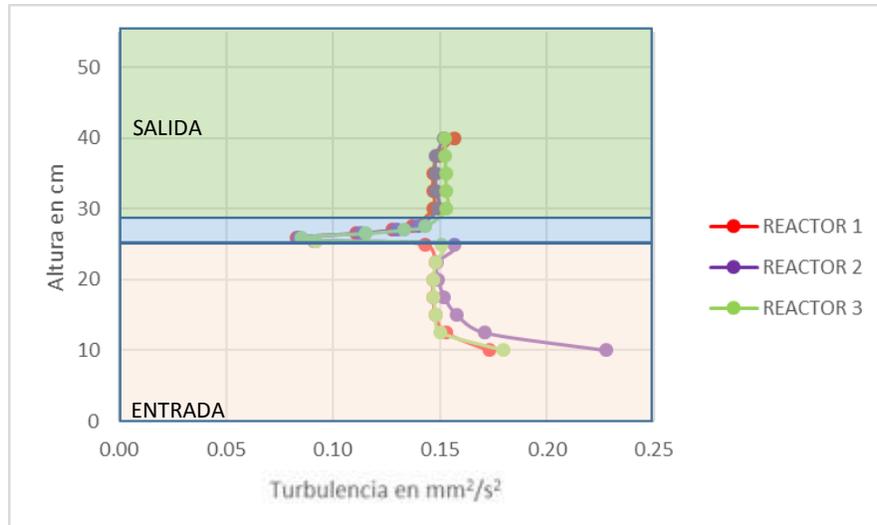


Ilustración 6-19 Perfiles de energía cinética de turbulencia máxima, para caudal máximo.

Los perfiles de energía cinética de turbulencia máxima, para el caudal de operación y el caudal máximo, mantuvieron la misma tendencia, debido a que los valores incrementan de manera proporcional al tener más caudal, por lo cual en comparativas posteriores, solo se basarán en el caudal de operación.

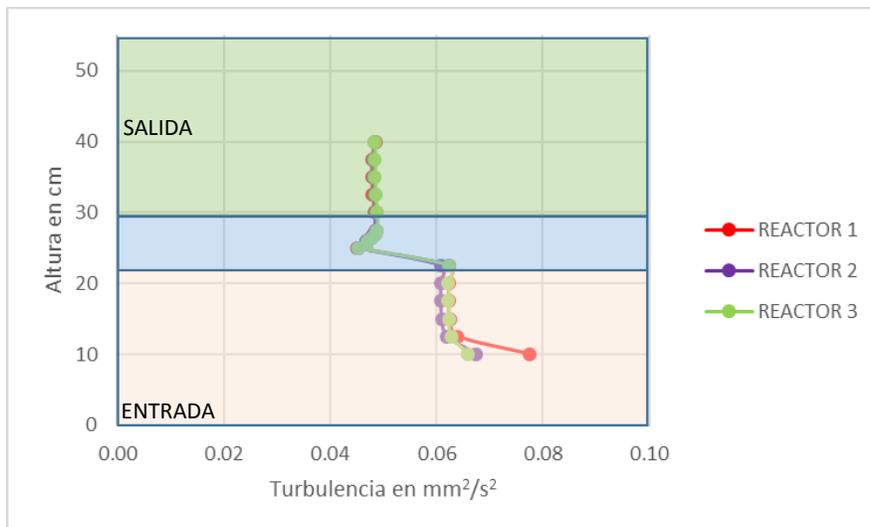


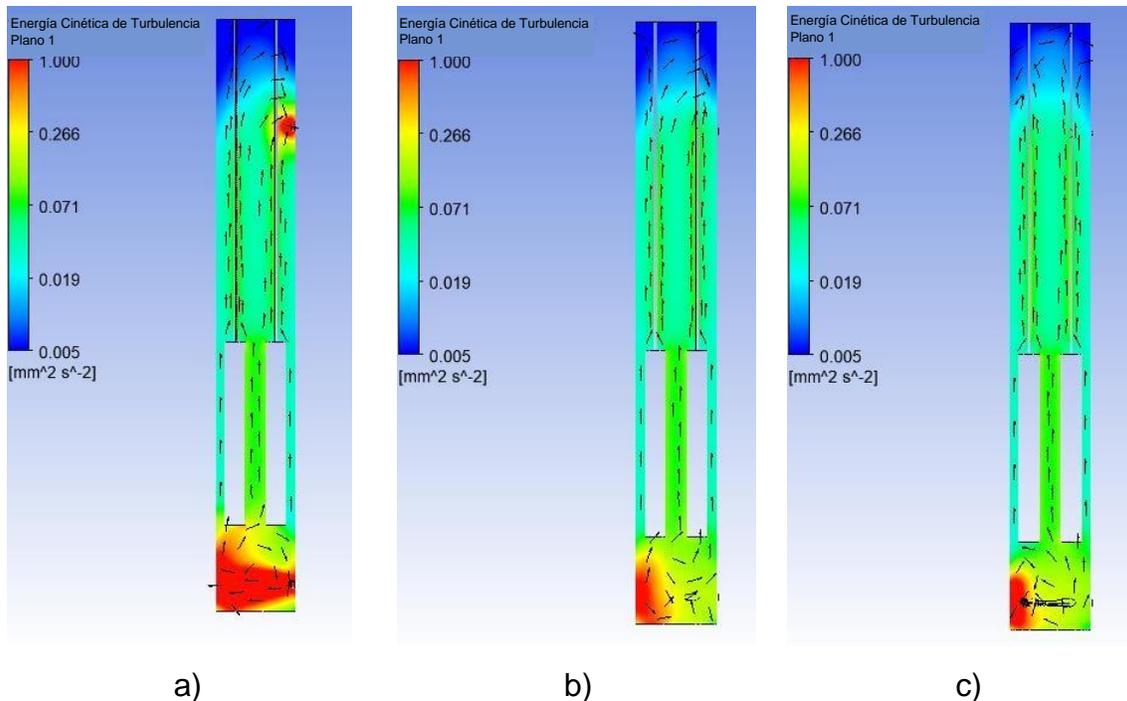
Ilustración 6-20 Perfiles de energía cinética de turbulencia promedio, para caudal de operación.

De acuerdo a las ilustraciones anteriores, los valores máximos y promediados de energía cinética de turbulencia no presentan cambios significativos. En las

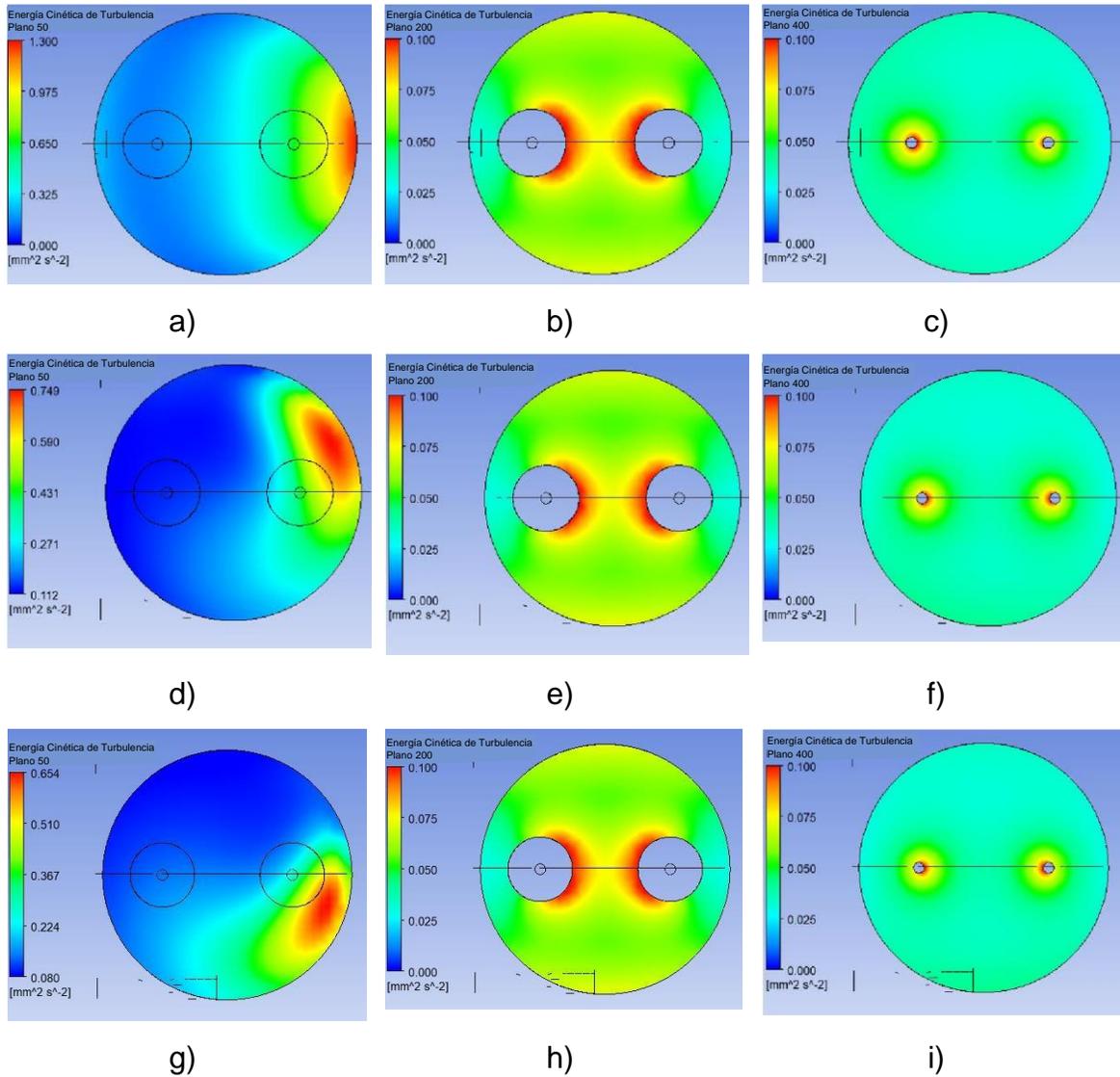
*Ilustraciones 6-18 y 6-19*, se observan datos más altos de energía cinética de turbulencia en la entrada y la zona del ánodo y cátodo, acabando con datos muy similares a los otros dos reactores en la zona de salida del reactor, mientras el perfil del R.E.S.P. y el R.E.S.T. son muy parejos en todas las secciones.

La *Ilustración 6-20* muestra que los datos promediados arrojan una energía cinética de turbulencia ligeramente más alta en el R.E.S.P., concluyendo de esta manera que ninguna de las adecuaciones al R.E.S.P., crea una energía cinética de turbulencia que sea considerable comparada a este reactor, por lo cual es conveniente realizar un reactor que cuente con un mezclador estático interno, que pueda crear una mayor energía cinética de turbulencia y mejorar la muestra.

En las *Ilustraciones 6-21 y 6-22* se muestra de manera visual las similitudes en los contornos longitudinales y transversales de energía cinética de turbulencia, en el R.E.S.P. y los reactores modificados, para el caudal de operación.



*Ilustración 6-21* Contornos longitudinales de energía cinética de turbulencia, para caudal de operación. a) R.E.S.P., b) R.E.S.T. y c) R.E.A.S.T.



*Ilustración 6-22 Contornos transversales de energía cinética de turbulencia, para caudal de operación.*

En la Ilustración anterior los incisos a) b) y c) corresponden al R.E.S.P. Los incisos d), e) y f) corresponden al R.E.S.T., mientras los incisos g), h) y i) representan al R.E.A.S.T., éstos planos fueron considerados a 5, 20 y 40 cm de la altura del reactor.

Los incisos a), d) y g) representan la energía cinética de turbulencia, solo en estos incisos la escala presentada es diferente, ya que de manejar la misma escala no podrían distinguirse de buena forma las variaciones entre ellas, los demás incisos

manejan la misma escala, al tener casi los mismos valores, así como se representan en los perfiles de energía cinética de turbulencia.

Los perfiles comparativos son muy similares de la zona media en adelante, por lo cual no tiene un impacto mayor en la turbulencia, corroborando de manera gráfica los resultados de las *ilustraciones 6-18, 6-19 y 6-20*; y aceptando que las dos propuestas de modificación no fueron satisfactorias para aumentar la energía cinética de turbulencia. Las cuáles en ocasiones presentaban valores más bajos al R.E.S.P., se acepta la simulación de un nuevo reactor llamado *R.E.S.P.M.*, el cual tiene la misma geometría que el R.E.S.P.; pero con un mezclador interno, que tiene la función de aumentar el valor de energía cinética de turbulencia.

En el siguiente apartado se abordarán los resultados de la simulación de este reactor modificado, mientras en el último apartado de este capítulo se realizará la comparación únicamente entre el R.E.S.P. y el R.E.S.P.M.

## **6.2 Comparación de resultados entre el R.E.S.P. y el reactor con R.E.S.P.M.**

En este reactor se colocó un mezclador estático interno que ayude a elevar el valor de la energía cinética de turbulencia y de la velocidad en general. La geometría del reactor es la misma al R.E.S.P. con la misma ubicación en los elementos, pero con la colocación del mezclador estático entre el área de varillas, justo en la parte superior del ánodo y del cátodo, como se observa en la *Ilustración 5-12*.

### **6.2.1 Velocidad total R.E.S.P.M.**

Los resultados de velocidad total para este reactor se muestran en la *Tabla 6-7 y Tabla 6-8*, velocidad total promedio y máxima respectivamente, estas velocidades son calculadas para diversas alturas. La *Ilustración 6-23 y 6-24* muestran las gráficas comparativas de velocidad total promedio y velocidad máxima en función de sus valores.

Tabla 6-7 Velocidad total promedio, R.E.S.P.M. (Resultados en mm/seg).

ALTURA (CM)	CAUDAL 1	CAUDAL 2	CAUDAL 3	CAUDAL 4	CAUDAL 5
10.00	0.076	0.083	0.098	0.112	0.120
12.50	0.076	0.082	0.096	0.110	0.117
15.00	0.076	0.082	0.096	0.110	0.117
17.50	0.076	0.082	0.096	0.110	0.117
20.00	0.076	0.082	0.096	0.110	0.117
22.50	0.076	0.082	0.096	0.110	0.117
25.00	0.042	0.046	0.053	0.061	0.064
25.50	0.059	0.064	0.075	0.086	0.091
26.00	0.062	0.068	0.079	0.090	0.096
26.50	0.064	0.070	0.082	0.094	0.099
27.00	0.062	0.067	0.079	0.090	0.096
27.50	0.058	0.063	0.074	0.084	0.090
30.00	0.060	0.066	0.077	0.088	0.093
32.50	0.058	0.063	0.073	0.084	0.089
35.00	0.058	0.063	0.074	0.084	0.090
37.50	0.058	0.064	0.074	0.085	0.090
40.00	0.060	0.066	0.077	0.088	0.093

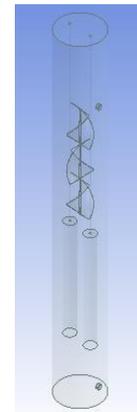
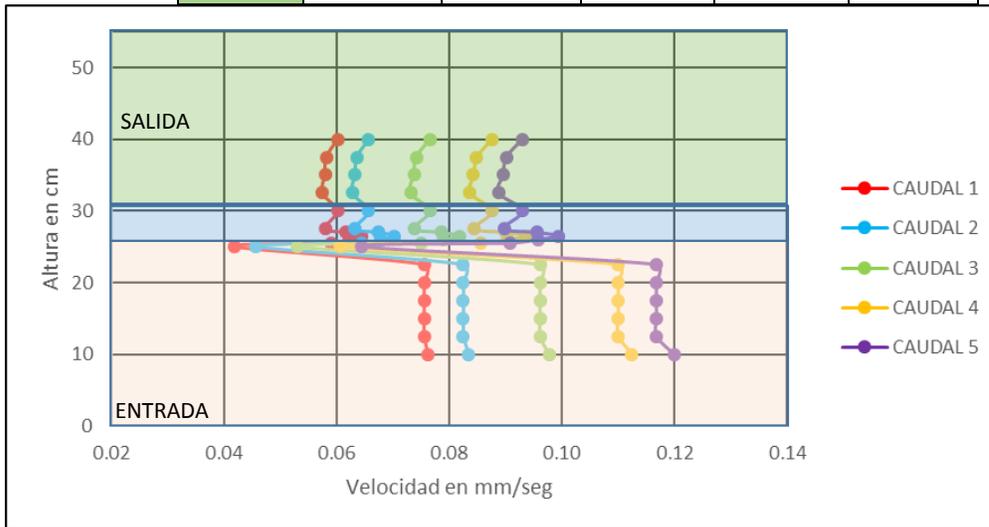


Ilustración 6-23 Perfil de velocidad total promedio, R.E.S.P.M.

Tabla 6-8 Velocidad total máxima, R.E.S.P.M. (Resultados en mm/seg).

ALTURA (CM)	CAUDAL 1	CAUDAL 2	CAUDAL 3	CAUDAL 4	CAUDAL 5
10.00	0.182	0.199	0.232	0.267	0.285
12.50	0.184	0.200	0.233	0.267	0.283
15.00	0.184	0.200	0.234	0.267	0.284
17.50	0.184	0.200	0.234	0.267	0.284
20.00	0.184	0.200	0.234	0.267	0.284
22.50	0.184	0.200	0.233	0.267	0.283
25.00	0.174	0.190	0.223	0.255	0.271

25.50	0.166	0.181	0.212	0.244	0.259
26.00	0.157	0.171	0.201	0.230	0.245
26.50	0.150	0.164	0.192	0.220	0.234
27.00	0.147	0.160	0.188	0.215	0.229
27.50	0.145	0.158	0.185	0.212	0.226
30.00	0.134	0.147	0.171	0.196	0.209
32.50	0.139	0.152	0.177	0.202	0.215
35.00	0.133	0.145	0.169	0.194	0.205
37.50	0.140	0.152	0.178	0.203	0.215
40.00	0.132	0.144	0.168	0.192	0.204

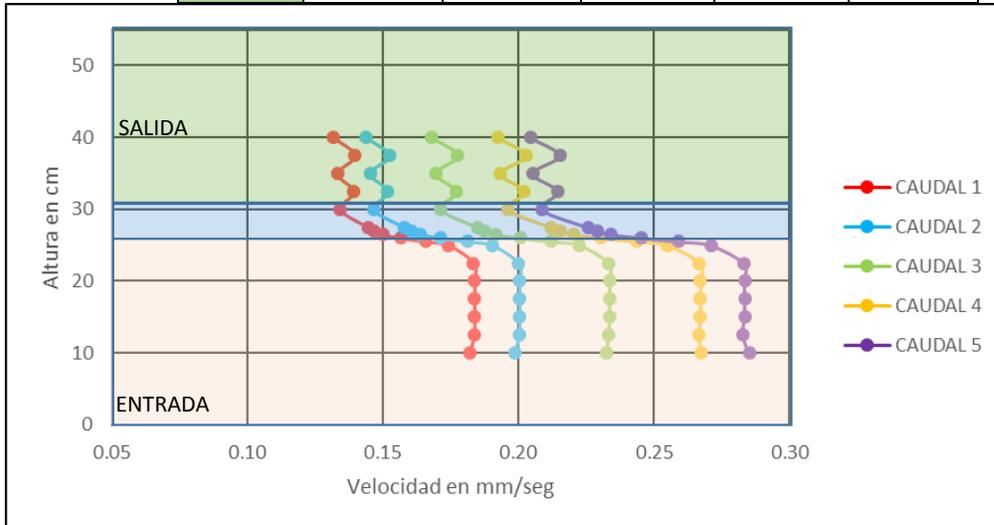
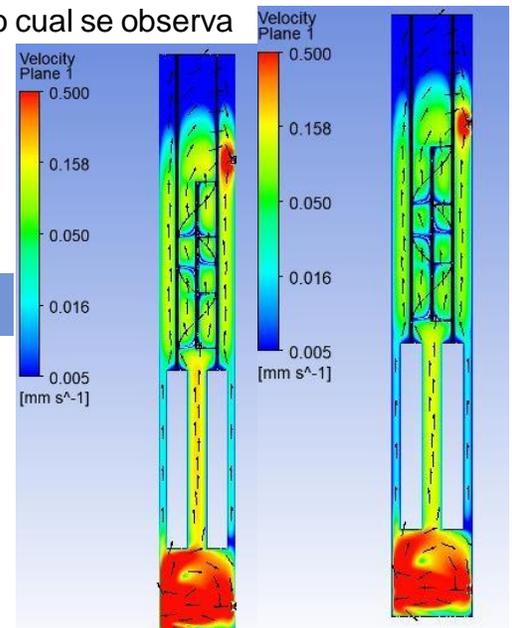


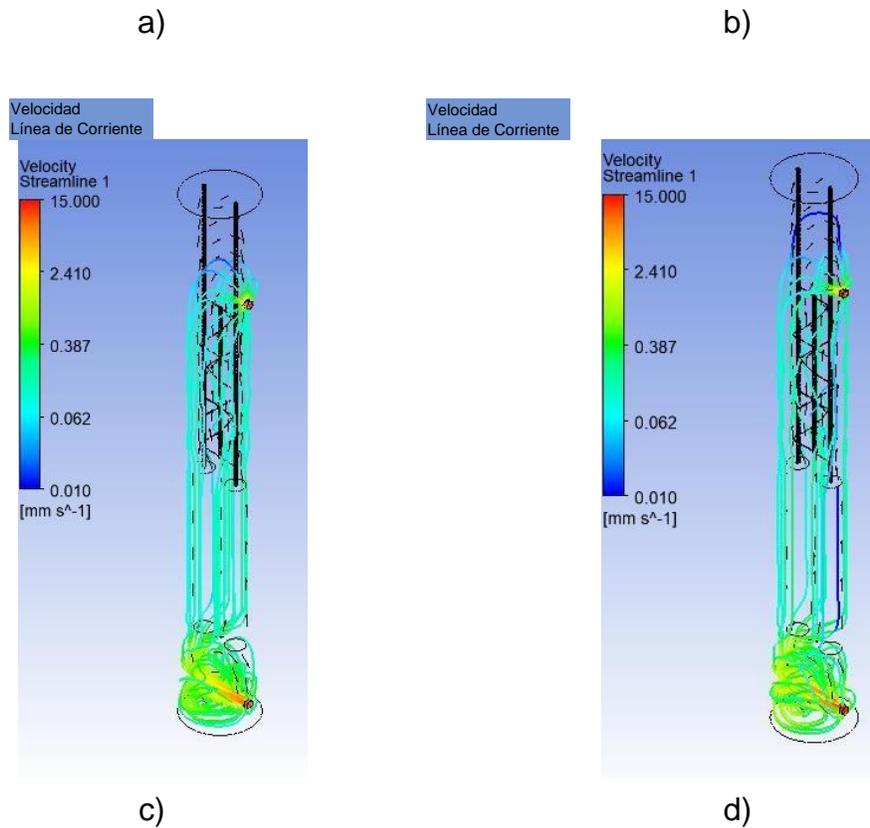
Ilustración 6-24 Perfil de velocidad total máxima, R.E.S.P.M.

Para este reactor se considera la colocación de un plano central al igual que en los demás, la entrada y salida coincide con el eje del plano, por lo cual se observa la variación de velocidades en la entrada y salida. La *Ilustración 6-25* muestra el contorno de velocidades totales y líneas de corriente. El inciso *a)* y *c)* representan el caudal de operación, mientras *b)* y *d)* corresponden al caudal máximo.

Velocidad  
Plano 1

Velocidad  
Plano 1





*Ilustración 6-25 Comparativa de contorno y líneas de corriente de velocidad total, R.E.S.P.M.*

El campo de velocidades es muy similar debido al poco aumento en el caudal. Las diferencias en las velocidades pueden apreciarse solo en la entrada del reactor, lo cual es debido al caudal suministrado en cada caso.

### 6.2.2 Velocidad vertical R.E.S.P.M.

La *Tabla 6-9* muestra los valores de velocidad vertical promedio, los perfiles de estos datos se muestran en la *Ilustración 6-26*. Los resultados de la *Tabla 6-10* contiene los datos de velocidad vertical máxima, mientras la *Ilustración 6-27* representa los perfiles de esta *Tabla*.



Tabla 6-9 Velocidad vertical promedio, R.E.S.P.M. (Resultados en mm/seg).

ALTURA (CM)	CAUDAL 1	CAUDAL 2	CAUDAL 3	CAUDAL 4	CAUDAL 5
10.00	0.076	0.082	0.096	0.110	0.117
12.50	0.076	0.082	0.096	0.110	0.117
15.00	0.076	0.082	0.096	0.110	0.117
17.50	0.076	0.082	0.096	0.110	0.117
20.00	0.076	0.082	0.096	0.110	0.117
22.50	0.076	0.082	0.096	0.110	0.117
25.00	0.041	0.045	0.052	0.060	0.064
25.50	0.057	0.062	0.073	0.083	0.088
26.00	0.061	0.066	0.077	0.088	0.094
26.50	0.063	0.069	0.080	0.092	0.097
27.00	0.060	0.065	0.076	0.087	0.093
27.50	0.057	0.062	0.072	0.082	0.087
30.00	0.058	0.063	0.073	0.084	0.089
32.50	0.056	0.062	0.072	0.082	0.087
35.00	0.056	0.062	0.072	0.082	0.087
37.50	0.057	0.062	0.073	0.083	0.088
40.00	0.058	0.063	0.074	0.084	0.090

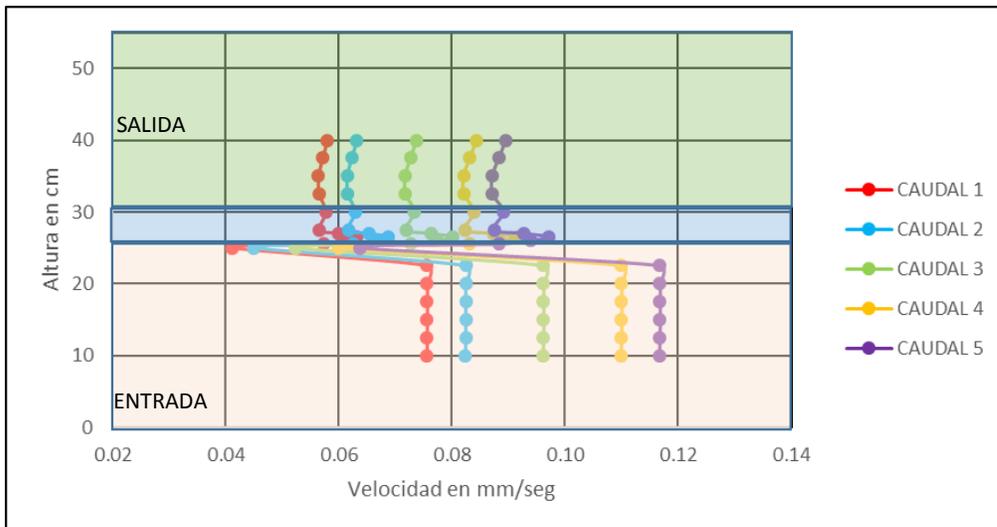


Ilustración 6-26 Perfil de velocidad vertical promedio, R.E.S.P.M.

Tabla 6-10 Velocidad vertical máxima, R.E.S.P.M. (Resultados en mm/seg).

ALTURA (CM)	CAUDAL 1	CAUDAL 2	CAUDAL 3	CAUDAL 4	CAUDAL 5
10.00	0.180	0.196	0.228	0.259	0.275
12.50	0.184	0.200	0.233	0.266	0.283
15.00	0.184	0.200	0.234	0.267	0.284
17.50	0.184	0.200	0.234	0.267	0.284
20.00	0.184	0.200	0.234	0.267	0.284
22.50	0.184	0.200	0.233	0.267	0.283
25.00	0.174	0.190	0.222	0.255	0.271
25.50	0.166	0.181	0.212	0.243	0.259

26.00	0.156	0.171	0.200	0.230	0.245
26.50	0.149	0.163	0.191	0.220	0.234
27.00	0.146	0.159	0.186	0.214	0.228
27.50	0.143	0.156	0.183	0.209	0.223
30.00	0.134	0.146	0.171	0.195	0.208
32.50	0.139	0.151	0.176	0.201	0.213
35.00	0.132	0.143	0.167	0.191	0.203
37.50	0.139	0.152	0.177	0.202	0.214
40.00	0.131	0.143	0.167	0.192	0.204

97

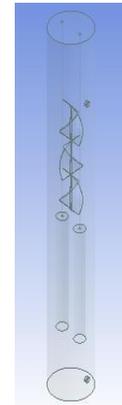
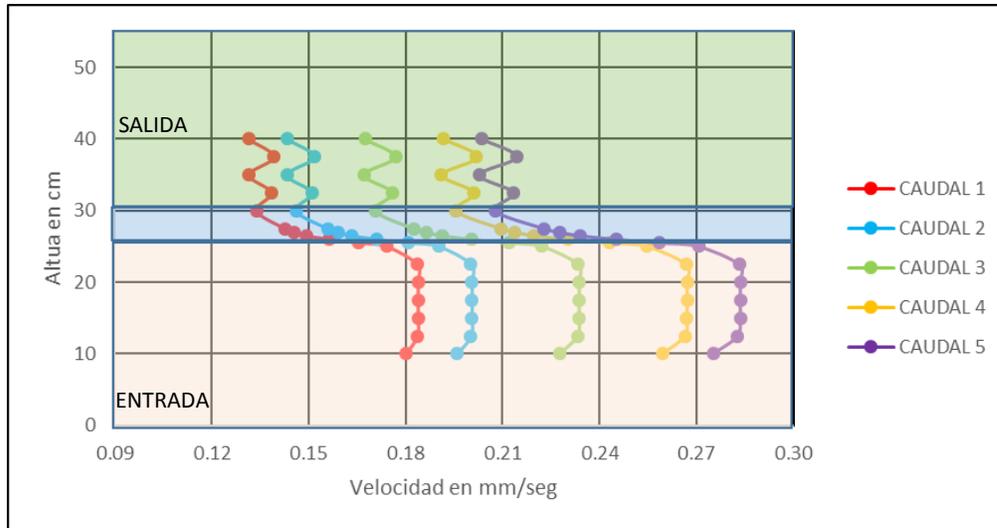


Ilustración 6-27 Perfil de velocidad vertical máxima, R.E.S.P.M.

Se observa en la *Ilustración 6-26* que los perfiles de velocidad tienen una ligera variación en la zona de los mezcladores, rompiendo con la uniformidad que se mantenía en la zona del ánodo y el cátodo. La *Ilustración 6-27* presenta aumento y descenso de velocidad máximas en la zona de los mezcladores, pero comparado a los primeros 20 cm, las velocidades máximas decrecen notablemente.

La *Ilustración 6-28* representa los contornos longitudinales de velocidad vertical del caudal de operación *a)*, mientras el caudal máximo se representa en el inciso *b)*. Las líneas de corriente se encuentran los incisos *c)* y *d)* para caudal de operación y máximo respectivamente.

Velocidad V  
Plano 1

Velocidad V  
Plano 1

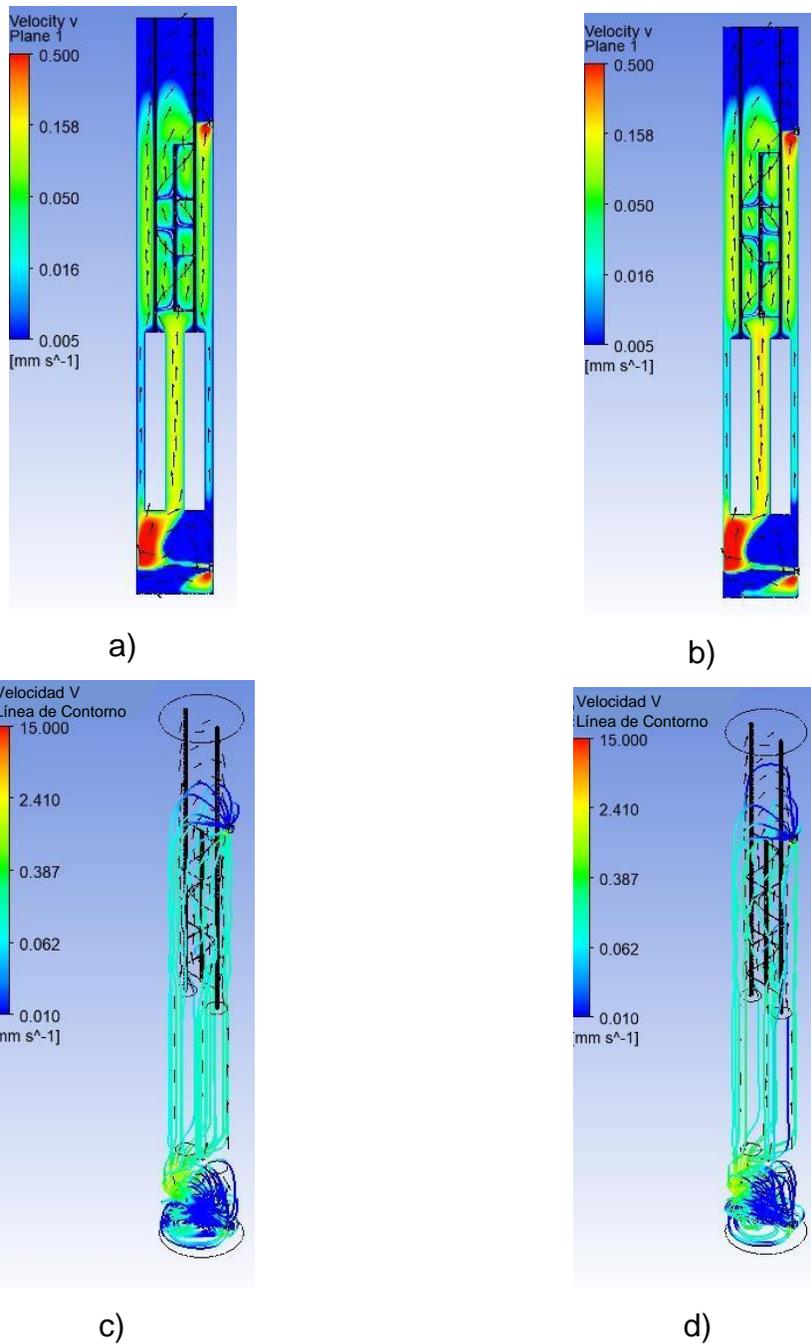


Ilustración 6-28 Comparativa de contorno y líneas de corriente de velocidad vertical, R.E.S.P.M.

Para ambos caudales se observa una velocidad vertical mayor en la zona central del reactor y en la zona lateral del mezclador estático interno, así como la reducción de velocidad justo en el contorno del mezclador y la unión de las aspás, teniendo un comportamiento similar a los contornos de velocidad total.

Al igual que en los otros reactores el aumento de caudal suministrado, no realiza cambios significativos en los campos de flujo y velocidad, además de cumplirse con una velocidad de ascenso dominante lo que beneficia la canalización de sólidos hacia la salida del reactor, con esto la presencia de un mezclador estático interno no es un obstáculo para que domine la velocidad de ascenso.

### 6.2.3 Turbulencia del R.E.S.P.M.

Siendo este reactor el último reactor simulado y la energía cinética de turbulencia el principal objetivo del presente trabajo los resultados mostrados a continuación son los de mayor interés, ya que desde este apartado se sabrá si se cumple con el objetivo, cabe mencionar que el apartado 6.1.6. se tendrá la comparación directa entre el R.E.S.P. y el R.E.S.P.M., así se verá de manera directa si los resultados son satisfactorios.

En el siguiente apartado se muestran los resultados correspondientes a la energía cinética de turbulencia promedio y máxima, específicamente en la *Tabla 6-11* y 6-12.

*Tabla 6-11 Turbulencia promedio diferentes alturas, R.E.S.P.M. (Resultados en mm<sup>2</sup>/seg<sup>2</sup>).*

ALTURA (CM)	CAUDAL 1	CAUDAL 2	CAUDAL 3	CAUDAL 4	CAUDAL 5
10.00	0.069	0.076	0.091	0.107	0.115
12.50	0.057	0.062	0.072	0.083	0.088
15.00	0.056	0.061	0.070	0.080	0.084
17.50	0.056	0.060	0.070	0.079	0.084
20.00	0.056	0.060	0.070	0.079	0.084
22.50	0.056	0.061	0.070	0.079	0.084
25.00	0.051	0.055	0.064	0.072	0.077
25.50	0.046	0.050	0.057	0.065	0.068
26.00	0.046	0.050	0.057	0.064	0.068
26.50	0.047	0.051	0.058	0.066	0.070
27.00	0.053	0.058	0.067	0.076	0.080
27.50	0.054	0.059	0.068	0.077	0.081
30.00	0.064	0.070	0.080	0.091	0.096
32.50	0.064	0.069	0.080	0.091	0.096
35.00	0.064	0.069	0.080	0.091	0.098

## CAPÍTULO 6: RESULTADOS Y ANÁLISIS

37.50	0.065	0.070	0.081	0.093	0.098
40.00	0.065	0.070	0.080	0.091	0.096

Tabla 6-12 Turbulencia máxima a diferentes alturas, R.E.S.P.M. (Resultados en  $\text{mm}^2/\text{seg}^2$ ).

ALTURA (CM)	CAUDAL 1	CAUDAL 2	CAUDAL 3	CAUDAL 4	CAUDAL 5
10.00	0.108	0.119	0.140	0.161	0.171
12.50	0.095	0.104	0.122	0.141	0.150
15.00	0.094	0.102	0.120	0.138	0.147
17.50	0.094	0.102	0.120	0.138	0.147
20.00	0.094	0.102	0.120	0.138	0.147
22.50	0.094	0.102	0.120	0.138	0.147
25.00	0.100	0.109	0.129	0.149	0.159
25.50	0.059	0.064	0.075	0.085	0.090
26.00	0.055	0.060	0.069	0.078	0.083
26.50	0.067	0.073	0.086	0.099	0.105
27.00	0.090	0.099	0.118	0.138	0.148
27.50	0.083	0.091	0.107	0.124	0.132
30.00	0.155	0.171	0.205	0.240	0.258
32.50	0.142	0.157	0.187	0.219	0.235
35.00	0.142	0.157	0.187	0.219	0.235
37.50	0.170	0.188	0.225	0.262	0.281
40.00	0.144	0.158	0.186	0.216	0.231

En las ilustraciones 6-29 y 6-30 se observan los perfiles de energía cinética de turbulencia promedio y máxima respectivamente para el R.E.S.P.M.

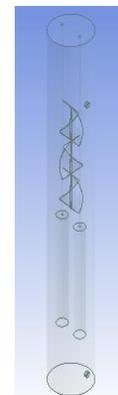
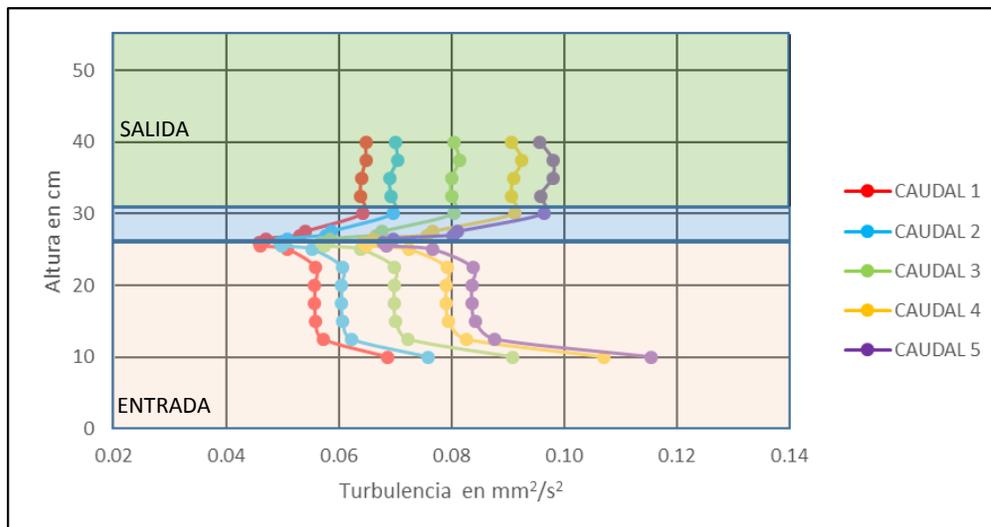


Ilustración 6-29 Perfil de energía cinética de turbulencia promedio, R.E.S.P.M.

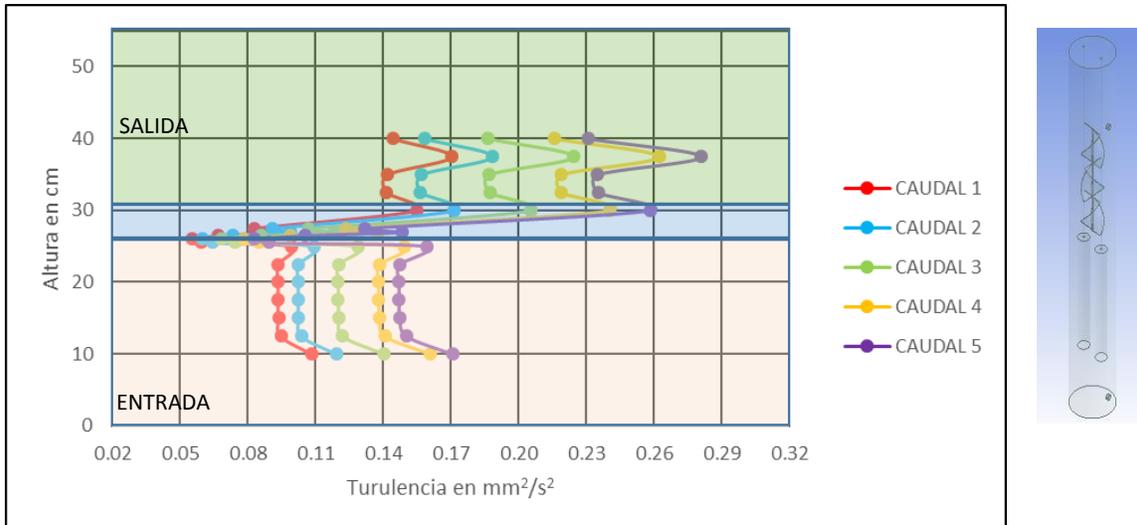


Ilustración 6-30 Perfil de energía cinética de turbulencia máxima, R.E.S.P.M.

Para este caso se observa en la *Ilustración 6-29* el aumento de los valores de energía cinética de turbulencia en la zona del mezclador estático intermedio, teniendo una turbulencia mayor que en la zona de la entrada, lo cual no sucede en el R.E.S.P. La *Ilustración 6-30* presenta valores máximos mucho más altos de energía cinética en la zona de los mezcladores, alcanzando valores 100% más altos a los valores ubicados en la zona del ánodo y cátodo, también presentando valores más altos que los primeros centímetros de la entrada del reactor.

En la siguiente *Ilustración (Ilustración 6-31)* se llevarán a cabo la comparación visual de la energía cinética de turbulencia, haciendo uso de los contornos, el inciso a) corresponde al caudal de operación, mientras el inciso b) al caudal máximo.

Energía Cinética de Turbulencia  
Plano 1

Energía Cinética de Turbulencia  
Plano 1

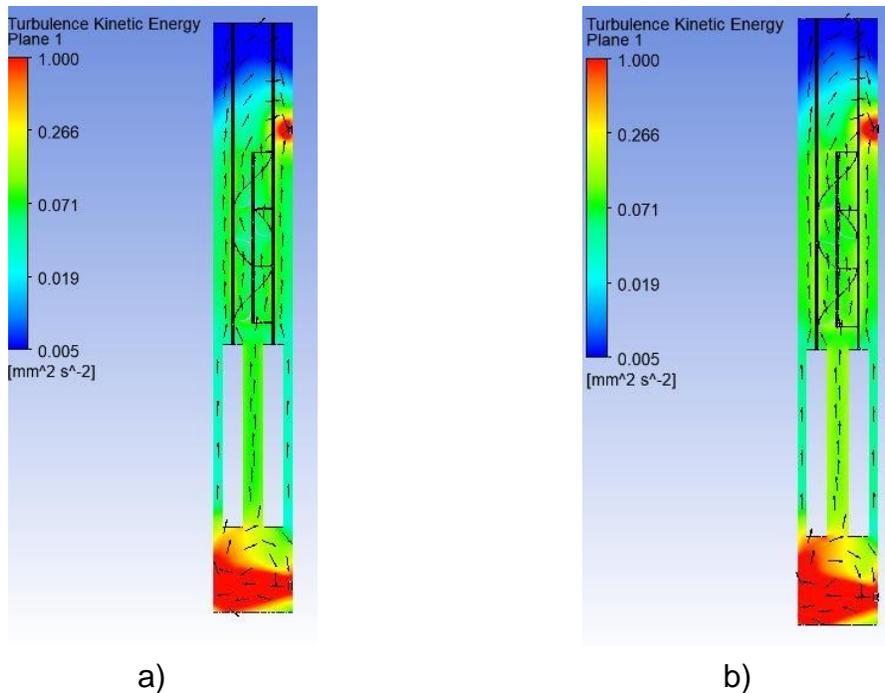


Ilustración 6-31 Contorno de energía cinética de turbulencia, R.E.S.P.M.

Los contornos demuestran la permanencia de los valores de energía cinética de turbulencia desde la entrada hasta la salida del reactor. Los costados del ánodo y cátodo muestran la presencia de zonas de turbulencia menor generando un promedio más bajo como se ve en la *Ilustración 6-29*, al igual en esta ilustración el promedio de turbulencia en el mezclador es mayor ya que ejerce influencia en toda la sección circular del reactor.

De acuerdo al análisis de las ilustraciones y tablas de este apartado se concluye que la presencia del mezclador influye mucho en la creación de una cantidad mayor de energía cinética de turbulencia.

#### 6.2.4 Resultados comparativos entre R.E.S.P. y R.E.S.P.M.

En este apartado se realiza la comparación numérica y gráfica de las condiciones hidrodinámicas de velocidad vertical y energía cinética de turbulencia, esta comparación se realizó con el fin de determinar si el R.E.S.P.M. tiene valores mayores de turbulencia comparado al R.E.S.P.

Para este apartado cabe mencionar que solo se compararán los dos reactores mencionados en el párrafo anterior, ya que los resultados de los reactores anteriores (R.E.S.T. y R.E.A.S.T.) son muy similares. Los resultados correspondientes a la comparación del R.E.S.P. y el reactor con mezclador estático interno se encontrarán en esta sección, siendo analizados mediante perfiles, planos longitudinales y transversales de las secciones de interés.

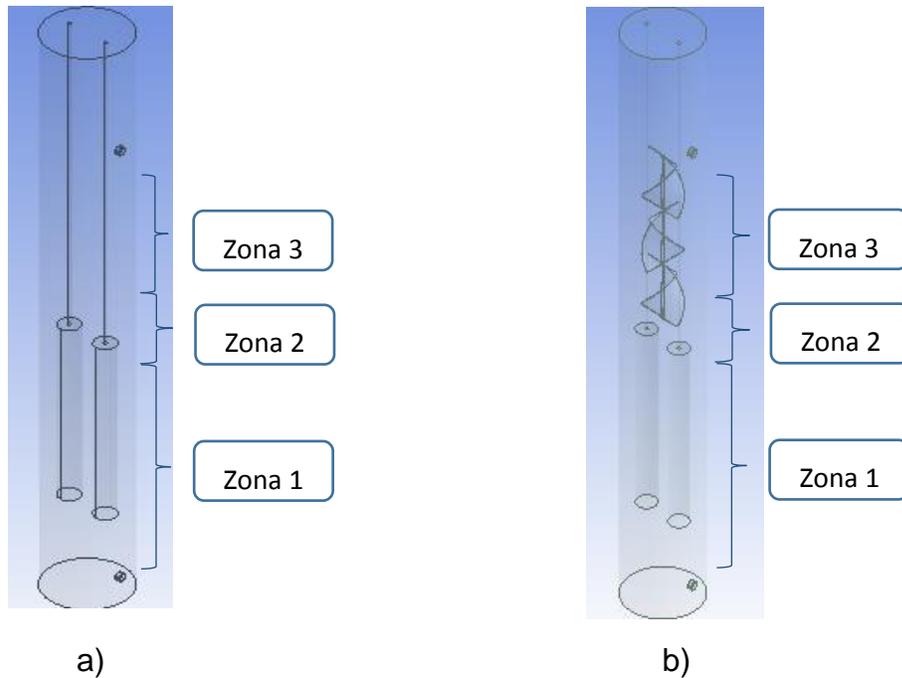


Ilustración 6-32 Modelos tridimensionales de los reactores: a) R.E.S.P.; b) R.E.S.P.M.

La *Ilustración 6-32 a)* representa las zonas del R.E.S.P., mientras la *Ilustración 632 b)* muestra las zonas del R.E.S.P.M.

### 6.2.5 Comparación velocidad total máxima

En el siguiente apartado son colocados los contornos y gráficas correspondientes a la velocidad total máxima para el caudal de operación y el caudal máximo, para cada reactor analizado. Para cada gráfica el reactor “prototipo” corresponde al R.E.S.P., el reactor “mezclador” al R.E.S.P.M.

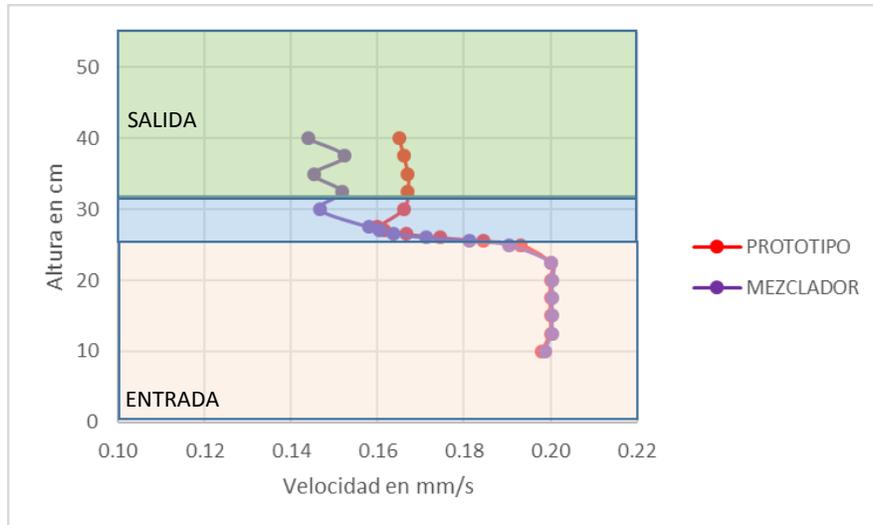
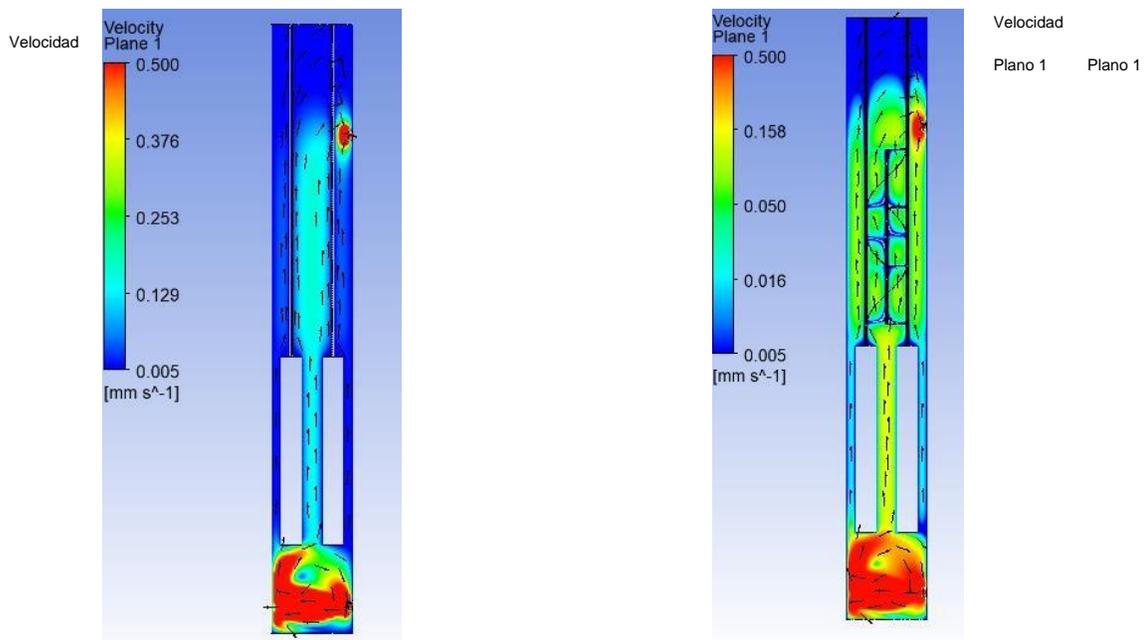


Ilustración 6-33 Perfiles de velocidad total máxima, para caudal de operación.

En la *Ilustración 6-33* se observa que la velocidad total máxima, se mantiene al inicio y en la zona central del reactor, los valores disminuyen en la zona del mezclador esto debido a las aspas que interfieren en el recorrido del flujo, con estos datos se puede concluir que la velocidad total máxima desciende al colocarse el mezclador estático, afectando al proceso de tratamiento. En *las ilustraciones 6-34 y 6-35* se muestran los contornos longitudinales y transversales en el interior del reactor, con el fin de tener una comparativa visual que ejemplifique el perfil de velocidad total máxima.



a)

b)

Ilustración 6-34 Contornos longitudinales de velocidad total, para caudal de operación. a) R.E.S.P.,  
b) R.E.S.P.M., para caudal de operación.

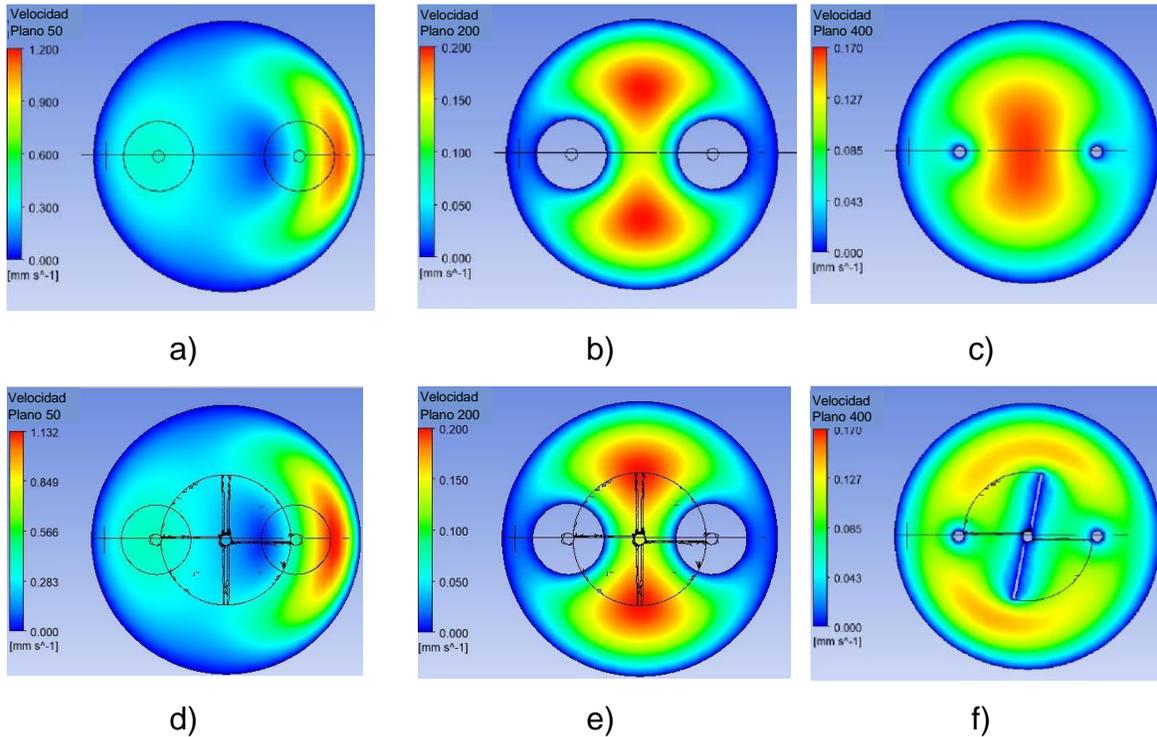


Ilustración 6-35 Contornos transversales de velocidad total, para caudal de operación. En la Ilustración anterior los incisos a) b) y c) corresponden al R.E.S.P. Los incisos d), e) y f) corresponden al R.E.S.P.M. Se puede apreciar en el inciso f) la presencia de las aspas del mezclador estático que reducen la velocidad del fluido comparado con el inciso c), mientras que para los incisos a), b), e) y d) tienen mucha similitud en sus valores.

En la Ilustración 6-34 se nota que la velocidad disminuye en la parte de los mezcladores, mientras que la zona inicial tiene valores muy similares con el R.E.S.P., como se había visto en la Ilustración 6-33.

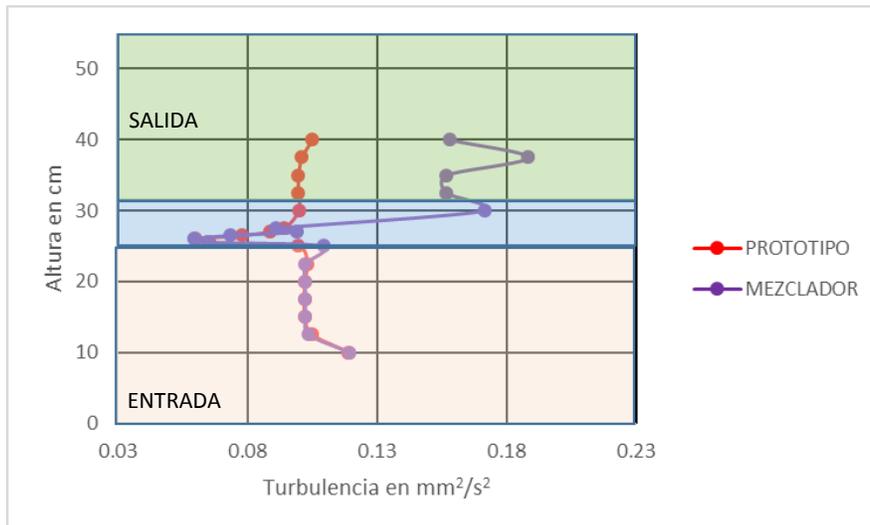
Se concluye para este apartado que si existe una diferencia entre el R.E.S.P. y el R.E.S.P.M. interno solo en la parte superior del reactor, lo cual se atribuye a la presencia del mezclador estático. Las modificaciones geométricas y de ubicación

de elementos iniciales afectaron menos que la colocación del mezclador estático. Los perfiles comparativos de velocidad total, al ser muy similares y no tener un impacto mayor en la investigación se encuentran en el ANEXO 4.

### 6.2.6 Comparación energía cinética de turbulencia máxima

En este apartado se colocan los contornos y gráficas correspondientes a la energía cinética de turbulencia para el caudal de operación y el caudal máximo, para el R.E.S.P. y el R.E.S.P.M.

En las *ilustraciones 6-36 y 6-37* se observan los perfiles de energía cinética de turbulencia máxima y promedio para al caudal de operación.



*Ilustración 6-36* Perfiles de energía cinética de turbulencia máxima, para caudal de operación.

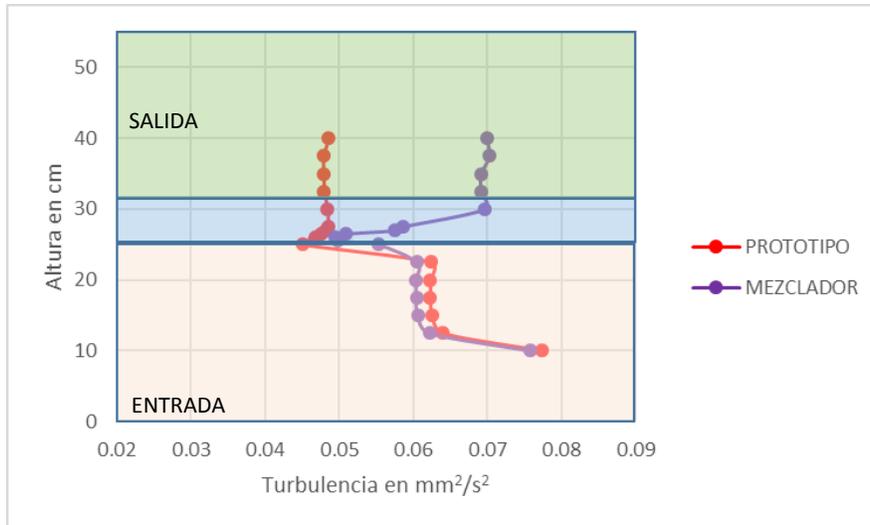
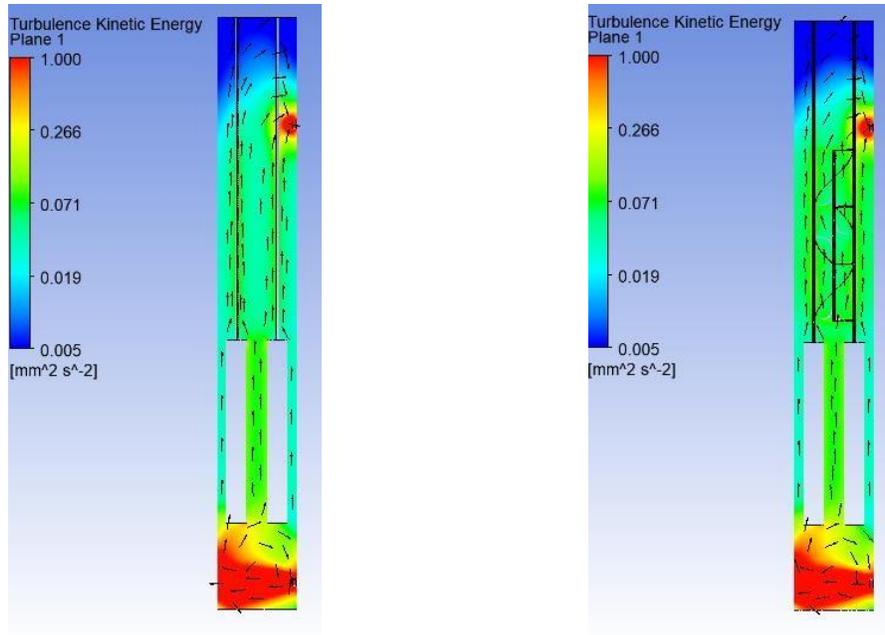


Ilustración 6-37 Perfiles de energía cinética de turbulencia promedio, para caudal de operación.

Las ilustraciones 6-36 y 6-37, muestran una diferencia notable en los valores máximos y promedio de energía cinética de turbulencia, notándose de forma más visible en la parte del mezclador estático y teniendo una uniformidad en la zona de entrada y la zona del ánodo y el cátodo. De acuerdo a estas ilustraciones se determina que el uso de un mezclador estático en la zona alta del reactor, eleva la turbulencia en más de un 75% en esta zona, haciendo que este accesorio cumpla su función de crear una mayor turbulencia y mejorar la mezcla.

Se concluye que la colocación de un mezclador estático interno dentro del R.E.S.P. da como resultado valores mayores de energía cinética de turbulencia, pero velocidades menores, mientras que los reactores modificados geoméricamente y con ubicación de entrada y salida distintas dan una energía cinética de turbulencia y velocidades similares al R.E.S.P.

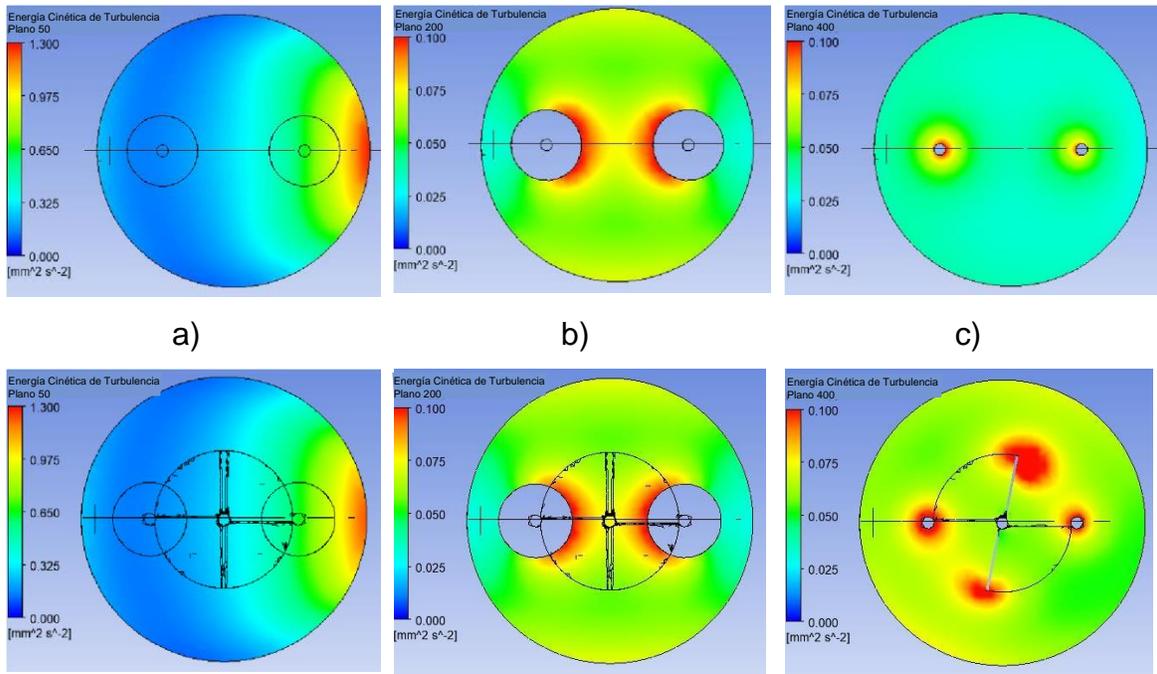
En la Ilustración 6-38, 6-39 se muestra de manera visual las similitudes en los contornos longitudinales y transversales de energía cinética de turbulencia, en el R.E.S.P. y el R.E.S.P.M., para el caudal de operación.



a)

b)

Ilustración 6-38 Contornos longitudinales de energía cinética de turbulencia, para caudal de operación. a) R.E.S.P., b) R.E.S.P.M.



a)

b)

c)

d)

e)

f)

Ilustración 6-39 Contornos transversales de energía cinética de turbulencia, para caudal de operación. a),b),c) Correspondientes al R.E.S.P., d),e) y f) Correspondientes al R.E.S.P.M.

Los contornos longitudinales comparativos de la *Ilustración 6-38* son muy similares de la zona inicial y media del reactor, se observa de manera visual un aumento de energía cinética de turbulencia en la zona del mezclador tal como se muestra en los perfiles de la *ilustraciones 6-36 y 6-37*, este aumento se mantiene estable desde el inicio del mezclador, hasta la salida del reactor.

Al ser el mismo reactor solo con la adición del mezclador estático intermedio, se observa en la *Ilustración 6-39* que los incisos *a),d)* y *b),e)* son iguales entre los dos reactores, ya que se mantienen los mismos elementos en el mismo lugar, mientras en los incisos *c)* y *f)* es clara la diferencia de energía cinética de turbulencia que es la zona correspondiente al mezclador, el inciso *f)* se le colocó el mismo intervalo para poder hacer una comparación realista con el inciso *c)*, ya que arrojaba valores superiores a  $0.15 \text{ mm}^2/\text{s}^2$ .

Con los resultados obtenidos en esta sección se llega a la conclusión de que el R.E.S.P.M. cumple satisfactoriamente con la creación de valores de energía cinética de turbulencia que era el objetivo principal de esta investigación, lo cual ayudará a un proceso de coagulación más eficiente que el R.E.S.P.

Los resultados globales entre el R.E.S.P., R.E.S.T., R.E.A.S.T. y el R.E.S.P.M., arrojan que la velocidad total dentro del reactor no aumenta ni disminuye de manera importante entre los primeros tres reactores (diferencias menores al 5%), mientras que para el cuarto reactor tiene una ligera baja en velocidad solo en la zona del mezclador menor al 15%, pero que tampoco influye de manera notable.

En esta investigación se buscó como dato primordial la energía cinética de turbulencia por lo cual la mejor alternativa de construcción del reactor, es el que proporcione una energía cinética de turbulencia mayor y que ayude a una mayor coagulación, en este caso el R.E.S.P.M. cumple una mejor función, elevando los

valores de energía cinética de turbulencia en un promedio mayor al 30% que los demás reactores, considerando así este reactor como la mejor propuesta.

### 6.2.7 Comparativa gradiente de velocidad promedio, máximo y número de Reynolds.

Con el fin de complementar la presente investigación, se anexaron resultados globales para las variables de gradiente de velocidad promedio, máximo y número de Reynolds, para el R.E.S.P. y el R.E.S.P.M., estos datos podrán orientarnos para conocer el comportamiento del fluido, y el impacto que tienen los gradientes de velocidad para la floculación en estos reactores electroquímicos.

La ilustración 6-40 presenta el contorno de gradiente de velocidad, observando mucha similitud entre ellos.

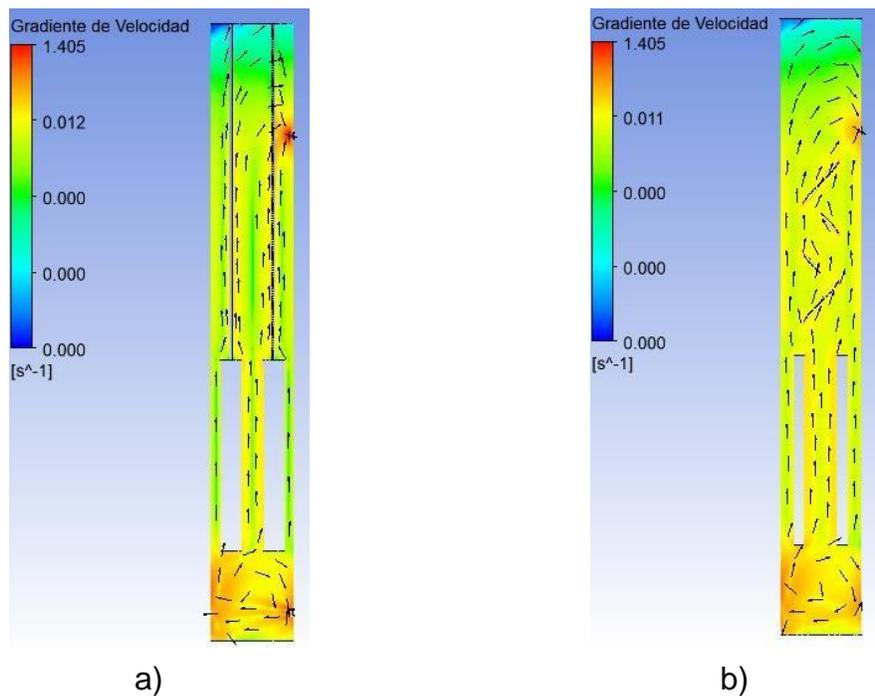


Ilustración 6-40 Contornos para gradientes de velocidad. a) R.E.S.P., b) R.E.S.P.M.

Como se observa, los valores para los gradientes de velocidad son menores a los recomendados en el proceso de floculación ( $20 \text{ a } 75 \text{ s}^{-1}$ ) propuestos en el trabajo de Vargas (2015). En las tablas 6-13, 6-14 se anexan los gradientes de velocidad promedio y máximo para ciertas alturas de los reactores, así como el número de Reynolds.

Tabla 6-13 Gradientes de velocidad y número de Reynolds R.E.S.P.

ALTURA (CM)	VELOCIDAD PROM. (mm/seg)	GRADIENTE PROM. (seg)	GRADIENTE MÁX. (seg)	REYNOLDS
10.00	0.0790	0.0080	0.0194	5.233
12.50	0.0781	0.0077	0.0185	5.173
15.00	0.0781	0.0077	0.0185	5.173
17.50	0.0781	0.0077	0.0185	5.173
20.00	0.0781	0.0077	0.0185	5.173
22.50	0.0781	0.0077	0.0186	5.173
25.00	0.0315	0.0035	0.0288	2.087
25.50	0.0496	0.0061	0.0148	3.284
26.00	0.0572	0.0102	0.0174	3.792
26.50	0.0620	0.0102	0.0248	4.107
27.00	0.0647	0.0113	0.0284	4.284
27.50	0.0662	0.0119	0.0300	4.385
30.00	0.0680	0.0128	0.0317	4.504
32.50	0.0680	0.0128	0.0317	4.504
35.00	0.0680	0.0143	0.0317	4.504
37.50	0.0680	0.0125	0.0319	4.504
40.00	0.0685	0.0142	0.0331	4.537

Tabla 6-14 Gradientes de velocidad y número de Reynolds R.E.S.P.M.

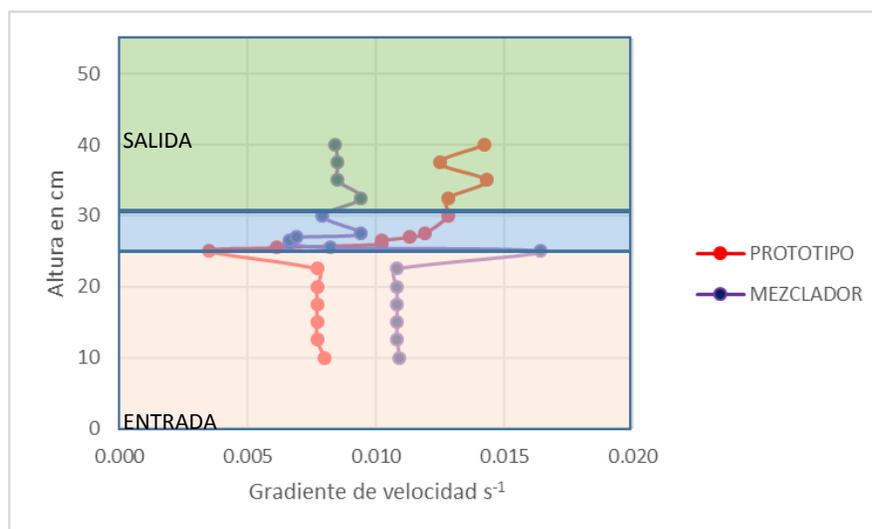
ALTURA (CM)	VELOCIDAD PROM. (mm/seg)	GRADIENTE PROM. ( $\text{seg}^{-1}$ )	GRADIENTE MÁX. (seg)	REYNOLDS
10.00	0.0834	0.0109	0.0230	5.523
12.50	0.0825	0.0108	0.0221	5.463
15.00	0.0825	0.0108	0.0217	5.462
17.50	0.0825	0.0108	0.0216	5.462
20.00	0.0825	0.0108	0.0216	5.462
22.50	0.0825	0.0108	0.0216	5.462
25.00	0.0456	0.0164	0.0294	3.018
25.50	0.0643	0.0082	0.0140	4.262
26.00	0.0679	0.0066	0.0093	4.496
26.50	0.0702	0.0066	0.0082	4.652
27.00	0.0673	0.0069	0.0090	4.460
27.50	0.0633	0.0094	0.0181	4.190
30.00	0.0656	0.0079	0.0125	4.346
32.50	0.0627	0.0094	0.0179	4.154
35.00	0.0632	0.0085	0.0122	4.186

## CAPÍTULO 6: RESULTADOS Y ANÁLISIS

37.50	0.0635	0.0085	0.0122	4.208
40.00	0.0657	0.0084	0.0125	4.352

Mediante el análisis de los datos, se percibe que los valores de gradientes de velocidad promedio y máximo bajan entre reactores, justamente en la zona del mezclador estático interno, teniendo valores mayores el R.E.S.P. comparado al R.E.S.P.M. Cabe mencionar que esto sucede por la colocación del mezclador, ya que disminuye la velocidad promedio y a su vez a los gradientes de velocidad, este mismo caso se presenta para el número de Reynolds, el cual indica que el flujo es laminar en todas las secciones del reactor.

Las *ilustraciones 6-41 y 6-42* muestran los perfiles comparativos para los gradientes de velocidad promedio y máximo respectivamente. La ilustración 6-43 corresponde a las variaciones del número de Reynolds a lo largo de los reactores. Para cada gráfica el reactor “prototipo” corresponde al R.E.S.P., el reactor “mezclador” al R.E.S.P.M.



*Ilustración 6-41 Gradiente promedio de velocidad para R.E.S.P. y R.E.S.P.M.*

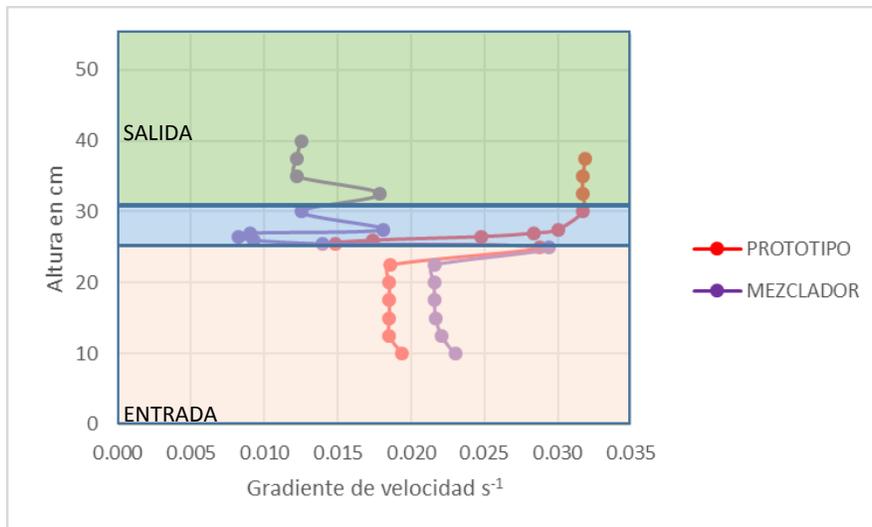


Ilustración 6-42 Gradiente de velocidad promedio para R.E.S.P. y R.E.S.P.M.

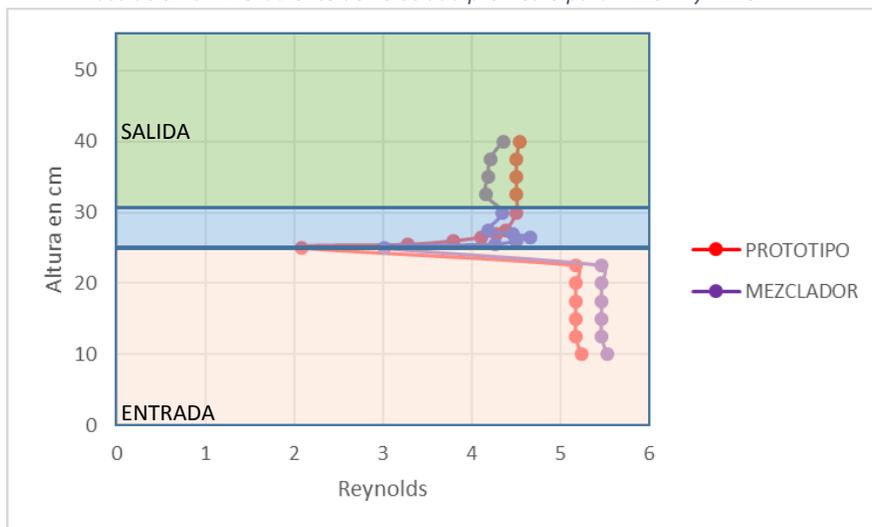


Ilustración 6-43 Número de Reynolds para R.E.S.P. y R.E.S.P.M.

## 7. CAPÍTULO 7

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La utilización de la CFD, es una herramienta muy útil para la definir las propiedades hidrodinámicas dentro de reactores electroquímicos; al utilizar esta herramienta se puede proponer la construcción física del R.E.S.P.M., teniendo la certeza que tendrá mejores resultados.

Los reactores modificados en geometría y ubicación de elementos (R.E.S.T. y R.E.A.S.T.), no ayudan en la generación de valores más altos de turbulencia. En algunos casos la velocidad incrementa respecto al R.E.S.P., pero ésta no logra influir en la turbulencia. Se concluye que estas modificaciones no son eficaces si se busca una turbulencia mayor para la coagulación.

La colocación de un mezclador estático interno dentro del R.E.S.P., no influye en la velocidad total máxima y promedio, pero si influye considerablemente en el aumento de la turbulencia; teniendo valores máximos mayores en un 30% comparado al R.E.S.P. y a los otros reactores modificados geoméricamente (R.E.S.T. y R.E.A.S.T.); con lo cual se espera que ayude a una mayor coagulación de las partículas dentro del reactor, considerándose como la mejor propuesta.

La disminución de velocidad total en el R.E.S.P.M., no interfirió en el aumento de la energía cinética de turbulencia, sin embargo, para este caso, no es una propiedad que altere los resultados.

Se recomienda la medición de velocidades dentro del reactor por medio de técnicas ópticas (láser o sensores) para tener una comparativa más detallada contra los resultados obtenidos en la simulación por CFD. La medición con láser deberá realizarse con agua potable, ya que la calidad del agua residual de la investigación

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

---

de Carmona (2019) no es apta, debido a la cantidad de contaminante disueltos, provocando que no se pueda llevar a cabo una correcta medición.

La sujeción del ánodo y cátodo mediante varillas de acero, puede ser modificada por distintos materiales metálicos, que sean capaces de transportar la electricidad desde la fuente eléctrica hasta los electrodos, pero que no afecten en el tratamiento por la desintegración del material. Barras de plata, cobre, aluminio o alambres pueden ser utilizadas para sujeción, aunque el tiempo de desgaste variaría en cuestión del material y del diámetro utilizado.

Mediante la experimentación física del R.E.S.P. se observó que no hay presencia de flóculos que saturan la zona de entrada o salida, ya que un 99% de flóculos sedimentan en el tanque de salida y no dentro del reactor. Para el caso del R.E.S.P.M. se esperan los mismos resultados debido a que las velocidades son similares, en caso de crearse flóculos en la zona del mezclador, estos no podrán adherirse ya que la geometría del mezclador no lo permite. Puede hacerse uso de un dren de sedimentos en la parte inicial del reactor, con el cuál en un caso extraordinario podrían retirarse los coágulos.

Los gradientes de velocidad no son de gran impacto para el diseño de estos reactores, aunque si existe disminución de estos debido a la colocación del mezclador estático interno. De acuerdo a Carmona (2019) el parámetro fundamental para el diseño del R.E.S.P.M fue el tiempo de retención hidráulico. Se

recomienda el uso del gradiente de velocidad como un parámetro adicional de diseño, así como la comprobación experimental para conocer si se mejoraría la calidad del agua del efluente.

Como conclusión final y recomendación, se sugiere realizar la adaptación de elementos (mezcladores) que ayuden a mejorar la turbulencia, que la modificación geométrica y ubicación de elementos en la entrada y salida.

## A. Anexo 1

### Velocidad total, velocidad vertical y energía cinética de turbulencia para el R.E.S.T.

#### Velocidad total R.E.S.T.

En la *Tabla A-1* y *Tabla A-2* se muestran los resultados de velocidad total promedio y velocidad total máxima para los cinco caudales bases que se probaron anteriormente; de esta forma se conoce las velocidades promedio y máximas para cada altura. En la *Ilustración A-1* y *A-2* se muestran las gráficas comparativas de velocidad total promedio y velocidad máxima respectivamente en función de sus valores.

*Tabla A-1 Velocidad total promedio, R.E.S.T. (Resultados en mm/seg).*

ALTURA (CM)	CAUDAL 1	CAUDAL 2	CAUDAL 3	CAUDAL 4	CAUDAL 5
10.00	0.072	0.079	0.092	0.106	0.112
12.50	0.071	0.078	0.091	0.104	0.111
15.00	0.071	0.078	0.091	0.104	0.110
17.50	0.071	0.078	0.091	0.104	0.110
20.00	0.071	0.078	0.091	0.103	0.110
22.50	0.071	0.078	0.091	0.104	0.110
25.00	0.030	0.032	0.038	0.043	0.046
25.50	0.047	0.051	0.059	0.067	0.072
26.00	0.053	0.058	0.067	0.077	0.081
26.50	0.057	0.063	0.073	0.083	0.088
27.00	0.060	0.065	0.076	0.086	0.092
27.50	0.061	0.066	0.077	0.088	0.094
30.00	0.063	0.068	0.080	0.091	0.097

---

---

32.50	0.062	0.068	0.079	0.091	0.096
35.00	0.062	0.068	0.079	0.091	0.096
37.50	0.062	0.068	0.079	0.091	0.096
40.00	0.062	0.068	0.079	0.091	0.097

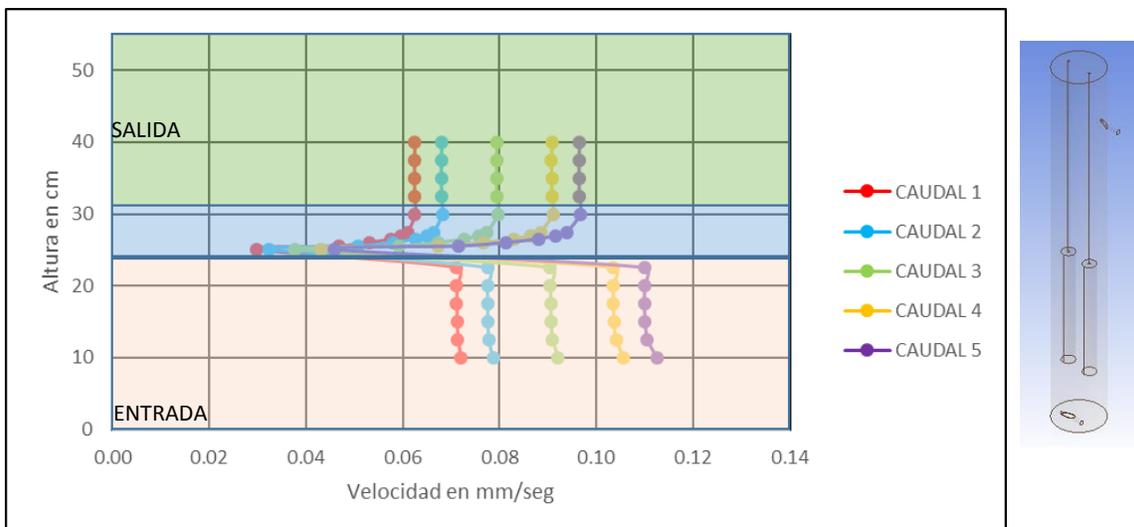


Ilustración A-1 Perfil de velocidad total promedio, R.E.S.T.

Tabla A-2 Velocidad total máxima, R.E.S.T. (Resultados en mm/seg).

ALTURA (CM)	CAUDAL 1	CAUDAL 2	CAUDAL 3	CAUDAL 4	CAUDAL 5
10.00	0.222	0.246	0.294	0.344	0.368
12.50	0.204	0.224	0.266	0.308	0.328
15.00	0.194	0.213	0.251	0.288	0.307
17.50	0.189	0.207	0.242	0.278	0.296
20.00	0.186	0.204	0.238	0.273	0.290
22.50	0.185	0.202	0.236	0.270	0.287
25.00	0.177	0.194	0.227	0.260	0.277
25.50	0.170	0.185	0.217	0.249	0.265
26.00	0.160	0.175	0.206	0.236	0.252
26.50	0.153	0.167	0.196	0.225	0.239
27.00	0.148	0.162	0.190	0.217	0.231
27.50	0.147	0.160	0.187	0.214	0.228
30.00	0.152	0.166	0.193	0.221	0.235
32.50	0.152	0.166	0.194	0.222	0.236
35.00	0.152	0.166	0.194	0.222	0.236
37.50	0.153	0.166	0.194	0.222	0.236
40.00	0.154	0.168	0.196	0.225	0.239

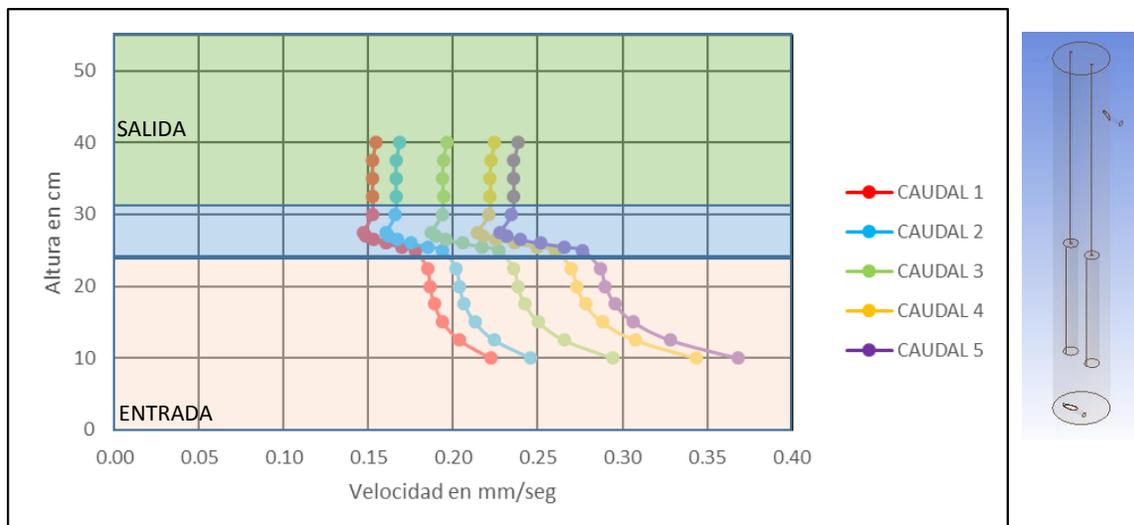
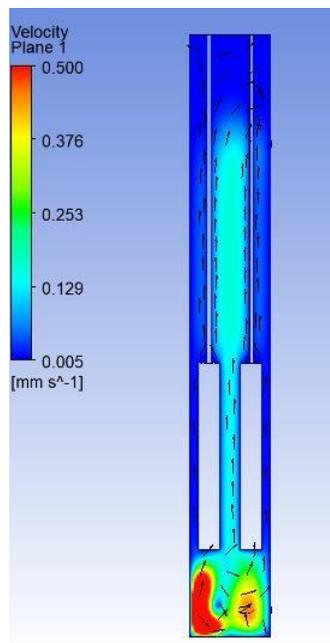


Ilustración A-2 Perfil de velocidad total máxima, R.E.S.T.

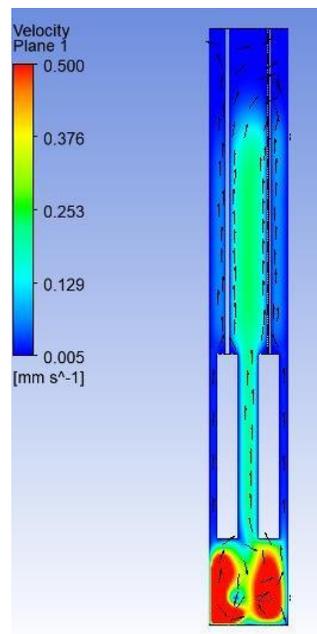
La *Ilustración A-3 a) y c)* muestra el contorno de velocidades totales y las líneas de corriente para el segundo caudal, mientras en la *Ilustración A-3 b) y d)* corresponden al quinto caudal. Esto para observar de forma gráfica las velocidades que se presentan en el reactor.

Cabe mencionar que para este reactor se monitorea el plano central al igual que en el R.E.S.P. y no el plano justo en la entrada del reactor, ya que los resultados que ejemplifican mejor la situación interior, son los que se encuentran en el plano central del reactor, no los que monitorean en la entrada y salida. Además de que los resultados de interés se encuentran entre 0.005 y 0.5 m/s.



Velocidad  
Plano 1

a)



Velocidad  
Plano 1

b)

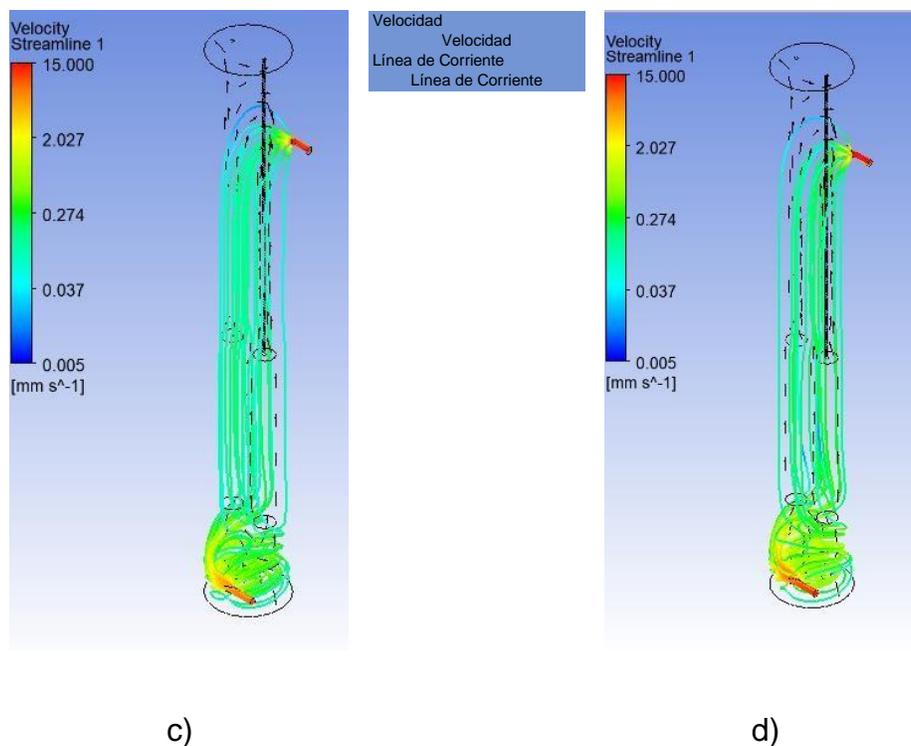


Ilustración A-3 Comparativa de contorno y líneas de corriente de velocidad total, R.E.S.T.

En este caso se observan de forma más clara la diferencia que causa el uso de éstos dos caudales teniendo una zona más intensa en la entrada. De acuerdo a las tablas, perfiles e ilustraciones anteriores se observa que los resultados para este reactor son muy similares a los resultados obtenidos para el R.E.S.P., por lo cual se puede asumir que el cambio en la ubicación de la entrada y salida no influye de forma considerable en los resultados.

### Velocidad vertical R.E.S.T.

En esta sección se colocan los resultados de velocidad vertical, en la *Tabla A-3* se muestran los valores de velocidad vertical promedio, y en la *Ilustración A-4* se coloca la gráfica que corresponde a los cinco caudales simulados. La *Tabla A-4* y la *Ilustración A-5* corresponden a los datos de velocidad vertical máxima.

Tabla A-3 Velocidad vertical promedio, R.E.S.T. (Resultados en mm/seg).

ALTURA (CM)	CAUDAL 1	CAUDAL 2	CAUDAL 3	CAUDAL 4	CAUDAL 5
10.00	0.071	0.078	0.090	0.103	0.110

12.50	0.071	0.078	0.091	0.104	0.110
15.00	0.071	0.078	0.091	0.104	0.110
17.50	0.071	0.078	0.091	0.104	0.110
20.00	0.071	0.078	0.091	0.103	0.110
22.50	0.071	0.078	0.091	0.103	0.110
25.00	0.029	0.032	0.037	0.043	0.045
25.50	0.045	0.049	0.057	0.065	0.069
26.00	0.052	0.057	0.066	0.075	0.080
26.50	0.057	0.062	0.072	0.082	0.087
27.00	0.059	0.065	0.075	0.086	0.091
27.50	0.061	0.066	0.077	0.088	0.094
30.00	0.063	0.068	0.080	0.091	0.097
32.50	0.062	0.068	0.079	0.091	0.096
35.00	0.062	0.068	0.079	0.091	0.096
37.50	0.062	0.068	0.079	0.091	0.096
40.00	0.062	0.068	0.079	0.091	0.096

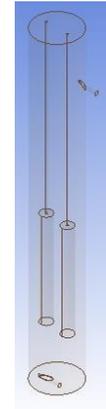
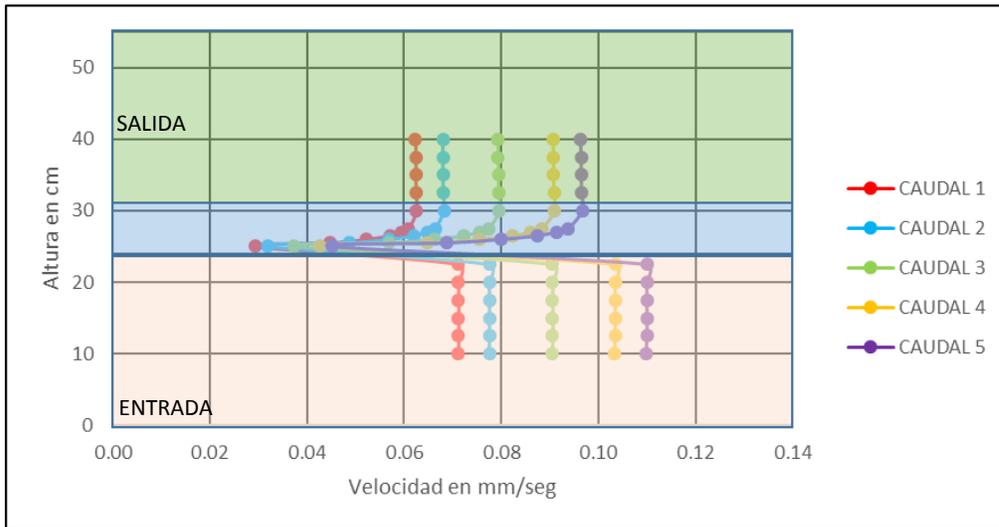
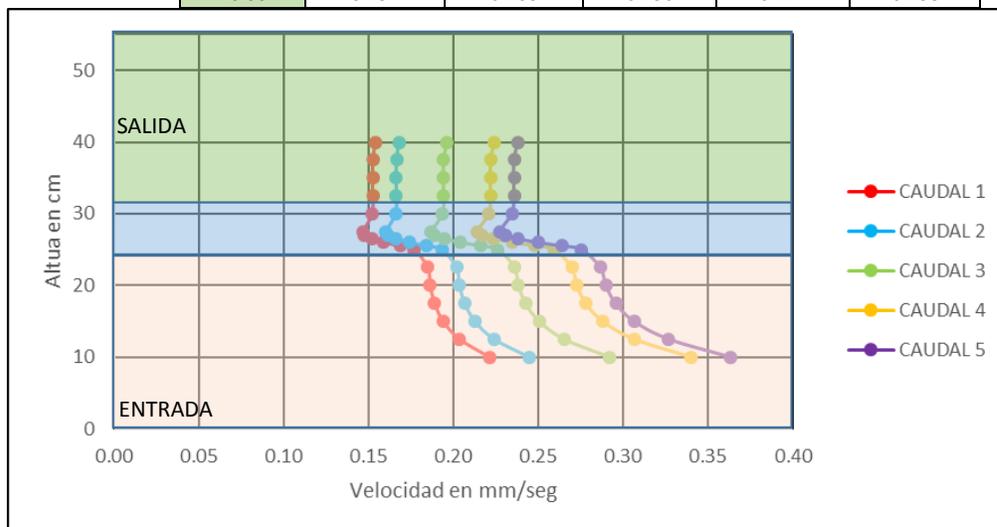


Ilustración A-4 Perfil de velocidad vertical promedio, R.E.S.T.  
 Tabla A-4 Velocidad vertical máxima, R.E.S.T. (Resultados en mm/seg).

ALTURA (CM)	CAUDAL 1	CAUDAL 2	CAUDAL 3	CAUDAL 4	CAUDAL 5
10.00	0.221	0.244	0.292	0.340	0.363
12.50	0.204	0.224	0.265	0.306	0.327
15.00	0.194	0.213	0.250	0.288	0.306
17.50	0.189	0.207	0.242	0.278	0.296
20.00	0.186	0.204	0.238	0.273	0.290
22.50	0.185	0.202	0.236	0.270	0.287
25.00	0.177	0.193	0.226	0.259	0.276
25.50	0.168	0.184	0.216	0.248	0.264
26.00	0.159	0.174	0.204	0.235	0.250
26.50	0.152	0.166	0.195	0.223	0.238
27.00	0.148	0.161	0.189	0.216	0.230
27.50	0.147	0.160	0.187	0.214	0.227

30.00	0.152	0.166	0.193	0.221	0.235
32.50	0.152	0.166	0.194	0.222	0.236
35.00	0.152	0.166	0.194	0.222	0.236
37.50	0.153	0.166	0.194	0.222	0.236
40.00	0.154	0.168	0.196	0.224	0.238

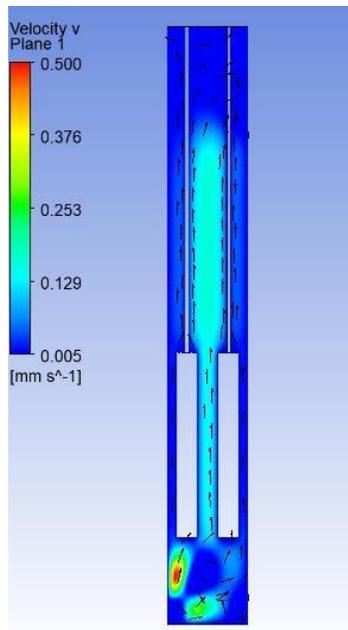


*Ilustración A-5 Perfil de velocidad vertical máxima, R.E.S.T.*

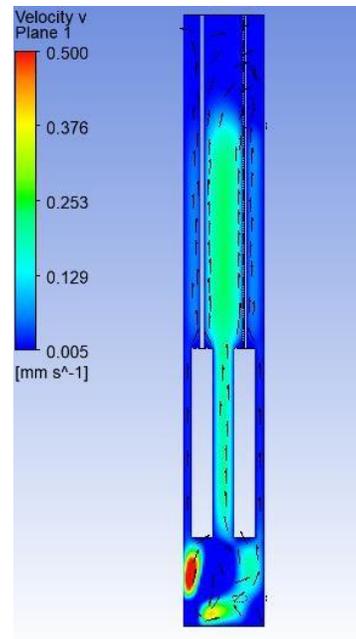
Como se observó, los resultados entre la velocidad vertical promedio y máxima son muy similares, lo cual da una conclusión similar a los resultados de velocidad total. En la *Ilustración A-6 a) y b)* se presentan los contornos de velocidad vertical, teniendo una diferencia de valores en la parte central del reactor y en la *Ilustración A-6 c) y d)* se observan las líneas de corriente de los caudales 2 y 5.

Velocidad V  
Plano 1

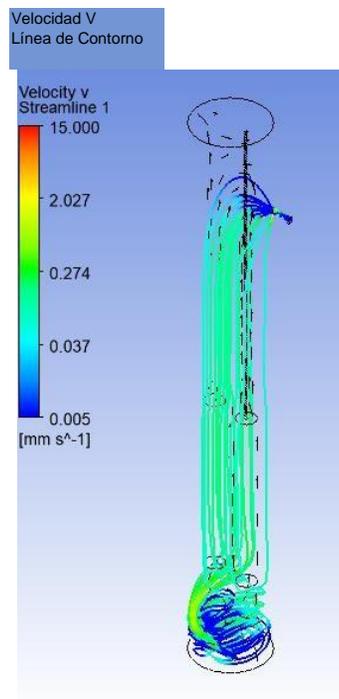
Velocidad V  
Plano 1



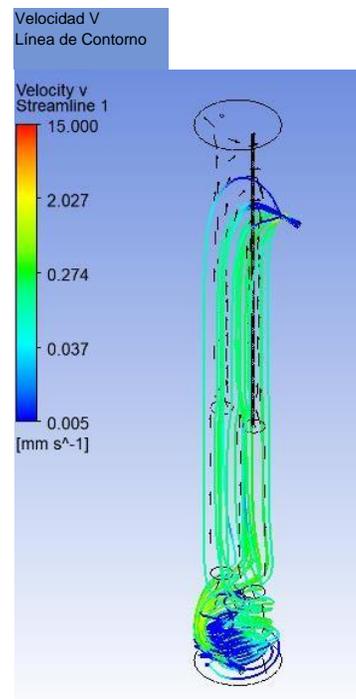
a)



b)



c)



d)

Ilustración A-6 Comparativa contorno y líneas de corriente de velocidad vertical, R.E.S.T.

## Turbulencia del R.E.S.T.

En esta sección se espera que los resultados de turbulencia sean mayores a los del R.E.S.P., en la *Tabla A-5* se muestran los resultados de turbulencia promedio, mientras los resultados de turbulencia máxima se exponen en la *Tabla A-6*. En las *ilustraciones A-7 y A-8* se muestran las gráficas de turbulencia promedio y máxima relativamente.

*Tabla A-5 Turbulencia promedio a diferentes alturas, R.E.S.T. (Resultados en mm<sup>2</sup>/seg<sup>2</sup>).*

ALTURA (CM)	CAUDAL 1	CAUDAL 2	CAUDAL 3	CAUDAL 4	CAUDAL 5
10.00	0.061	0.068	0.080	0.094	0.101
12.50	0.057	0.062	0.072	0.082	0.088
15.00	0.056	0.061	0.071	0.080	0.085
17.50	0.056	0.061	0.070	0.080	0.084
20.00	0.056	0.061	0.070	0.080	0.084
22.50	0.056	0.061	0.070	0.080	0.084
25.00	0.042	0.045	0.052	0.059	0.062
25.50	0.043	0.047	0.054	0.061	0.064
26.00	0.043	0.047	0.054	0.061	0.065
26.50	0.044	0.048	0.055	0.062	0.066
27.00	0.045	0.048	0.056	0.063	0.067
27.50	0.045	0.049	0.056	0.064	0.067
30.00	0.045	0.049	0.056	0.064	0.067
32.50	0.044	0.048	0.056	0.063	0.067
35.00	0.044	0.048	0.056	0.063	0.067
37.50	0.044	0.048	0.056	0.063	0.067
40.00	0.044	0.048	0.056	0.063	0.067

*Tabla A-6 Turbulencia máxima a diferentes alturas, R.E.S.T. (Resultados en mm<sup>2</sup>/seg<sup>2</sup>).*

ALTURA (CM)	CAUDAL 1	CAUDAL 2	CAUDAL 3	CAUDAL 4	CAUDAL 5
10.00	0.119	0.135	0.169	0.207	0.228
12.50	0.101	0.112	0.134	0.158	0.171
15.00	0.097	0.107	0.127	0.148	0.158
17.50	0.095	0.104	0.123	0.143	0.152
20.00	0.094	0.103	0.122	0.140	0.149
22.50	0.094	0.103	0.121	0.140	0.149
25.00	0.098	0.108	0.127	0.147	0.157
25.50	0.060	0.065	0.076	0.086	0.091
26.00	0.056	0.061	0.070	0.080	0.084
26.50	0.072	0.079	0.093	0.106	0.113

27.00	0.082	0.090	0.106	0.122	0.130
27.50	0.087	0.096	0.113	0.131	0.140
30.00	0.092	0.102	0.120	0.140	0.149
32.50	0.092	0.101	0.120	0.139	0.148
35.00	0.092	0.101	0.119	0.138	0.148
37.50	0.091	0.101	0.119	0.139	0.148
40.00	0.093	0.103	0.122	0.142	0.152

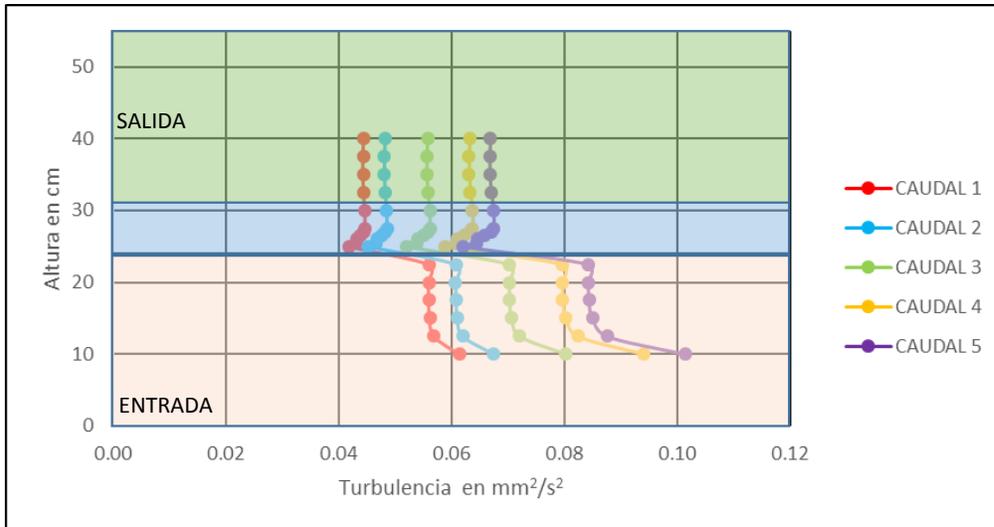


Ilustración A-7 Perfil de energía cinética de turbulencia promedio, R.E.S.T.

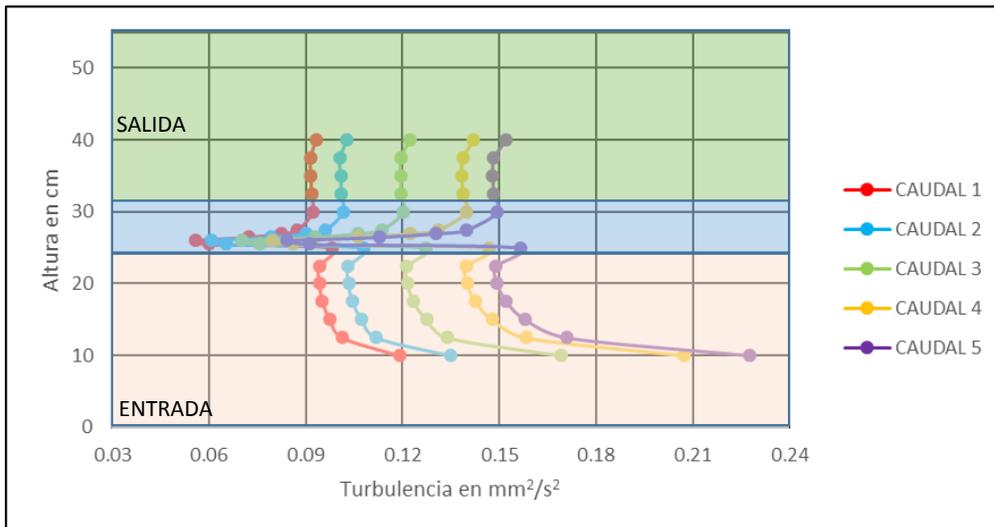
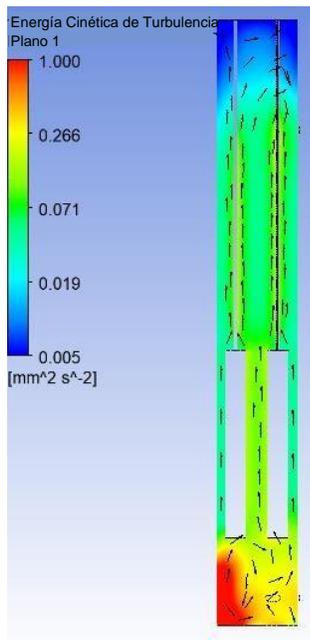


Ilustración A-8 Perfil de energía cinética de turbulencia máxima, R.E.S.T.

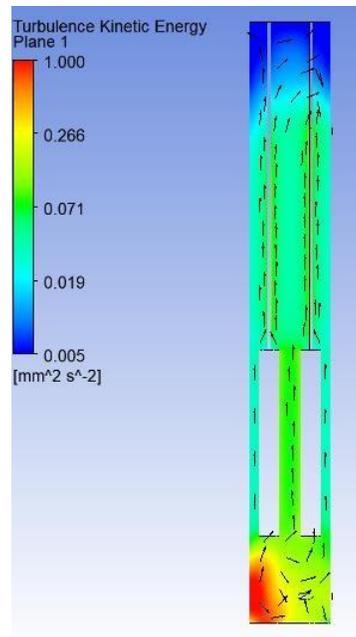
Las siguientes ilustraciones muestran los contornos de turbulencia para el segundo y quinto caudal (Ilustración A-9 a),b)) se puede observar una ligera diferencia en la

turbulencia, debido al caudal suministrado, esta turbulencia tiene valores muy similares al R.E.S.P.

Energía Cinética de Turbulencia  
Plano 1



a)



b)

Ilustración A-9 Contorno de energía cinética de turbulencia, R.E.S.T.

Se puede observar que la turbulencia del reactor no tuvo variación significativa, por lo cual se procede a la simulación del segundo reactor modificado el cual tiene la entrada curva al interior de este, y una salida tangencial.

## **A. Anexo 2**

### **Velocidad total, velocidad vertical y energía cinética de turbulencia para el R.E.A.S.T.**

#### **Velocidad total R.E.A.S.T.**

Para este reactor se espera tener una variación mayor en la velocidad, velocidad vertical y energía cinética de turbulencia, esto debido a la forma curva de la entrada, ya que el líquido entra al interior del reactor a  $1/8$  de la circunferencia, por lo que se supone que la velocidad de entrada se mantiene por más tiempo, causando que las velocidades centrales del reactor tengan una velocidad mayor.

Los resultados de velocidad total para este reactor se muestran en la *Tabla B-1* y *Tabla B-2*, velocidad total promedio y máxima para los cinco caudales respectivamente, así se conoce las velocidades promedio y máximas para cada altura. La *Ilustración B-1* y *B-2* muestran las gráficas comparativas de velocidad total promedio y velocidad máxima en función de sus valores.

Tabla A-1 Velocidad total promedio, R.E.A.S.T. (Resultados en mm/seg).

ALTURA (CM)	CAUDAL 1	CAUDAL 2	CAUDAL 3	CAUDAL 4	CAUDAL 5
10.00	0.072	0.078	0.091	0.105	0.111
12.50	0.071	0.078	0.091	0.104	0.110
15.00	0.071	0.078	0.091	0.104	0.110
17.50	0.071	0.078	0.091	0.104	0.110
20.00	0.071	0.078	0.091	0.104	0.110
22.50	0.071	0.078	0.091	0.104	0.110
25.00	0.030	0.033	0.038	0.044	0.046
25.50	0.046	0.051	0.059	0.067	0.071
26.00	0.053	0.058	0.067	0.076	0.081
26.50	0.057	0.062	0.072	0.083	0.088
27.00	0.060	0.065	0.076	0.086	0.091
27.50	0.061	0.066	0.077	0.088	0.094
30.00	0.063	0.068	0.079	0.091	0.096
32.50	0.063	0.068	0.079	0.091	0.096
35.00	0.063	0.068	0.079	0.091	0.096
37.50	0.062	0.068	0.079	0.091	0.096
40.00	0.063	0.068	0.079	0.091	0.096

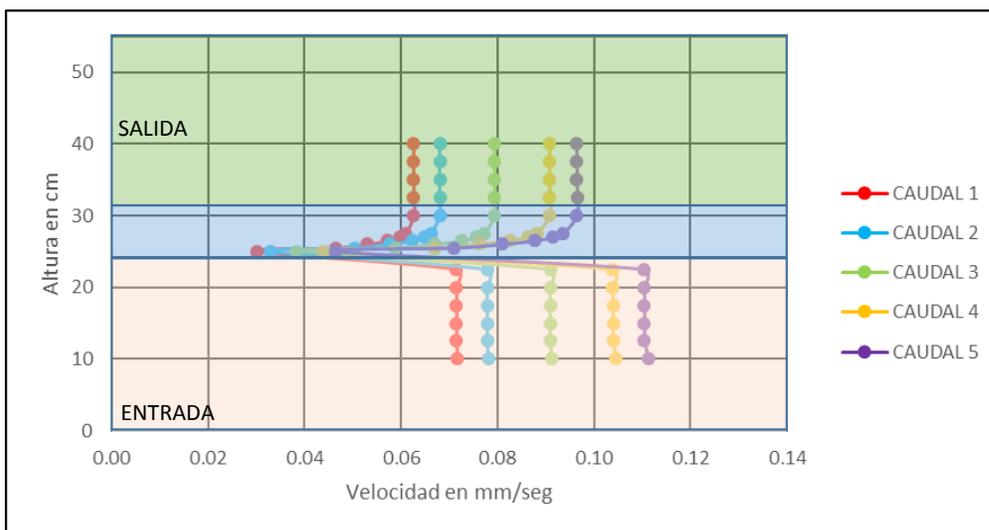


Ilustración A-1 Perfil de velocidad total promedio, R.E.A.S.T.

Tabla A-2 Velocidad total máxima, R.E.A.S.T. (Resultados en mm/seg).

ALTURA (CM)	CAUDAL 1	CAUDAL 2	CAUDAL 3	CAUDAL 4	CAUDAL 5
10.00	0.195	0.211	0.242	0.275	0.291
12.50	0.190	0.205	0.236	0.267	0.285
15.00	0.187	0.203	0.235	0.268	0.285
17.50	0.185	0.202	0.234	0.267	0.284
20.00	0.184	0.202	0.234	0.267	0.283
22.50	0.184	0.201	0.233	0.267	0.283

25.00	0.177	0.193	0.225	0.259	0.274
25.50	0.170	0.185	0.216	0.249	0.263
26.00	0.160	0.175	0.205	0.236	0.250
26.50	0.153	0.167	0.195	0.225	0.238
27.00	0.149	0.162	0.189	0.218	0.230
27.50	0.149	0.160	0.187	0.215	0.227
30.00	0.156	0.166	0.194	0.221	0.235
32.50	0.157	0.167	0.194	0.222	0.236
35.00	0.156	0.166	0.195	0.222	0.236
37.50	0.156	0.167	0.195	0.222	0.236
40.00	0.158	0.169	0.198	0.225	0.240

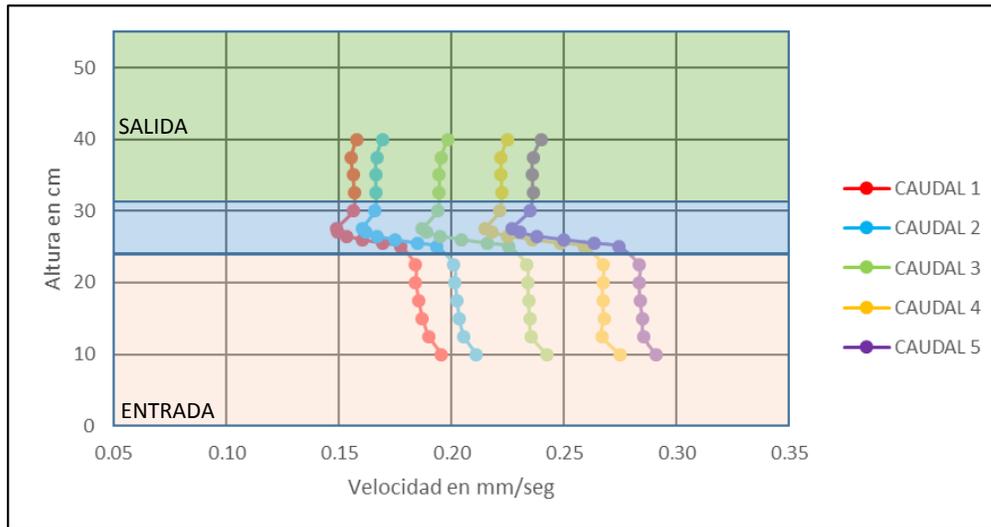
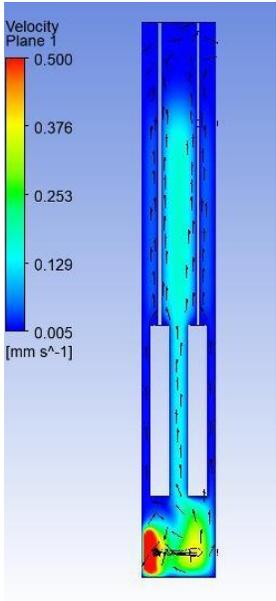
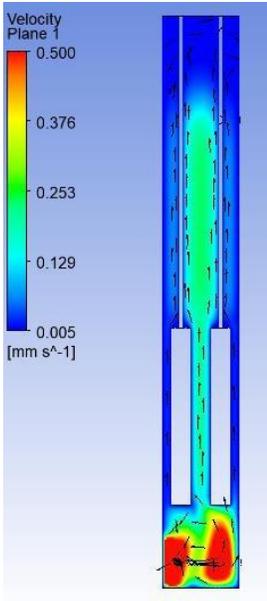


Ilustración A-2 Perfil de velocidad total máxima, R.E.A.S.T.

Al igual que en el R.E.S.T., para este reactor se monitorea el plano central, se observa en las ilustraciones de contorno que no presenta valores tan altos, debido a que el plano no se encuentra en la entrada del reactor. La *Ilustración B-3 a) y c)* muestra el contorno de velocidades totales y las líneas de corriente para el segundo caudal, mientras en la *Ilustración B-3 b) y d)* corresponden al quinto caudal.



Velocidad  
Plano 1



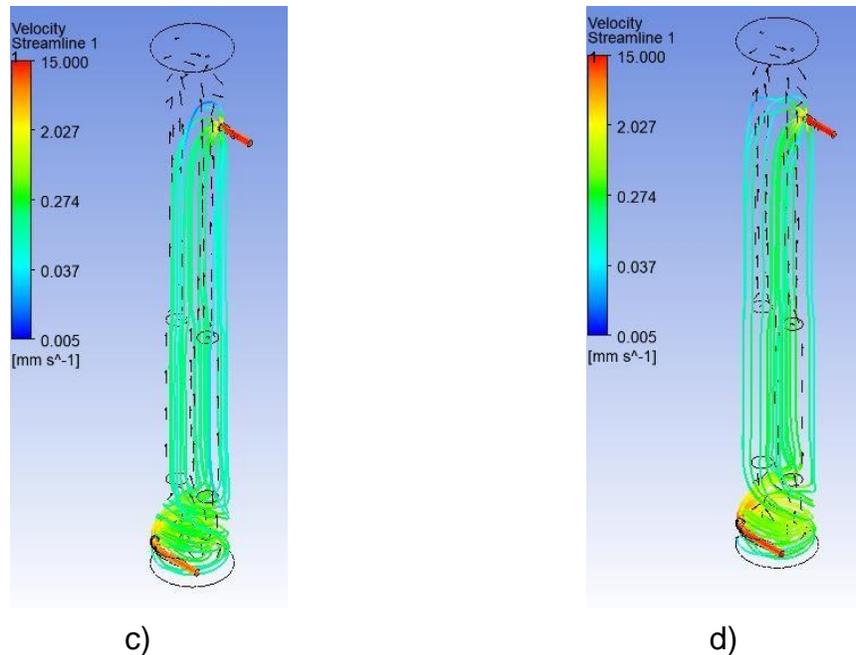
Velocidad  
Plano 1

a)

Velocidad  
Línea de Contorno

b)

Velocidad  
Línea de Contorno



*Ilustración A-3 Comparativa de contorno y líneas de corriente de velocidad total, R.E.A.S.T.*

En las ilustraciones se aprecia la diferencia en la velocidad total entre los caudales, notándose del lado derecho del reactor la diferencia de valores más significativos. De acuerdo a las tablas, perfiles e ilustraciones anteriores se observa que los resultados para este reactor son ligeramente mayores a los resultados obtenidos para el R.E.S.P. y muy similares al R.E.S.T.

### **Velocidad vertical R.E.A.S.T.**

En esta sección se colocan los resultados de velocidad vertical, en la *Tabla B-3* se muestran los valores de velocidad vertical promedio, la *Ilustración B-4* corresponde a los valores graficados de la Tabla anteriormente mencionada. La *Tabla B-4* y la *Ilustración B-5* corresponden a los datos de velocidad vertical máxima.

Tabla A-3 Velocidad vertical promedio, R.E.A.S.T. (Resultados en mm/seg).

ALTURA (CM)	CAUDAL 1	CAUDAL 2	CAUDAL 3	CAUDAL 4	CAUDAL 5
10.00	0.071	0.078	0.091	0.104	0.110
12.50	0.071	0.078	0.091	0.104	0.110
15.00	0.071	0.078	0.091	0.104	0.110
17.50	0.071	0.078	0.091	0.104	0.110
20.00	0.071	0.078	0.091	0.104	0.110
22.50	0.071	0.078	0.091	0.104	0.110
25.00	0.030	0.032	0.038	0.043	0.046
25.50	0.044	0.048	0.056	0.064	0.068
26.00	0.052	0.057	0.066	0.075	0.080
26.50	0.057	0.062	0.072	0.082	0.087
27.00	0.059	0.065	0.075	0.086	0.091
27.50	0.061	0.066	0.077	0.088	0.093
30.00	0.062	0.068	0.079	0.091	0.096
32.50	0.062	0.068	0.079	0.091	0.096
35.00	0.062	0.068	0.079	0.091	0.096
37.50	0.062	0.068	0.079	0.091	0.096
40.00	0.062	0.068	0.079	0.090	0.096

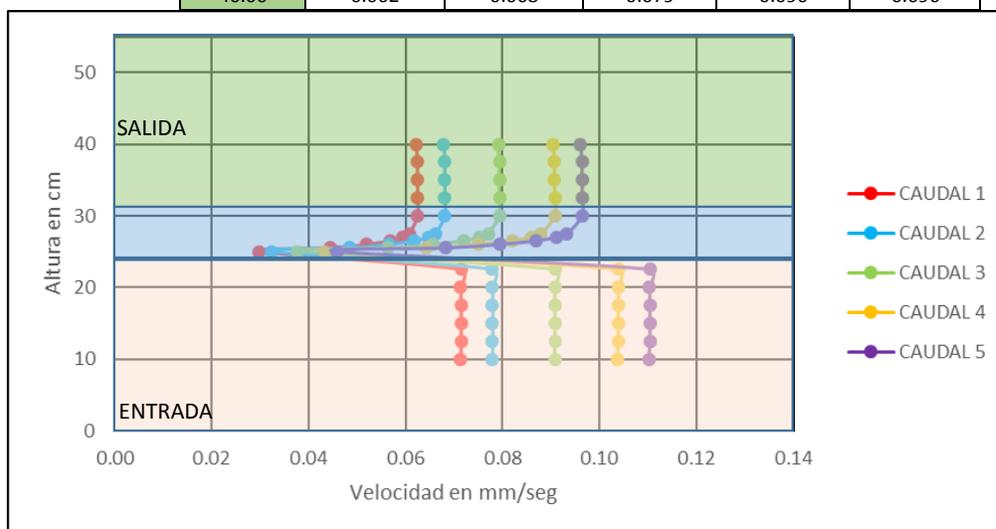


Ilustración A-4 Perfil de velocidad vertical promedio, R.E.A.S.T.

Tabla A-4 Velocidad vertical máxima, R.E.A.S.T. (Resultados en mm/seg).

ALTURA (CM)	CAUDAL 1	CAUDAL 2	CAUDAL 3	CAUDAL 4	CAUDAL 5
10.00	0.195	0.210	0.240	0.271	0.286
12.50	0.190	0.205	0.235	0.267	0.285
15.00	0.187	0.203	0.235	0.268	0.285
17.50	0.185	0.202	0.234	0.267	0.284
20.00	0.184	0.202	0.234	0.267	0.283
22.50	0.184	0.201	0.233	0.267	0.283
25.00	0.177	0.193	0.225	0.258	0.274
25.50	0.168	0.184	0.215	0.247	0.262
26.00	0.159	0.174	0.203	0.235	0.248

26.50	0.152	0.166	0.194	0.224	0.237
27.00	0.149	0.161	0.188	0.217	0.229
27.50	0.149	0.160	0.187	0.215	0.226
30.00	0.156	0.166	0.194	0.221	0.235
32.50	0.157	0.167	0.194	0.222	0.236
35.00	0.156	0.166	0.195	0.222	0.236
37.50	0.155	0.167	0.195	0.222	0.236
40.00	0.157	0.169	0.198	0.224	0.239

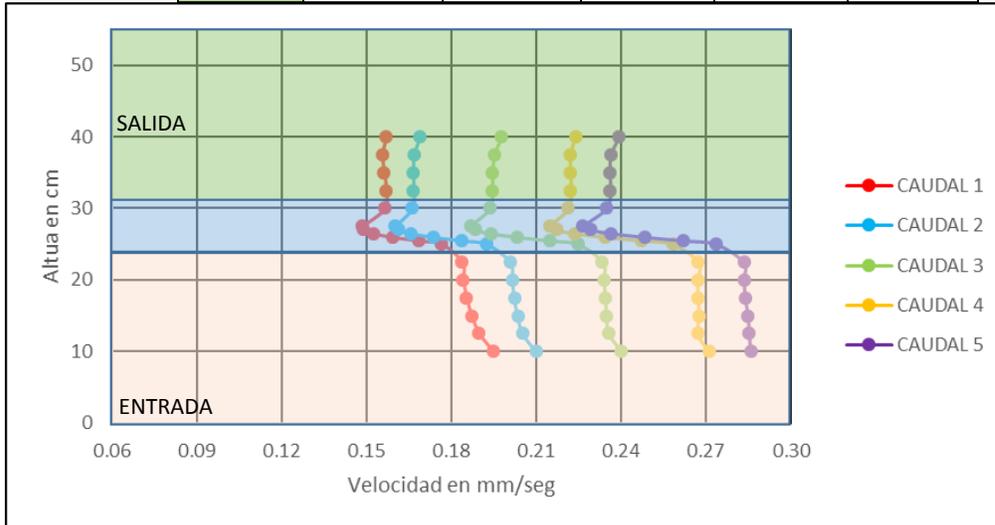


Ilustración A-5 Perfil de velocidad vertical máxima, R.E.A.S.T.

Los contornos de velocidad vertical para los caudales 2 y 5 se presentan en la *Ilustración B-6 a) y b)* respectivamente, mientras las líneas de corriente para estos caudales se muestran en la *Ilustración B-6 c) y d)*.

Velocidad V  
Plano 1

Velocidad V  
Plano 1

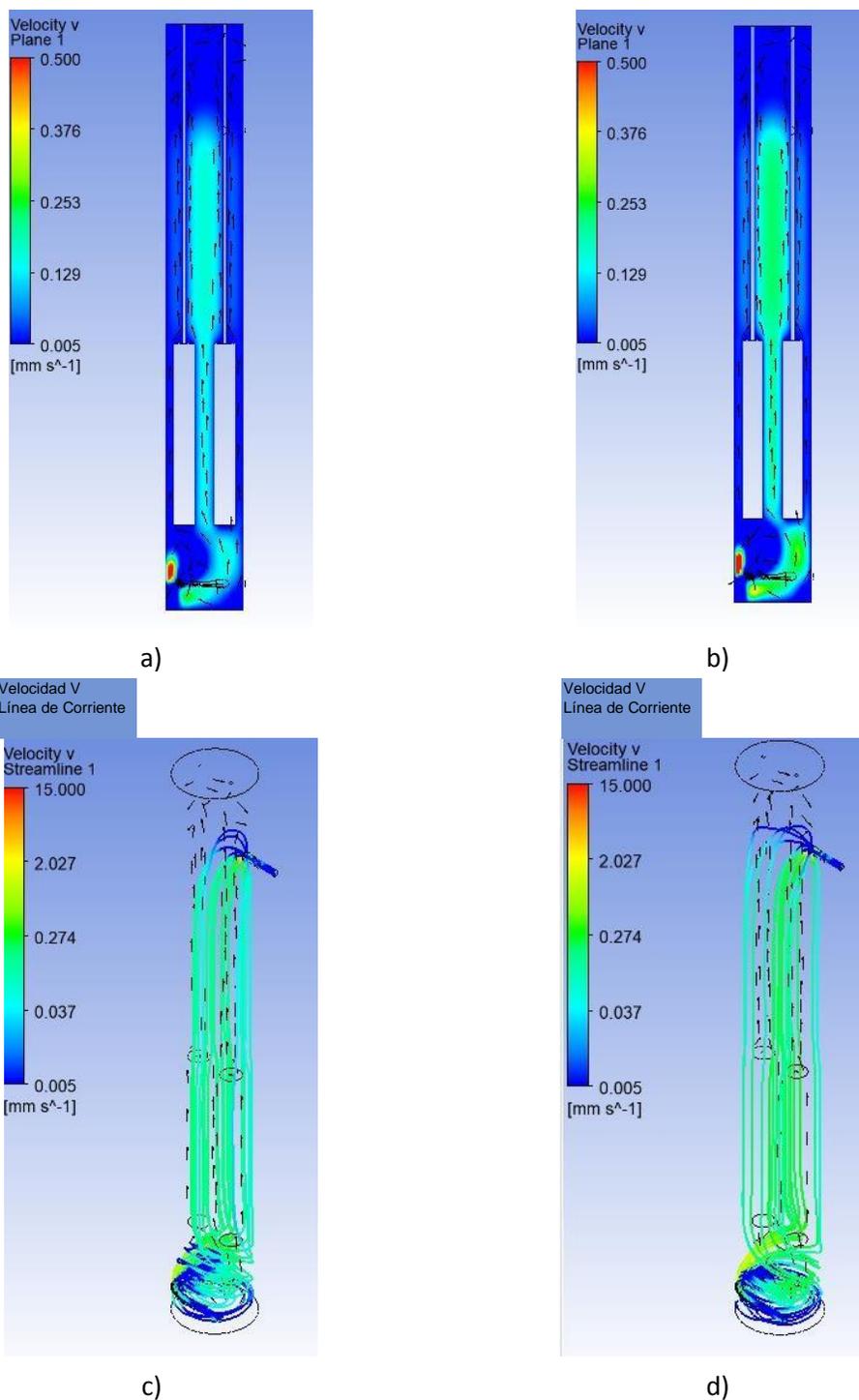


Ilustración A-6 Comparativa contorno y líneas de corriente de velocidad vertical, R.E.A.S.T.

De acuerdo a los perfiles de velocidad vertical de este anexo, se observa una diferencia de valores entre el R.E.S.T. y el reactor analizado en esta sección. Esta diferencia es visible en la entrada, ya que la velocidad es menor en un 25%, con lo

cual se pronostica que la modificación geométrica de este rector no aumenta la velocidad y por consiguiente tampoco aumentaría la turbulencia, teniendo un efecto contrario a lo esperado, en el siguiente apartado se colocarán los datos de turbulencia para comprobar los resultados.

### Turbulencia del R.E.A.S.T.

En esta sección se espera obtener resultados de turbulencia mayor al R.E.S.P. y al R.E.A.S.T. La *Tabla B-5* se observan los resultados de turbulencia promedio, mientras en la *Tabla B-6* se muestra la turbulencia máxima.

*Tabla A-5 Turbulencia promedio a diferentes alturas, R.E.A.S.T. (Resultados en mm<sup>2</sup>/seg<sup>2</sup>).*

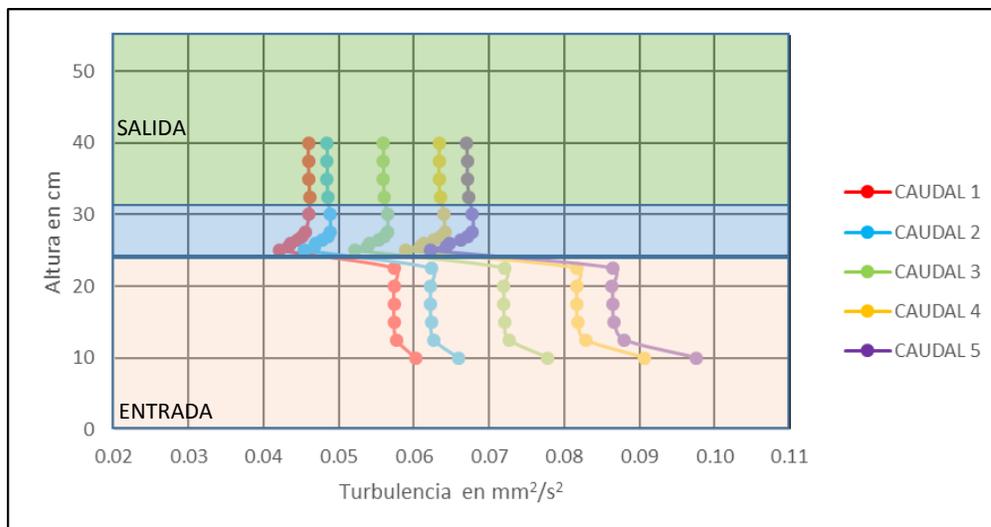
ALTURA (CM)	CAUDAL 1	CAUDAL 2	CAUDAL 3	CAUDAL 4	CAUDAL 5
10.00	0.060	0.066	0.078	0.091	0.098
12.50	0.058	0.063	0.073	0.083	0.088
15.00	0.057	0.062	0.072	0.082	0.087
17.50	0.057	0.062	0.072	0.082	0.086
20.00	0.057	0.062	0.072	0.082	0.086
22.50	0.057	0.062	0.072	0.082	0.086
25.00	0.042	0.045	0.052	0.059	0.062
25.50	0.043	0.047	0.054	0.061	0.064
26.00	0.044	0.047	0.054	0.061	0.065
26.50	0.044	0.048	0.055	0.063	0.066
27.00	0.045	0.048	0.056	0.064	0.067
27.50	0.046	0.049	0.056	0.064	0.068
30.00	0.046	0.049	0.056	0.064	0.068
32.50	0.046	0.049	0.056	0.064	0.067
35.00	0.046	0.048	0.056	0.063	0.067
37.50	0.046	0.048	0.056	0.063	0.067
40.00	0.046	0.048	0.056	0.063	0.067

*Tabla A-6 Turbulencia máxima a diferentes alturas, R.E.A.S.T. (Resultados en mm<sup>2</sup>/seg<sup>2</sup>).*

ALTURA (CM)	CAUDAL 1	CAUDAL 2	CAUDAL 3	CAUDAL 4	CAUDAL 5
10.00	0.106	0.116	0.139	0.165	0.180
12.50	0.096	0.105	0.122	0.140	0.150
15.00	0.095	0.103	0.121	0.138	0.148

17.50	0.094	0.103	0.120	0.138	0.147
20.00	0.094	0.103	0.120	0.138	0.147
22.50	0.094	0.103	0.121	0.139	0.148
25.00	0.096	0.105	0.123	0.142	0.151
25.50	0.061	0.065	0.076	0.087	0.092
26.00	0.057	0.061	0.071	0.080	0.085
26.50	0.075	0.081	0.095	0.109	0.115
27.00	0.085	0.093	0.109	0.125	0.134
27.50	0.091	0.099	0.116	0.134	0.143
30.00	0.097	0.104	0.124	0.144	0.153
32.50	0.097	0.104	0.123	0.143	0.153
35.00	0.096	0.104	0.123	0.143	0.153
37.50	0.097	0.104	0.123	0.144	0.152
40.00	0.097	0.104	0.123	0.145	0.152

La *Ilustración B-7* se observa la gráfica de turbulencia promedio y en la *Ilustración B-8* la turbulencia máxima. Al igual que en el apartado de velocidad, se observa una disminución en la turbulencia entre este reactor y el anterior, suponiendo que las modificaciones geométricas y de ubicación no son útiles para crear una mayor turbulencia.



*Ilustración A-7 Perfil de energía cinética de turbulencia promedio, R.E.A.S.T.*

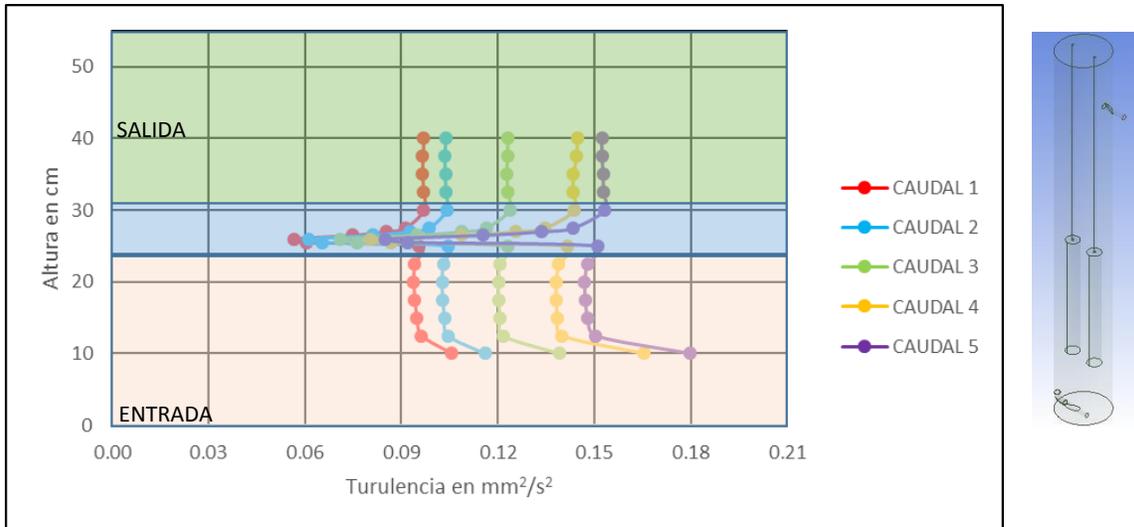


Ilustración A-8 Perfil de energía cinética de turbulencia máxima, R.E.A.S.T.

La *Ilustración B-9* muestra los contornos de energía cinética de turbulencia para los caudales anteriormente mencionados. Para conocer los valores e interpretación correcta la comparativa de estos resultados se lleva a cabo en el apartado de *resultados (capítulo 6)*.

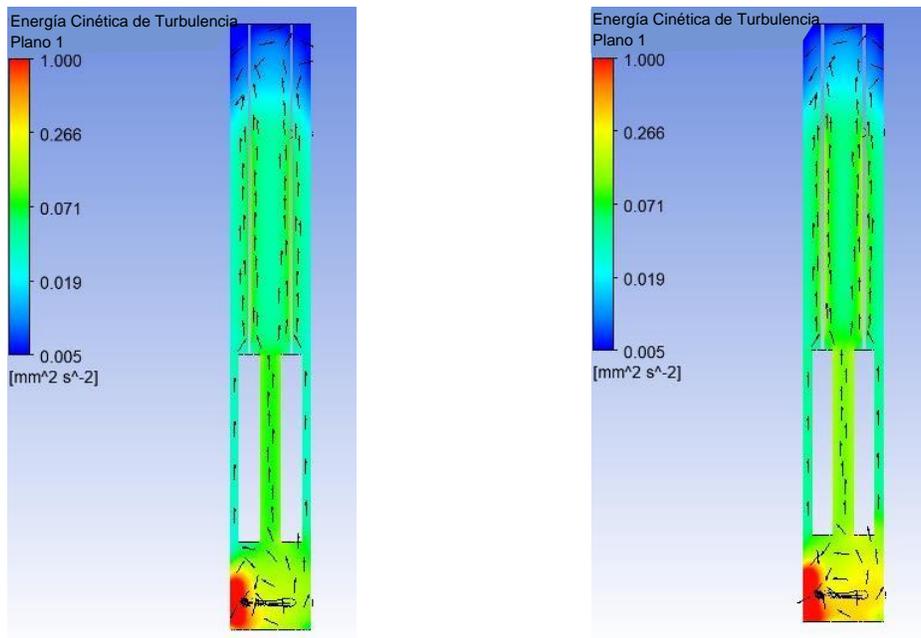
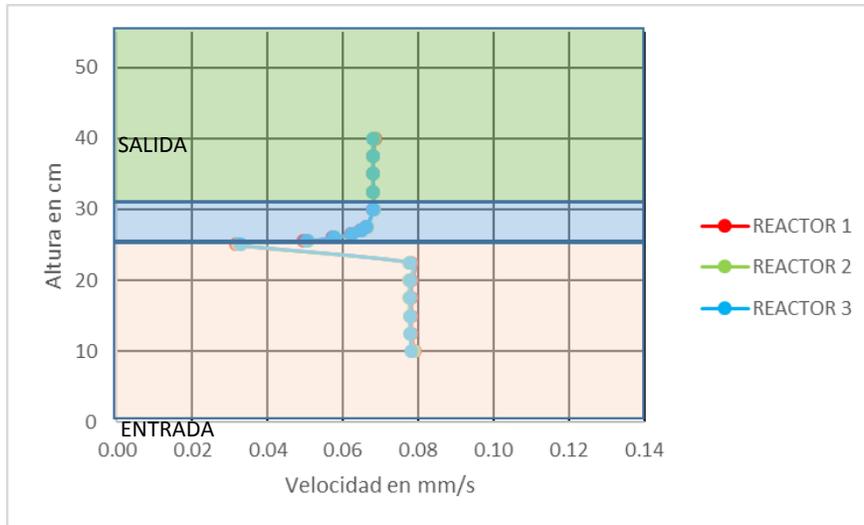


Ilustración A-9 Contorno de energía cinética de turbulencia, R.E.A.S.T.

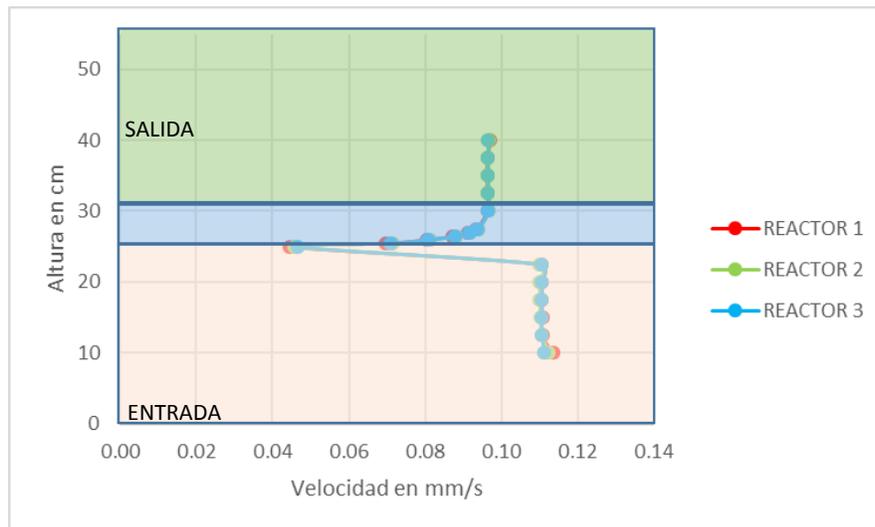
## **B. Anexo 3**

**Comparativa de perfiles de velocidad total, para R.E.S.P. y los reactores R.E.S.T. y R.E.A.S.T., para el caudal de operación y caudal máximo.**

En el siguiente apartado son colocadas las gráficas correspondientes a la velocidad total para el caudal de operación y el caudal máximo, para cada reactor analizado. Para cada gráfica el reactor 1 corresponde al R.E.S.P., el reactor 2 al R.E.S.T. y por último el reactor 3 al R.E.A.S.T.



*Ilustración B-1 Perfiles de velocidad total, para caudal de operación.*



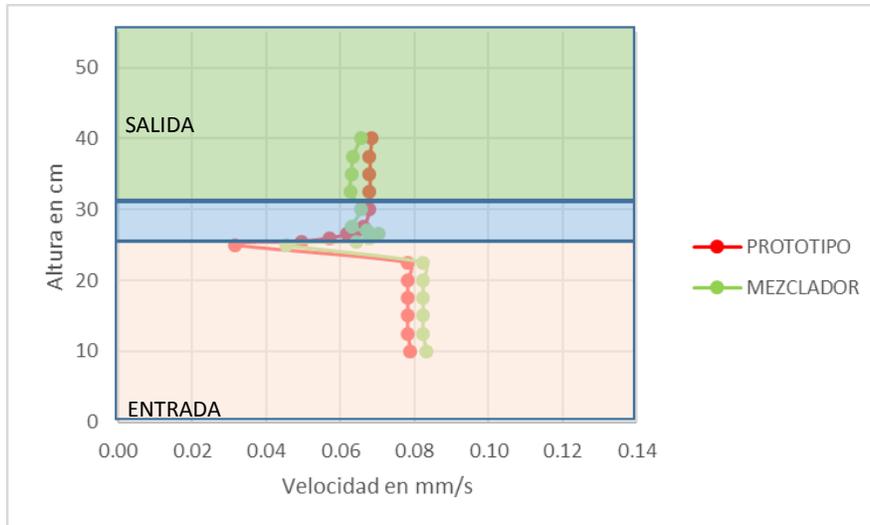
*Ilustración B-2 Perfiles de velocidad total máxima, para caudal máximo.*

De acuerdo a los perfiles de velocidad total tanto para el caudal de operación y el caudal máximo se observa que los valores promediados son demasiado similares entre los tres reactores, mostrando una diferencia casi nula, concluyendo que al igual que en la velocidad total máxima del aparatado 6.1.5 la geometría y la ubicación de los elementos influye poco en los resultados.

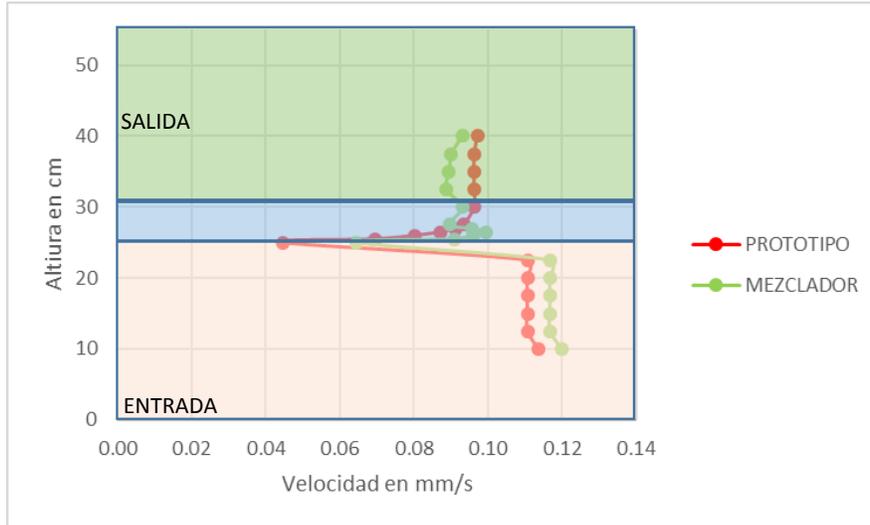
## **C. Anexo 4**

**Comparativa de perfiles de velocidad total, para R.E.S.P. y el R.E.S.P.M.,  
para el caudal de operación y el caudal máximo.**

En el siguiente apartado son colocadas las gráficas correspondientes a la velocidad total para el caudal de operación y el caudal máximo, para cada reactor analizado. Para cada gráfica el reactor “prototipo” corresponde al R.E.S.P., el reactor “mezclador” al R.E.S.P.M.



*Ilustración C-1 Perfiles de velocidad total, para caudal de operación.*



*Ilustración C-2 Perfiles de velocidad total, para caudal máximo.*

De acuerdo a los perfiles de velocidad total máxima tanto para el caudal de operación y el caudal máximo se observa que los valores promediados son similares entre los dos reactores. Al inicio los valores de velocidad total para el reactor con mezclador estático son más altos comparados a los valores del R.E.S.P., pero en la parte de los mezcladores al igual que la sección 6.2.5. disminuye ligeramente.

Para este anexo se concluye que al igual que la velocidad total máxima que la introducción del mezclador estático dentro del reactor provoca velocidades menores en la parte superior del reactor.

## **D. Anexo 5**

### **Descripción del Mezclador Estático Interno.**

En el siguiente apartado se colocan las dimensiones del Mezclador Estático Interno colocado en el R.E.S.P.M., así como los materiales que pueden ser utilizados para su construcción y fijación.

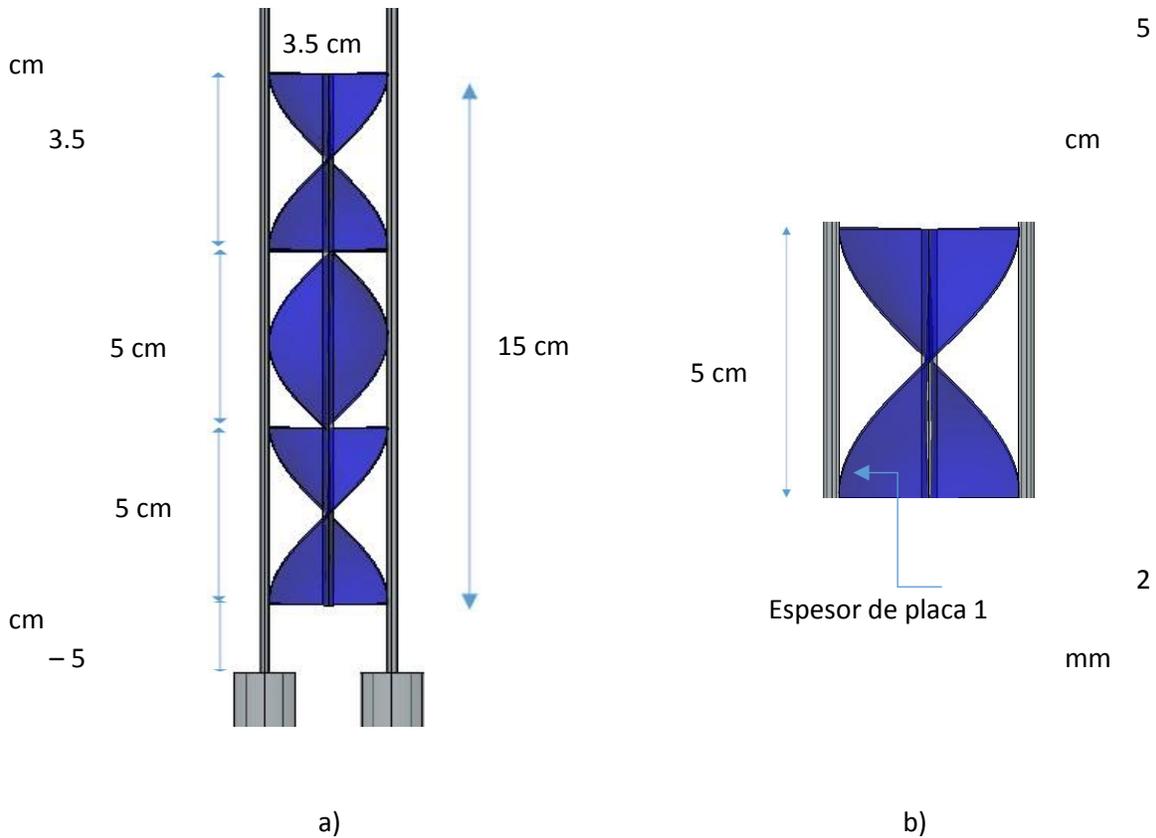


Ilustración D-1 Geometría Mezclador Estático Interno, a) Mezclador completo, b) Sección de mezclador.

El mezclador debe estar ubicado a 2 cm sobre paño superior del ánodo y del cátodo, teniendo una longitud de desarrollo de 15 cm y compuesto por tres secciones de las mismas características y tamaño.

El espesor del material para la construcción del mezclador deber tener un mínimo de 1mm hasta 5 mm como máximo, debido a que el material debe ser lo suficientemente grueso para no desprenderse por el movimiento del agua, a su vez no debe excederse de 5 mm de espesor para poder ser moldeable y no exista un desprendimiento por el peso del elemento.

El mezclador puede ser construido con melanina, policarbonato, poliestireno duro, acrílico, PET, etc. Éstos materiales pueden ser moldeados con técnicas de calor o mediante impresión 3D. Su fijación se realizará mediante silicón frío, pegamentos

industriales o sujeción con alambre desde la varilla hasta las perforaciones realizadas en el mezclador.

Es importante que la colocación de este mezclador sea justo en la zona indicada, ya que la colocación antes de los electrodos no apoyaría en el proceso de EC, debido a que el coagulante no estaría trabajando hasta que el nivel del agua tratada llegue al paño inferior de los electrodos, de esta forma solo se tendría una mayor energía cinética de turbulencia en la zona inicial pero el coagulante no estaría presente en la desestabilización del agua y no se haría correctamente el proceso de coagulación – floculación.

---

---

## Bibliografía

- Adhoun, N., Monser, L., Bellkhal, N. & Belgaid, J., 2004. Treatment of electroplating wastewater containing Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, and Cr(VI) by electrocoagulation.. *Journal of Hazardous Materials*, p. 207–213.
- Arango Ruíz, Á., 2005. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Lasallista de Investigación*, pp. 49-56.
- Azzam, M. & Y. Tahboub, M. A.-T., 1999. Effect of counter electrode material on the anodic destruction of 4-Cl phenol solution. *Trans. IChemE*, pp. 219-226.
- Barrera Díaz, C. E., 2014. *Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de agua residuales*. Ciudad de México : Reverté.
- BID, 2013. *Tratamiento de Aguas Residuales en México*, Ciudad de México: s.n.
- Blazek, J., 2007. *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. United Kingdom: BH.
- Bukhari, A. A., 2007. Investigation of electro-coagulation treatment process for the removal of total suspended solids and turbidity from municipal wastewater. *Bioresource Technology*, p. 914.
- Carmona, P. F. C., 2019. *Tratamiento por electrocoagulación en flujo continuo de aguas residuales. (Tesis de Maestría)*. Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Chan, R., 2010. *Química*. s.l.:McGraw Hill.
- Chávez, G. E. M., 2018. *Gobierno de la República*. [En línea] Available at:  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/149655/Gu\\_a\\_para\\_el\\_desarrollo\\_y\\_dise\\_o\\_d\\_e\\_proyectos.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/149655/Gu_a_para_el_desarrollo_y_dise_o_d_e_proyectos.pdf)
- Chen, G., 2003. Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, pp. 11-41.
- Choundary, A. & Mathur, S., 2017. Performance evaluation of 3D rotating anode in electro coagulation reactor. *Journal of Water Procces Engineering*, pp. 322 - 330.
- Coeuret, F., 1992. *Introducción a la ingeniería electroquímica*. Barcelona : Reverté.
- CONAGUA , 2016. *Intrducción al Tratamiento de Aguas Residuales Municipales*. [En línea] Available at: <https://www.gob.mx/conagua/documentos/biblioteca.digital-de-mapas>
- Costa López, J. y otros, 1991. *Curso de Ingeniería Química*. Barcelona: REVERTÉ.
- Frías Ferrer, A. J., 2004. *Optimización de la hidrodinámica de reactores electrqúimicos: empleo de métodos experimentales y numéricos (Tesis doctoral)*. España: Universidad de Alicante.
- Fukui, Y. & Yuu, S., 1985. Removal of colloidal particles in electroflotation. *AIChE Journal*, pp. 201208.

- 
- 
- Gurses, A., Yalcin, M. & Dogar, C., 2002. Electrocoagulation of some electrochemical variables.. *Waste Management*, pp. 491-499.
- Holt, P., 2002. *Electrocoagulation: unravelling and synthesising the mechanisms behind a water treatment process*. Australia: University of Sidney.
- Jiyuan, T., Guan-Heng, Y. & Chaoqun, L., 2018. *Computational Fluid Dynamics A Practical Approach*. Oxford: Peter Jardim.
- López Rebollar, B. M., 2015. *Aplicación de CFD-ANSYS-FLUENT en estudio hidrodinámico de tanques de recirculación empleados en acuicultura. (Tesis de Maestría)*. Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México.
- López-García, 2013. The hydrodynamic behavior of a parallel-plate electrochemical reactor. *Fuel*, pp. 162-170.
- Marín Galvín, R., 2012. *Procesos Físicoquímicos de Depuración de Aguas*. España: Díaz de Santos.
- Martínez-Delgadillo, S., 2013. Determination of the Spatial Distribution of the Turbulent. *International Journal of Electrochemical Science*, pp. 274-289.
- Martínez, N. F., 2008. *Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional*. Ciudad Real: Universidad de Castilla .
- Metcalf & Eddy, Inc., 2004. *Ingeniería en Agua Residuales Tratamiento, Vertido y Reutilización*. Madrid: McGraw-Hill.
- Mollah, M. Y. A. & Robert Schennach, D. L. C., 2001. Electrocoagulation (EC) - Science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, pp. 29-41.
- Nelissen, G., 2003. Laminar and turbulent mass transfer simulations in a parallel plate reactor. *Journal of Applied Electrochemistry*, p. 863–873.
- Raju, G. B. & Khangaonkar, P., 1984. Electroflotation A Critical Review. *Transactions of The Indian Institute of Metals*, pp. 59-66.
- Rodríguez, G. y otros, 2015. Hydrodynamic design of electrochemical reactors based on computational fluid dynamics. *Desalination and Water Treatment*, pp. 1-12.
- Rosales, M., Pérez, T. & Nava, J., 2016. Computational fluid dynamic simulations of turbulent flow in a rotating cylinder electrode reactor in continuous mode of operation. *Electrochimica Acta*, pp. 338-345.
- Sotelo Ávila, G., 1997. *Hidráulica General*. Ciudad de México: Limusa.
- Vázquez, A. y otros, 2014. The importance of current distribution and cell hydrodynamic analysis for the design of electrocoagulation reactors. *Chemical Technology and Biotechnology* , pp. 220229.

---

---

Villegas, R. A. & Letterman, R. D., 1976. Optimizing flocculator power input. *Journal of the Environmental Engineering Division*, 102(2), pp. 251-263.

Vlyssides, A., Papaioannou, D., Loizidou, M. & Zorpas, A., 2000. Testing an electrochemical method for treatment of textile. *Waste Management*, p. 569–574.

Wendt, J. F., 2009. *Computational Fluid Desing*. Réplica: Springer.

Xu, Q., 2010. *Internal Hydraulics of baffled disinfection contact tanks using Computational*. Thesis of Master of Cience degree.. Fort Collins, Colorado: Colorado State University.





Universidad Autónoma del Estado de México  
UAEM

Toluca, México a 12 de noviembre de 2020

Espacio Académico, Subdirector Académico, Coordinador de Programa  
Presente

**Carta de autorización para publicación en el RI**

**Declaración de autoría original, libre de embargo, susceptible de ser depositado en el Repositorio Institucional y solicitud de evaluación de grado.**

Quien firma al calce, declaro bajo protesta de decir verdad que soy el autor de la **TESIS DE LICENCIATURA** titulada **“MODELACIÓN DE UN REACTOR ELECTROQUÍMICO DE FLUJO CONTINUO POR CFD PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL”** y estoy de acuerdo con la totalidad de su contenido, manifiesto mi conformidad y mi autorización para que se publique en Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma del Estado de México, con fines académicos y culturales en formato de acceso abierto, en los términos del Reglamento de Acceso Abierto, la Normatividad vigente emitida por la Institución y las legislaciones aplicables en la materia.

Así mismo, declaro que responderé de la autoría y originalidad de la obra de mérito y del ejercicio pacífico de los derechos que autorizo en este acto, manifiesto que no existe otra persona física o moral a la que pertenezca; por lo cual libero de toda responsabilidad a la Universidad Autónoma del Estado de México de cualquier demanda o reclamación que llegara a formular alguna persona física o moral que se considere con derecho sobre la obra, asumiendo todas las consecuencias legales y económicas a que hubiera lugar.

De igual forma permito que la Oficina de Conocimiento Abierto perteneciente a esta Máxima Casa de Estudios, realice lo propio para el almacenamiento, preservación y difusión de la obra, con fines académicos y culturales en formato de acceso abierto y sin fines de lucro.

Firmo de conformidad y bajo protesta de decir verdad

Fabian Cervando Astudillo Luja

No. de cuenta: 0911540

Conozco y acepto los términos de privacidad de la Universidad Autónoma del Estado de México  
[http://web.uaemex.mx/avisos/Aviso\\_Privacidad.pdf](http://web.uaemex.mx/avisos/Aviso_Privacidad.pdf)