



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

**“Análisis de los vórtices Taylor-Couette en un reactor
tubular para la desinfección de agua mediante luz
ultravioleta”**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

María Lidia Palacios Contreras

DIRECTORES:

Dr. Alberto Armando Alvarez Gallegos

Dr. Fernando Zenaido Sierra Espinosa

NOMBRE DE LOS SONODALES:

Dra. Susana Silva Martínez,

Dr. Armando Huicochea Rodríguez

Dr. José Alfredo Hernández Pérez

Dra. Antonia Sandoval González

Dra. Alina Juantorena Ugás

CUERNAVACA, MORELOS

DICIEMBRE, 2019



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS
Jefatura de Posgrado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas

"1919-2019: en memoria del General Emiliano Zapata Salazar"

Cuernavaca, Morelos, a 05 de diciembre de 2019.

DR. ROSENBERG JAVIER ROMERO DOMÍNGUEZ
COORDINADOR DEL POSGRADO EN
INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada "Análisis de los vórtices Taylor-Couette en un reactor tubular para la desinfección de aguas mediante luz ultravioleta" que presenta la alumna **María Lidia Palacios Contreras**, para obtener el título de **Doctorado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas** con opción terminal en **Tecnología Química**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es:

NOMBRE	DICTAMEN	FIRMA
DRA. SUSANA SILVA MARTÍNEZ	APROBADO	
DR. ARMANDO HUICOHEA RODRÍGUEZ	Aprobado	
DR. JOSÉ ALFREDO HERNÁNDEZ PÉREZ	Aprobado	
DRA. ANTONIA SANDOVAL GONZÁLEZ (CIO, A.C.)	Aprobado	
DRA. ALINA JUANTORENA UGÁS (FCA)	Aprobado	
DR. FERNANDO ZENAIDO SIERRA ESPINOSA	Aprobado	
DR. ALBERTO ARMANDO ÁLVAREZ GALLEGOS	Aprobado	

PLAZO PARA LA REVISIÓN 20 DÍAS HÁBILES (A PARTIR DE LA FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO)

NOTA. POR CUESTIÓN DE REGLAMENTACIÓN LE SOLICITAMOS NO EXCEDER EL PLAZO SEÑALADO, DE LO CONTRARIO LE AGRADECEMOS SU ATENCIÓN Y NUESTRA INVITACIÓN SERÁ CANCELADA.

RESUMEN

En el presente trabajo, se diseñó y construyó un reactor tipo Taylor- Couette acoplado con una lámpara de luz UV que se ubicó dentro del diámetro del cilindro giratorio (cilindro interno) y se probó en un proceso de desinfección de agua.

Durante el análisis experimental se evaluó el efecto de la velocidad angular en la formación de vórtices toroidales rotatorios y su impacto en la cinética de la inactivación microbiana UV y se desarrolló un modelo cinético simple para predecir el comportamiento de supervivencia de la bacteria *Escherichia coli* (*E. coli*) durante el proceso de desinfección de agua por luz UV en el reactor tipo Taylor-Couette. El modelo incluye un análisis numérico de los vórtices toroidales rotatorios desarrollados dentro del espacio anular de los dos cilindros coaxiales utilizando el modelo viscoso k -épsilon RNG. La evaluación por CFD se utilizó como análisis previo en la determinación de los parámetros óptimos de operación del reactor para la etapa experimental.

Los resultados experimentales muestran que la inactivación microbiana sigue una ecuación cinética aparente de primer orden entre 300 y 2000 rpm. Por lo tanto, en este rango de velocidades angulares, se obtuvo un conjunto de valores k para una concentración dada de bacterias. Luego, el conjunto de valores k se correlacionó con el rango de velocidades angulares aplicadas usando una ecuación polinómica. A partir de esta ecuación, se pudo obtener un valor de k para una velocidad angular desconocida. Por lo tanto, se puede obtener una curva de simulación de inactivación microbiana a partir de la ecuación cinética de primer orden.

La eficiencia de la eliminación de bacterias mejora dependiendo de la velocidad angular aplicada, también se observó una buena relación entre la simulación del comportamiento de supervivencia de los microorganismos sometidos a desinfección UV con los datos experimentales.

ABSTRACT

In the present work, a Taylor-Couette-type reactor coupled with a UV light lamp that was located within the diameter of the rotating cylinder (internal cylinder) was designed and built and tested in a water disinfection process.

During the experimental analysis, the effect of angular velocity on the formation of rotary toroidal vortices and their impact on the kinetics of UV microbial inactivation was evaluated and a simple kinetic model was found to predict the survival behavior of *Escherichia coli* bacteria (*E coli*) during the process of disinfection of water by UV light in the Taylor-Couette reactor. The model includes a numerical analysis of the rotating toroidal vortices developed within the annular space of the two coaxial cylinders using the RNG k-epsilon viscous model. The evaluation by CFD is found as a previous analysis in the determination of the optimum operating parameters of the reactor for the experimental stage.

Experimental results show that microbial inactivation follows an apparent first order kinetic equation between 300 and 2000 rpm. Therefore, in this range of angular velocities, a set of k values was obtained for a given concentration of bacteria. Then, the set of values k was correlated with the range of angular velocities applied using a polynomial equation. From this equation, a value of k could be obtained for an unknown angular velocity. Therefore, a simulation curve of microbial inactivation can be obtained from the first order kinetic equation.

The efficiency of the elimination of bacteria improves depending on the angular velocity applied, a good relationship was also observed between the simulation of the survival behavior of the microorganisms subjected to UV disinfection with the experimental data

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis doctoral, si bien ha requerido de esfuerzo y dedicación, no hubiese sido posible su finalización sin la ayuda de todas y cada una de las personas y/o instituciones que a continuación citaré.

Primero y, antes que nada, a Dios, por la vida, por fortalecer e iluminar mi mente y darme paciencia durante la realización de este proyecto.

Agradecer hoy y siempre a mis padres Armando y Soco que, sin el esfuerzo realizado por ellos en todo este tiempo de mi vida, mis estudios no hubiesen sido posible. A, mi abuelita, mi hermano Alex, mi sobrina Fer, chimi por el ánimo, apoyo y alegría que me brindan día con día.

A mi compañero incondicional Arturo, por sus detalles, comprensión, desvelos y todo su amor.

A mis amigos: Bere, Lailani, Luisa, Viri y Ángel, por su sincera amistad y su gran apoyo incondicional y desinteresado, por siempre motivarme y ayudarme.

A todo el equipo del laboratorio 9 de ingeniería celular y biocatálisis del IBT: Xade, Fany, Paloma, Manuel, Adrián, Alan, Beto y la Dra. Katy por el apoyo brindado y su valiosa amistad que hicieron de mi estancia un tiempo inolvidable.

De igual manera mi más sincero agradecimiento al Dr. Alberto por el apoyo brindado como director de esta tesis. Así mismo a la Dra. Susana, Dra. Toñita, Dra. Alina, al Dr. Armando, Dr. Alfredo y al Dr. Fernando por su apoyo en todo este proceso administrativo y de revisión y aprobación de tesis.

Al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas y al Instituto de Biotecnología de la UNAM, por las facilidades prestadas para la realización del presente trabajo, acceso dentro de sus instalaciones y servicios y por la disposición de apoyar a generar nuevos conocimientos.

ÍNDICE

RESUMEN	i
AGRADECIMIENTOS	iii
CAPITULO 1. ANTECEDENTES	
1.1 ABASTECIMIENTO Y CONTAMINACIÓN DEL AGUA.....	1
1.2 MÉTODOS DE DESINFECCIÓN.....	1
1.3 LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA.....	2
1.4 REACTOR TAYLOR COUETTE.....	4
JUSTIFICACIÓN, OBJETIVOS E HIPOTESIS.....	8
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO	
2.1 DESINFECCIÓN DE AGUA.....	9
2.1.1 Cloración.....	9
2.1.2 Desinfección con ozono.....	11
2.1.3 Desinfección con luz ultravioleta.....	12
2.1.3.1 Radiación UV.....	12
2.1.3.2 Generación de la luz UV.....	12
2.1.3.3 Modo de acción.....	13
2.1.3.4 Reparación del daño fotoquímico	13
2.1.3.5 Factores que influyen en la reparación.....	14
2.1.3.6 Efecto germicida	14
2.1.3.7 Tipo de microorganismo	14
2.2 GEOMETRIA DE TAYLOR-COUETTE.....	15
2.2.1 Geometría de Couette.....	15
2.2.2 Geometría de Taylor.....	17
2.3 INTRODUCCIÓN A LA MECANICA DE FLUIDOS	22
2.4 DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL	23
2.4.1 Fenómeno de la turbulencia	25
2.4.2 Metodología de simulación numérica.....	28
2.4.3 Método de Volumen Finito (MVF).....	28
2.4.4 Algoritmos de Acople SIMPLE y SIMPLEC	30

CAPITULO 3. DESARROLLO TEÓRICO/EXPERIMENTAL	
3.1	DISEÑO DEL REACTOR 32
3.2	SIMULACIÓN NUMÉRICA 33
3.2.1.	Elaboración y mallado de la geometría..... 34
3.2.2.	Análisis de las mallas..... 35
3.2.3.	Análisis de flujo 36
3.3	CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR 38
3.4	ANÁLISIS DE VELOCIMETRÍA DE IMAGEN DE PARTICULAS (PIV)..... 39
3.4.1.	Uso del PIV..... 40
3.4.2	Análisis de flujo..... 41
3.5	PRUEBA DEL REACTOR EN EL PROCESO DE DESINFECCIÓN..... 42
3.5.2	Obtención de la muestra..... 42
3.5.1.1.	Cepa Bacteriana 42
3.5.1.2.	Medios de cultivo..... 42
3.5.1.3.	Obtención y activación de células de <i>E. coli</i> 43
3.5.2	Condiciones de cultivo..... 43
3.5.3	Preparación de la muestra..... 43
3.5.4	Efecto de los vórtices en la desinfección de agua..... 45
3.5.4.1	Desinfección sin agitación..... 46
3.5.1.2	Desinfección con agitación con luz UV..... 47
3.5.1.3	Dilución y cuenta en placa..... 47
3.6	DESARROLLO DEL MODELO CINÉTICO 49
CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
4.1	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR 50
4.2	ANÁLISIS DE LOS VORTICES TAYLOR-COUETTE..... 52
4.2.1	Simulación numérica..... 52
4.2.1.1	Malla y Convergencia de Malla..... 52
4.2.2.2	Análisis de flujo 55
4.2.2	Análisis de velocimetría de imagen de partículas (PIV)..... 59
4.3	EFFECTO DE LOS VORTICES EN LA DESINFECCION POR UV... 61

4.4	MODELO CINÉTICO DE PREDICCIÓN DEL ABATIMIENTO MICROBIANO.....	65
CAPITULO 5. CONCLUSIONES FINALES Y RECOMENDACIONES		
5.1	CONCLUSIONES.....	68
5.2	RECOMENDACIONES.....	69
	REFERENCIAS	70

LISTA DE TABLAS

CAPITULO 3. DESARROLLO TEÓRICO/EXPERIMENTAL

3.1	Mallas con su número de celdas y nodos.....	35
3.2	Parámetros para el índice de convergencia de malla.....	36

CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	Errores de diseño del reactor tipo Taylor-Couette.....	50
4.2	Características de las mallas utilizadas en el análisis de flujo.....	52
4.3	Valores de Re y Ta para el reactor del CIICAP y el prototipo utilizado por Tapan (2001).....	53
4.4	Resultados numéricos del análisis de convergencia de malla.....	54
4.5	Resultados de la velocidad axial a 300 rpm para CFD y PIV.....	60
4.6	% de abatimiento microbiano en los diferentes tratamientos.....	64
4.7	Constantes de las ecuaciones generadas a las diferentes velocidades de rotación.....	66

LISTA DE FIGURAS**CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO**

2.5	Líneas de corriente y recirculación del flujo (Taylor 1923).....	19
2.6	Evolución de los vórtices de Taylor	20
2.7	Diagrama de estabilidad experimental (Nemri 2013).....	21

CAPITULO 3. DESARROLLO TEÓRICO/EXPERIMENTAL

3.5	Geometría utilizada en el análisis del comportamiento de flujo....	34
3.6	Mallas generadas en ICEM CFD.....	35
3.7	Línea trazada para obtener el perfil de velocidades.....	37
3.8	Configuración experimental del reactor tipo Taylor-Couette.....	39
3.9	Componentes para el análisis PIV.....	40
3.10	Posición del láser, cámara y plano de medición del flujo.....	41
3.11	Muestras de agua contaminada.....	44
3.12	Montaje del reactor para el análisis de desinfección.....	45
3.13	Toma de la muestra para el análisis de desinfección.....	46
3.14	Diluciones por triplicado para el análisis de C_{O_2}	48
3.15	Conteo en placa de la muestra con C_{O_1} en el tiempo 1 (t_1).....	49

CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1	Esquema del primer prototipo en CAD.....	51
8.2	Reactor y componentes del reactor tipo Taylor-Couette	51
8.3	Convergencia de malla a una velocidad de 13.945 rpm.....	54
8.4	Geometría sin malla (a) y geometría con malla (b) utilizadas en el análisis numérico	55
8.5	Perfil de velocidades a 9.549 rpm (a), 9.645 rpm (b) y 13.945 rpm (c).....	56
8.6	Perfil de velocidades a 100 rpm (a), 300 rpm (b) y 600 rpm (c).....	57
8.7	Perfil de velocidades a 1200 rpm (a) y 2000 rpm (b).....	57
8.8	Zona de análisis para obtener el perfil de velocidades.....	58

8.9	Perfiles de velocidades a 300, 600, 1200 y 2000 rpm.....	58
8.10	Perfiles de velocidades a 300 rpm en CFD y PIV.....	59
8.11	Mapa vectorial (a) y Mapa escalar (b) del análisis de PIV.....	60
8.12	Efecto de los vórtices en la desinfección de agua por UV a concentración inicial de 10^8 UFC/ml.....	61
8.13	Efecto de los vórtices en la desinfección de agua por UV a concentración inicial de 10^6 UFC/ml.....	62
8.14	Desinfección de agua por medio de luz UV en un reactor tipo Taylor-Couette con una concentración inicial de 10^4 UFC/ml.....	63
8.15	Controles sin agitación para una concentración de 10^6 UFC/ml.....	64
8.16	Reactor tipo Taylor-Couette durante el proceso de desinfección con UV.....	65
8.17	Líneas de tendencia para los resultados del análisis a concentración de 10^6 UFC/ml.....	66
8.18	Línea de tendencia de los valores de k a diferentes velocidades de rotación a una concentración inicial de 10^6 UFC/ml.....	67
8.19	Líneas de tendencia para el abatimiento microbiano experimental y del modelo cinético en un reactor tipo Taylor-Couette.....	67

1.1 ABASTECIMIENTO Y CONTAMINACIÓN DEL AGUA

La seguridad del agua potable sigue siendo un problema mundial grave, ya que el agua contaminada puede provocar enfermedades transmitidas por la ingesta de esta, como la fiebre tifoidea (fiebre entérica), la diarrea por rotavirus y la enfermedad pandémica del cólera, que históricamente ha sido una de las principales causas de muerte (Griffiths et al., 2017; Woodall, 2009).

Hoy en día, el reúso de agua residual es una práctica común que se realiza incluso de forma no intencional (Solomon et al, 1998; Jiménez et al., 1999; Bahri et al., 2001; Bazza, 2003; Chu et al., 2003). Para reusar el agua residual en forma segura es necesario aplicar un tratamiento que minimice todos los riesgos a la salud, en particular, aquellos de origen microbiológico.

A pesar de que existe una gran cantidad de desinfectantes químicos y físicos, su aplicación en tratamiento de aguas residuales se ve limitada por diferentes aspectos, tales como:

- Costos,
- Generación de subproductos con carácter tóxico,
- Susceptibilidad de los diferentes microorganismos presentes en el agua residual, entre otros.

De acuerdo con estas limitaciones, es necesario conocer las ventajas y desventajas de los diferentes métodos de desinfección para elegir el método o agente desinfectante más adecuado para cada caso.

1.2 MÉTODOS DE DESINFECCIÓN

La cloración es el proceso más usado por su costo y difusión, a pesar de formar compuestos organoclorados y de las evidencias cada día más comunes de su ineficacia para inactivar todo tipo de microorganismos. Por otra parte, tenemos el ozono, que es un desinfectante efectivo pero costoso y también con fuente de subproductos (Blatchley et al., 1996).

Actualmente, el cloro y sus derivados son los desinfectantes más usados en todo el mundo debido a su bajo costo y alta efectividad. No obstante, su uso ha sido cuestionado por la formación de subproductos organoclorados, como los trihalometanos, a los que se les atribuye un efecto tóxico o carcinógeno en humanos y animales (Craun, 1991; Dunnick y Melnick, 1993; Acher et al., 1997; Kenneth et al., 1998; Dodds et al, 1999; CCC, 2003). Su almacenamiento, transporte y aplicación, representan una constante amenaza para las personas, operadores de sistemas de agua y al ambiente en general por el alto riesgo de accidentes y fugas que involucran (Rajeshwar e Ibañez, 1997).

Por otra parte, el ozono se considera un desinfectante efectivo pero costoso y también fuente de subproductos no deseados (Blatchley et al., 1996).

1.3 LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

La radiación ultravioleta (UV) es un método eficaz para la desinfección del agua, que presenta una alta capacidad de inactivación contra una amplia gama de microorganismos patógenos y se ha aplicado generalmente en todo el mundo (Hijnen et al., 2006; Song et al., 2016). Este método se considera como una alternativa a la desinfección por cloro para aguas residuales (Lindenauer and Darby, 1994). La radiación UV con longitudes de onda en el rango germicida (200–320 nm), es el último método de tratamiento moderno de agua y aguas residuales (Kowalski, 2009).

La lámpara de mercurio de baja presión (LP) y de presión media (MP), emite una luz monocromática a una longitud de onda de 253.7 nm y una luz de emisión policromática en un amplio rango de longitudes de onda, 200 - 600 nm respectivamente, se emplea ampliamente como fuente de UV en el tratamiento de agua potable y plantas de tratamiento de aguas residuales (Bolton y Cotton, 2011). La eficacia y las dosis necesarias para usar estas

lámparas de mercurio están bien establecidas para varios patógenos que incluyen bacterias, parásitos protozoarios y virus (Abbaszadegan et al., 1997).

Los resultados de los primeros trabajos sobre fotobiología con cultivos puros de *E. coli* por Novick y Szilard (1949) indicaron que a medida que la dosis de UV aumentaba, disminuía el número de células capaces de fotorreactivarse. Estos resultados fueron respaldados por Kelner (1951), que también trabajaba con cultivos puros de *E. coli*, y descubrió que el grado de fotorreactivación disminuía a medida que la dosis de UV aumentaba (Lindenauer and Darby, 1994).

Bajo estas circunstancias, la luz ultravioleta se considera como un método de desinfección eficiente para inactivar bacterias, virus y protozoarios con dosis relativamente bajas y seguro (Task Force on Wastewater Disinfection, 1996; Clancy et al., 2000; Linden et al., 2002). En las últimas dos décadas la radiación UV ha sido considerada como una tecnología establecida, principalmente en Europa, Estados Unidos y Canadá. En Estados Unidos hay más de 2,000 instalaciones para desinfectar efluentes primarios, secundarios y terciarios de agua residual. El éxito de la radiación UV se fundamenta en términos de costos y eficacia, pero particularmente en que no se ha demostrado la formación de subproductos que pongan el riesgo la salud (Sakamoto, 2000).

Se sabe que otro aspecto importante en la eficacia de desinfección es la calidad del agua, primordialmente en lo que se refiere a la presencia de partículas. La cantidad y el tamaño de éstas afectan en la desinfección de un efluente (Cairns et al., 1995; Sakamoto, 2000). Además, la presencia de microorganismos agregados o asociados con las partículas dificulta la penetración de la luz UV aun cuando se apliquen altas dosis, lo que disminuye la eficacia de desinfección (Andreadakis et al., 1999).

Por lo tanto, el desarrollo de nuevas tecnologías efectivas de tratamiento de agua es de gran importancia para la salud humana.

1.4 REACTOR TAYLOR COUETTE

Un reactor Taylor-Couette, es un reactor cilíndrico que contiene un cilindro giratorio, que puede crear un patrón de flujo único en el espacio entre los dos cilindros posicionados coaxialmente en función de la rotación del cilindro interior. Debido a su capacidad para la transferencia eficiente de masa y calor, el reactor tipo Taylor-Couette tiene aplicaciones extensas para la cristalización, transformaciones de fase y purificación de partículas. (Kim, 2014; Park, Lee y Kim, 2015; Nguyen et al., 2011; Nguyen, Joo y Kim, 2012; Park y Kim, 2018; Lee et al., 2011).

Varios autores han modificado el experimento clásico de Taylor-Couette; por ejemplo, introduciendo numéricamente un campo magnético y usando un ferro fluido como fluido de trabajo (Singh y Bajaj (2005), Rüdiger et al. (2010) y Laguerre et al. (2008)). Algunos autores han trabajado con más de un fluido en el mismo sistema, además, otros más han tomado en cuenta la compresibilidad del fluido, Peng and Zhu (2010) estudiaron el flujo de Taylor-Couette empleando dos fluidos inmiscibles con diferentes densidades y viscosidades, en donde adicionalmente estos fluidos fueron separados por una interface con un surfactante insoluble. El trabajo de ellos se concentró en factores de estabilidad tales como la estratificación debida a la densidad y viscosidad, tensión superficial, concentración del surfactante y un análisis de los esfuerzos cortantes.

Por otro lado, un gas monoatómico perfecto y sus efectos compresibles fueron considerados por Manela y Frankel (2007); variaciones del número de Mach y el límite del GAP (se usará la palabra en inglés para denominar al espacio entre cilindros) también fueron examinadas. La mayoría de estas investigaciones del flujo de Taylor-Couette han sido desarrolladas en sistemas entre cilindros lisos reservándose el hacer alguna modificación en la superficie de los mismos.

Además de estos intentos, el sistema de Taylor-Couette ha sido sujeto al análisis en otros campos y aplicaciones. Ogihara y Nomura (2002) produjeron partículas de alumina monodispersas por medio de una hidrólisis de alcóxidos en una mezcla de octanol y acetonitrilo. Ellos propusieron el uso de cada uno de los vórtices como reactores separados.

El sistema de Taylor-Couette también ha sufrido modificaciones en su constitución geométrica, como es el caso de Sang-Hyuk L. et al. (2009) quienes situaron diferentes aletas verticales sobre la pared interior del cilindro exterior en un sistema de cilindros concéntricos; esto con el objetivo de examinar el efecto de la aleta vertical sobre el flujo entre cilindros. El estudio no encontró alteración alguna en el proceso laminar-transición, pero la aparición del flujo turbulento de los vórtices de Taylor fue acelerado notablemente.

Por otra parte, también se ha demostrado recientemente que la filtración por osmosis inversa puede ser mejorada mediante la utilización de un cilindro giratorio (reactor Taylor-Couette), que aprovecha la alta velocidad de corte y la inestabilidad del flujo generada por una fuerza centrífuga para reducir la polarización por concentración cerca la membrana y mezclan el fluido en todo el cilindro, ayudando a la limpieza del reactor, no acumulándose contaminantes en la membrana. Este sistema consiste en un filtro cilíndrico que gira dentro de una carcasa cilíndrica estacionaria. Los vórtices toroidales de Taylor dan como resultado un espacio entre cilindros con una inestabilidad del flujo centrífugo. Por encima de un número crítico de Taylor, Ta , los vórtices toroidales aparecen en el espacio anular como resultado de una inestabilidad centrífuga (Lee y Lueptow, 2002).

Estas inestabilidades (patrones) de flujo han sido el tema de muchos estudios, en la industria química, metalúrgica y, desde los trabajos de Davies y Weber (1960), en la industria nuclear. Dichos patrones de flujo proporcionan altos valores de transferencia de calor y de coeficientes de masa, lo que

explica por qué algunas operaciones industriales importantes (polimerización en emulsión, catalítica heterogénea (Nemri, 2013).

La importancia de un estudio de esta índole radica en la aplicación de este sistema modificado en diversos procesos químicos de reacción. El uso de este sistema podría beneficiar procesos químicos como los de mezclado y separación de reactivos. También con la finalidad de incrementar la eficiencia en este tipo de procesos, Richter et al. (2009) modificó la superficie del rotor del sistema de Taylor-Couette, introduciendo aletas anulares sobre la superficie exterior del cilindro interior al cual se le indujo movimiento por medios mecánicos. El objetivo de esta modificación se realizó con la finalidad de estudiar e incrementar el mezclado en la saponificación de etilacetato. Ellos encontraron que los procesos de mezclado fueron mejorados por esta modificación, pero los cambios en el flujo debido a la modificación de la geometría con la introducción de aletas no fueron descritos. Además, ellos emplearon una sola configuración aletada la cual compararon con los resultados obtenidos al inducir el flujo con un cilindro liso. Aquí fue demostrado que la introducción de aletas anulares incrementa la eficiencia en los procesos de mezclado, pero el efecto de las aletas anulares sobre el comportamiento del flujo no se reportó. En 1975 E. L. Koschmieder examinó el efecto de insertar anillos sobre el rotor en un sistema de Taylor-Couette observando que dicha modificación cambió el tamaño de los vórtices de Taylor. En el trabajo de Koschmieder, dicha inserción de los anillos carecía de una perfecta axisimetría y sólo se examinó un tamaño de anillo.

Por otro lado, se ha visto aplicación en la purificación de agua, mediante la utilización de reactores fotocatalíticos modificados. El factor de iluminación es de suma importancia en el tratamiento debido a la cantidad de catalizador que puede ser activado por medio de la luz UV, ya que este tipo de reacciones son promovidas por partículas sólidas de fotocatalizadores (TiO_2), determinando la eficiencia de tratamiento de agua en el reactor. Al utilizar un

reactor Taylor-Couette se mejora el proceso ya que el reactor utiliza la inestabilidad del flujo para aumentar la mezcla de fluidos a través de la turbulencia (vórtices Taylor-Couette), facilitando la penetración de la luz UV y mejorando la transferencia de masa. Los vórtices, aparecen como consecuencia de la inestabilidad primaria dada por números adimensionales, tales como, el número de Taylor y el número de Reynolds (Sengupta et al., 2001).

JUSTIFICACIÓN

La calidad y abastecimiento de agua hoy en día, es un problema de carácter mundial, es por esta razón que se desarrolla el presente proyecto, en el cual se pretende construir un reactor tipo Taylor-Coette, evaluando el efecto que tienen los vórtices toroidales rotatorios generados a partir de la inestabilidad del flujo propio del reactor, mejorando el proceso de desinfección de agua por medio de luz Ultravioleta.

OBJETIVO

Analizar el efecto de los vórtices toroidales rotatorios en el proceso de desinfección de agua por medio de radiación UV en un reactor Taylor-Couette.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Diseñar, construir y probar un reactor tipo Taylor-Couette acoplado con una lámpara de luz UV para utilizarlo en un método de desinfección de agua.
- Evaluar la hidrodinámica en el reactor tipo Taylor-Couette por medio de un análisis numérico y validarlos por medio de la técnica de análisis de velocimetría de imagen de partículas (PIV).
- Evaluar el efecto de los vórtices de Taylor-Couette en un método real de desinfección de agua por medio de irradiación UV, variando diferentes condiciones en el reactor.

HIPOTESIS

Se espera que la hidrodinámica desarrollada en el reactor Taylor-Couette:

- Mejore el tiempo de contacto entre la luz UV-bacterias.
- Aumente el volumen de agua desinfectada.

2.1 DESINFECCIÓN DE AGUA

La desinfección es considerada como el principal mecanismo para la desactivación o destrucción de organismos patógenos con el fin de prevenir la dispersión de enfermedades transmitidas a través del agua, tanto a los usuarios como al ambiente. Es muy importante que el agua residual sea tratada adecuadamente antes de realizarse la desinfección para que la acción de cualquier desinfectante sea eficaz.

Los sistemas de abastecimiento de agua sin tratar, o con un tratamiento inadecuado, siguen siendo la mayor amenaza para la salud pública, especialmente en los países en desarrollo, donde casi la mitad de la población consume agua de baja calidad. En estos países, enfermedades como el cólera, la tifoidea y la disentería crónica son endémicas y son causa de muerte de niños y adultos. En 1990, más de tres millones de niños menores de cinco años murieron por enfermedades diarréicas (OMS, 1996).

Desde una perspectiva de salud pública, la desinfección es la etapa de mayor importancia en el tratamiento. Actualmente existen una variedad de métodos convencionales para dicho proceso, entre los más utilizados están la utilización de cloro y sus derivados (Cl_2 , NaOCl , ClO_2), la luz ultravioleta (UV) y el ozono (O_3).

2.1.1 Cloración

El cloro es el desinfectante más usado para el tratamiento del agua residual doméstica porque destruye los organismos a ser inactivados mediante la oxidación del material celular. El cloro puede ser suministrado en muchas formas que incluyen el gas de cloro, soluciones de hipoclorito y otros compuestos clorados en forma sólida o líquida como desinfectante, esto se utiliza principalmente en países en desarrollo como los países latinoamericanos y en Estados Unidos y Canadá en el tratamiento del agua residual municipales.

La eficacia de la desinfección con cloro es dependiente de la temperatura, pH, grado de mezclado, tiempo de contacto, presencia de sustancias que intervienen en proceso y concentración de microorganismos que requieren ser destruidos (Rojas et al. 2005).

En varias investigaciones sobre desinfección con cloro realizadas con mayor interés en la eliminación de bacterias durante los años cuarenta a los setenta, proporcionó observaciones sobre la manera en que el cloro mata a estos microorganismos.

La exposición al cloro parece causar alteraciones físicas, químicas y bioquímicas en la pared de la célula. De esa manera destruye la barrera protectora de la célula, con lo que interfiere con las funciones vitales y se produce la muerte del microorganismo. Una posible secuencia de los eventos durante la cloración sería:

- La eliminación de la barrera suministrada por la pared de la célula mediante reacciones del cloro con determinados sitios en la superficie de la célula,
- La liberación de elementos constitutivos celulares vitales,
- La terminación de las funciones asociadas con la membrana y
- La terminación de las funciones celulares. Durante el transcurso de esta secuencia de eventos, el microorganismo muere, lo que significa que ya no es capaz de crecer ni causar enfermedad alguna.

Uno de los problemas que presenta el cloro es que se combina con las sustancias orgánicas naturales que pueden estar presentes en el agua para formar trihalometanos (THMs), entre ellos cloroformo, que es carcinógeno: Puesto que los THMs no se eliminan por métodos de tratamiento convencionales, el agua que se va a clorar debe estar libre de sustancias orgánicas naturales, en caso contrario, se debe utilizar otro desinfectante (Cáceres 1990).

El cloro es un desinfectante que tiene ciertas limitantes en términos de salud y seguridad, pero al mismo tiempo tiene un largo historial como un desinfectante efectivo (EPA 1999a).

Otras alternativas de desinfección incluyen la ozonización y la desinfección con radiación ultravioleta (UV).

La selección de un desinfectante adecuado para una instalación de tratamiento depende de los siguientes criterios:

- La capacidad de penetrar y destruir los gérmenes infecciosos en condiciones normales de operación.
- La facilidad y seguridad en el manejo, el almacenamiento y el transporte.
- La ausencia de residuos tóxicos y de compuestos mutagénicos o carcinógenos.
- Costos razonables de inversión de capital y de operación y mantenimiento (O/M).

2.1.2 Desinfección con ozono

El ozono (O_3) es un poderoso agente oxidante usado como desinfectante (Rice 1986). Además de ser un agente germicida de varios microorganismos el ozono es más eficaz que el cloro para la desinfección o destrucción de virus y bacterias.

La solubilidad de ozono es un factor limitante que afecta progresivamente al proceso de ozonación. El ozono al descomponerse en solución acuosa forma radicales libres de peróxido de hidrógeno y de hidróxido respectivamente (H_2O_2 y OH) los cuales tienen gran poder oxidante, y además de desaparecer rápidamente, pueden reaccionar con impurezas; tales como sales metálicas, materia orgánica, iones hidrogeno e hidroxilos presentes en la solución. Estos radicales libres formados por la descomposición del ozono son aparentemente las principales especies reactivas (White 1999).

2.1.3 Desinfección con luz ultravioleta

En las últimas dos décadas la radiación UV ha sido considerada como una tecnología establecida, principalmente en Europa, Estados Unidos y Canadá. En Estados Unidos hay más de 2,000 instalaciones para desinfectar efluentes primarios, secundarios y terciarios de agua residual. El éxito de la radiación UV se fundamenta en términos de costos y eficacia, pero particularmente en que no se ha demostrado la formación de subproductos que pongan el riesgo a la salud (Sakamoto 2000).

2.1.3.1 Radiación UV

La luz ultravioleta es una radiación electromagnética presente en el espectro natural de la radiación solar. Tiene una longitud de onda menor a la de la luz visible (400 nm) pero mayor a la de los rayos X (100 nm). La región de UV se divide en cuatro subregiones: UV de vacío (100 - 200), UV-C (200 - 280 nm), UV-B (280 - 315 nm) y UV-A (315 - 400 nm).

2.1.3.2 Generación de la luz UV

La radiación ultravioleta es generada en tubos de cuarzo, conocidos como lámparas germicidas, que contienen vapor de mercurio a baja presión. Cuando se induce una corriente eléctrica en los polos de la lámpara, se genera un arco voltaico que ioniza los átomos de mercurio, los electrones incrementan su energía y se convierten en fotones de luz UV (Díaz y Serrano 2002). La presión dentro de la lámpara afecta la distribución espectral, por lo que se pueden clasificar en:

- Lámparas de baja presión, que emiten cerca del 85% de su energía a una longitud de onda de 254 nm y,
- Lámparas de presión media, que emiten su energía en longitudes de onda desde 180 hasta 370 nm.

2.1.3.3 Modo de acción

A diferencia de la mayoría de los desinfectantes, la radiación ultravioleta no inactiva a los microorganismos por interacción química sino por medio de una reacción fotoquímica en la que la luz absorbida altera los componentes esenciales de la función celular. Los ácidos nucleicos tal como el ácido desoxirribonucleico 2 (ADN) y el ácido ribonucleico (ARN) así como las proteínas absorben la radiación UV, en particular aquella con longitud de onda entre 240 a 270 nm (Task Force on Wastewater Disinfection 1996). Debido a que las lámparas de baja presión emiten cerca del 85% de su luz con una longitud de onda cercana a 254 nm, son consideradas como la mejor fuente de generación empleada para la desinfección (US EPA 1999).

A pesar de que las proteínas y los ácidos nucleicos absorben efectivamente la luz UV, se cree que el daño producido por la radiación se realiza particularmente en los ácidos nucleicos (Task Force on Wastewater Disinfection 1996). Los cambios fotoquímicos inducidos en estos compuestos han sido ampliamente estudiados (Liltved y Landfald 2000); (Oguma *et al.* 2002); (Zimmer *et al.* 2003).

A medida que los rayos de luz UV penetran la pared celular de los microorganismos, la energía altera los componentes nucleicos (ADN) lo que resulta en el daño o muerte de la célula. Normalmente una célula que no se puede duplicar o reproducir se considera muerta, aunque en este caso se acostumbra a decir que ha sido “inactivada”, debido a que es incapaz de multiplicarse e infectar al huésped

2.1.3.4 Reparación del daño fotoquímico

La mayoría de los microorganismos pueden reparar los daños que sufren por condiciones ambientales hostiles en su ADN y este es el caso también de la exposición a la radiación UV (Lindenauer y Darby 1994). Los mecanismos de reparación más estudiados son:

- La fotorreactivación
- La reparación en la oscuridad

El proceso más sencillo es la fotorreactivación, la cual se realiza en presencia de luz con longitud de onda entre 330 y 480 nm (Shaban *et al.* 1997); (Liltved y Landfald 2000), por lo que no ocurre en ductos cerrados de distribución o en cuerpos receptores profundos de agua (Cairns 1993).

2.1.3.5 Factores que influyen en la reparación

La reparación de los daños causados al ADN por la luz ultravioleta, principalmente por medio de la fotorreactivación, depende de dos factores:

3. La dosis de inactivación (luz UV)
4. El tipo de microorganismo

2.1.3.6 Efecto germicida

Para que una reacción fotoquímica se lleve a cabo se deben cumplir por lo menos dos condiciones:

- Debe existir disponibilidad de energía suficiente de radiación para alterar enlaces químicos y,
- La radiación debe ser absorbida por las moléculas de los microorganismos.

El efecto germicida está directamente relacionado con la naturaleza de cada microorganismo y con la dosis de luz UV aplicada al agua residual.

2.1.3.7 Tipo de microorganismo

El tipo de microorganismo es el aspecto más importante en la desinfección. La cantidad de daño celular depende de la energía absorbida por ellos y de su resistencia a la luz UV. Los microorganismos responden de diferente manera a la luz UV en función de su estructura física. De acuerdo con la literatura se ha sugerido que la dosis requerida parece aumentar con el tamaño de la célula,

así como con la cantidad de ADN (Umbreit 1962); (Darby *et al.* 1995); (Joret *et al.* 1997); (Facile *et al.* 2000). De acuerdo con este planteamiento las bacterias requerirían menor dosis para su inactivación que los protozoarios. No obstante, estudios recientes han demostrado que los protozoarios tales como *Cryptosporidium* pueden ser inactivados hasta en 3 unidades log con dosis muy bajas (3 mWscm^{-2}).

Anteriormente, se reportaba la necesidad de dosis muy elevadas con tiempos de exposición de hasta 150 minutos para la inactivación de protozoarios (Reynolds 2002).

La mayor parte de la literatura disponible en torno a la desinfección con luz UV, se enfoca en la inactivación de indicadores de contaminación como las bacterias coliformes fecales y enterococos fecales, así como de bacterias de las cuales la más estudiada es *E. coli* (Lazarova *et al.* 1998); (Sommer *et al.* 1998). Por ello, a pesar de la gran variedad de información que existe, hay muy pocos estudios acerca de la inactivación de *Salmonella typhi*, cuya presencia en el agua residual es de gran preocupación para la población de países en desarrollo, tal como es México.

2.2 GEOMETRIA DE TAYLOR-COUETTE

2.2.1 Geometría de Couette

Hace más de cien años, Maurice Couette, físico francés, diseñó un dispositivo que consistía en dos cilindros concéntricos los cuales contenían un fluido newtoniano. En el trabajo de Couette, el cilindro interior permaneció estático mientras que el cilindro exterior conservó una velocidad de rotación específica induciendo el movimiento al fluido; bajo estas condiciones y a bajas velocidades de rotación se dio lugar a un flujo laminar descrito por trayectorias circunferenciales, hoy en día conocido como flujo de Couette. Este flujo describe el movimiento de un fluido entre dos superficies próximas, fenómeno

dominado por los efectos de las fuerzas viscosas haciendo despreciables los efectos inerciales (Chossat and looss, 1994).

El propósito del experimento de Couette fue seguir la idea del físico Austriaco Max Margueles y buscar determinar la viscosidad dinámica de un fluido a partir de la medición del torque que se generaría sobre el cilindro interior debido al movimiento del fluido; además de esto, él buscaba verificar la exactitud de las ecuaciones de Navier-Stokes. Por lo anterior, Couette se concentró en la tarea de medir el momento ejercido en el cilindro interior a causa del movimiento del fluido.

El cilindro interior del dispositivo con el cual Couette determinó el momento ejercido fue suspendido por medio de un cable de piano. La torsión del cable fue proporcional al torque ejercido sobre el cilindro interior y de esta forma se midió indirectamente la magnitud del momento generado en el experimento. Adicionalmente, por encima y por debajo del cilindro suspendido, fueron fijados dos sellos con el propósito de mantener la concetricidad entre los cilindros; condición que a su vez redujo los efectos de las paredes laterales. Ambos sellos abarcaron la mitad del cilindro suspendido, lo que representó que la longitud total del cilindro interior estuviera cercana a los 15 cm y la relación entre la longitud de la columna del fluido y la diferencia de radios (GAP) se conservara a una relación de 60 veces la distancia entre los cilindros. La longitud del cilindro suspendido fue de 7.68 cm, el espacio entre cilindros o GAP fue de 0.2465 cm y estos cilindros contuvieron agua como fluido de trabajo. Por medio de este experimento, Couette determinó la viscosidad dinámica de agua destilada a una temperatura de 16.7°C, encontrando un valor correspondiente de $\mu=0.01255 \text{ gcm}^{-1}\text{s}^{-1}$; este valor es 15% más alto que el obtenido hoy en día ($\mu= 1.091 \times 10^{-2} \text{ gcm}^{-1}\text{s}^{-1}$ a 16.7°C). A pesar de que el experimento de Couette no generó gran relevancia para la vida cotidiana, la determinación de la viscosidad en este caso abrió los panoramas para el área de la mecánica de fluidos. Aunque sus mediciones no fueron particularmente

precisas, sus experimentos fueron grandemente exitosos ya que introdujeron el concepto de flujo de Couette, que es el flujo cortante entre un plano en movimiento y otro estático, además que ayudó a ampliar el entendimiento del comportamiento de una de las propiedades más importantes en el movimiento de los fluidos, la viscosidad.

Unos años después de los trabajos de Couette, Arnulph Mallock (1896) diseñó un dispositivo similar logrando que ahora el cilindro interior fuera el que se encontrara rotando a una velocidad constante, mientras que el cilindro exterior esta vez permaneció estático. La sorpresa de estas condiciones fue que el flujo laminar desapareció cuando se rebasó un valor específico de la velocidad de rotación. El flujo de Couette se caracteriza y se hace presente debido al equilibrio dinámico existente entre las fuerzas centrífugas y el gradiente de presión radial. Sin embargo, cuando no es posible que el gradiente de presión radial y las fuerzas viscosas absorban los cambios en la fuerza centrífuga causados por pequeñas perturbaciones en el flujo, el movimiento del fluido se vuelve inestable y como resultado un flujo secundario aparece en un punto en el que la velocidad de rotación se torna crítica. En este punto crítico, aparecen estructuras toroidales regulares y uniformes a lo largo de los cilindros concéntricos.

2.2.2 Geometría de Taylor

Más tarde en 1923, G. I. Taylor al igual que Mallock, se dio cuenta que cuando la velocidad angular del cilindro interior es incrementada por encima de un punto crítico, el flujo de Couette llega a ser inestable y provoca la formación de un estado estacionario secundario caracterizado por vórtices toroidales axisimétricos; Taylor se concentró en el estudio de este fenómeno en su reconocido artículo "Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders".

En el experimento diseñado por Taylor, en primera instancia, los cilindros fueron hechos tan largos cómo fue posible con el objetivo de eliminar los efectos de las paredes laterales. Los cilindros midieron 90 cm de largo, el radio exterior fue de 4.035 cm y el radio del cilindro interior varió entre 3.80 y 3.00 cm. En la mayoría de los experimentos, el espesor de la columna de líquido contenido entre los cilindros fue menor a 1 cm. En este experimento, el cilindro exterior fue hecho de vidrio y pulido en la zona central; el cilindro interior fue hecho de parafina con una flecha central de acero. En la parte de control de la velocidad, un motor eléctrico fue empleado para inducir la rotación de ambos cilindros en el sistema. En este experimento se utilizó agua como fluido de trabajo, fluido que no es particularmente viscoso, pero la elección de usar agua fue probablemente debido a que facilitaría la visualización de los patrones esperados.

Para poder observar el comportamiento del flujo, Taylor siguió el ejemplo de Reynolds al utilizar tinta para hacer la visualización del flujo. Esta tinta fue introducida dentro de la columna de fluido a través de seis orificios generados en la pared del cilindro interior y su dispersión fue observada a través del cilindro exterior hecho de vidrio. Esta técnica de visualización permitió observar exitosamente las estructuras que se forman en el punto crítico en donde la capacidad de la viscosidad de absorber perturbaciones se ve rebasada por los efectos centrífugos generados por la rotación de los cilindros. Como respuesta a este desequilibrio comienza a haber una rotación secundaria en la dirección radial-axial como se ilustra en la figura 2.1.

La extensión de esta rotación o recirculación se ve limitada por la distancia existente entre los cilindros, y la conservación de dicha distancia a lo largo de la dirección axial del sistema es la responsable de la uniformidad en el flujo descrito en la figura 2.1. Este flujo se compone por una superposición horizontal de estructuras toroidales doblemente giratorias y cuyas

dimensiones son proporcionales a la distancia entre los cilindros, hoy en día este flujo es conocido como flujo de vórtices de Taylor.

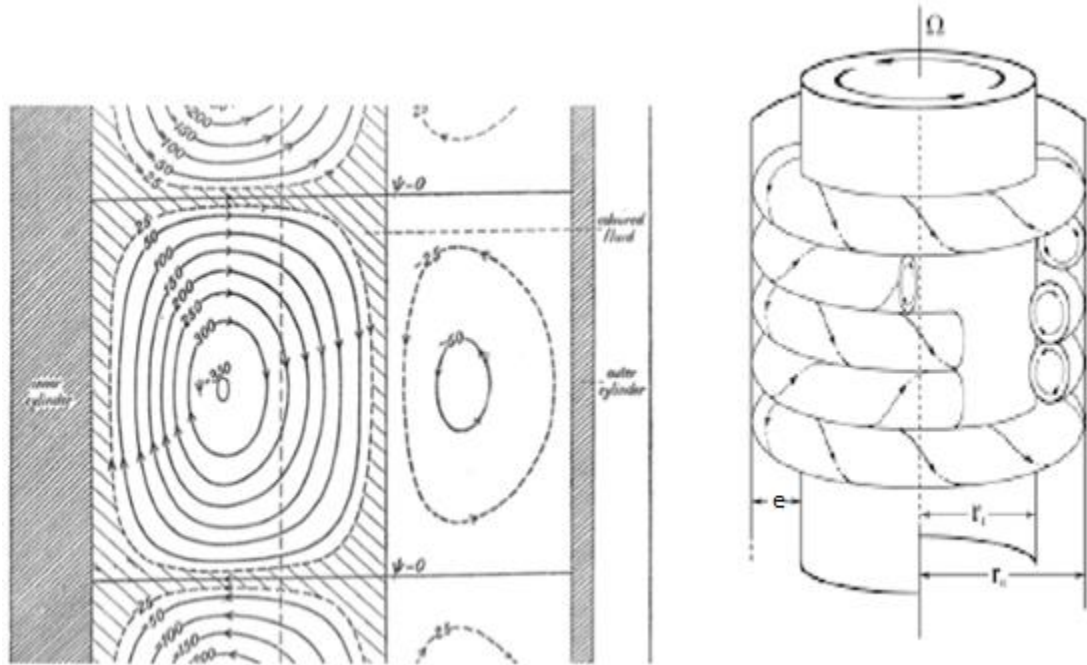


figura 2.1. Líneas de corriente y recirculación del flujo (Taylor 1923)

Este patrón de los vórtices de Taylor ocurre como se mencionó anteriormente, cuando la relación entre las fuerzas inerciales con respecto a las fuerzas viscosas alcanza un valor crítico. Un parámetro adimensional que caracteriza esta relación de fuerzas es el número de Taylor (Ta), que se presenta a continuación (Sengupta, 2001):

$$Re = \frac{\Omega r_i e}{\mu} \quad (4.1) \quad y \quad Ta = Re \sqrt{\frac{e}{r_i}} \quad (2.1)$$

donde Re es el número adimensional Reynolds, Ω es la velocidad angular, r_i es el radio del cilindro interior, “ e ” es el espacio entre los cilindros (GAP o espacio anular), μ es la viscosidad cinemática del fluido y Ta es el número adimensional Taylor. Este parámetro adimensional y sus diferentes variaciones principalmente en los exponentes de los coeficientes y la distancia

característica (Koschmieder 1975); (Chossat y looss 1991), han servido como referencia en el estudio del flujo entre cilindros, principalmente al obtener las condiciones en las que súbitamente el patrón de los vórtices de Taylor hace su aparición en el sistema.

Adicionalmente, se ha visto que, si este número de Taylor crítico es excedido, diferentes modos de los vórtices de Taylor pueden ser encontrados en el camino hacia la turbulencia del flujo. En la figura 2.2 se muestran algunos de estos modos; de izquierda a derecha aparecen los vórtices de Taylor uniformes, vórtices ondulados, vórtices ondulados modulados y vórtices turbulentos.

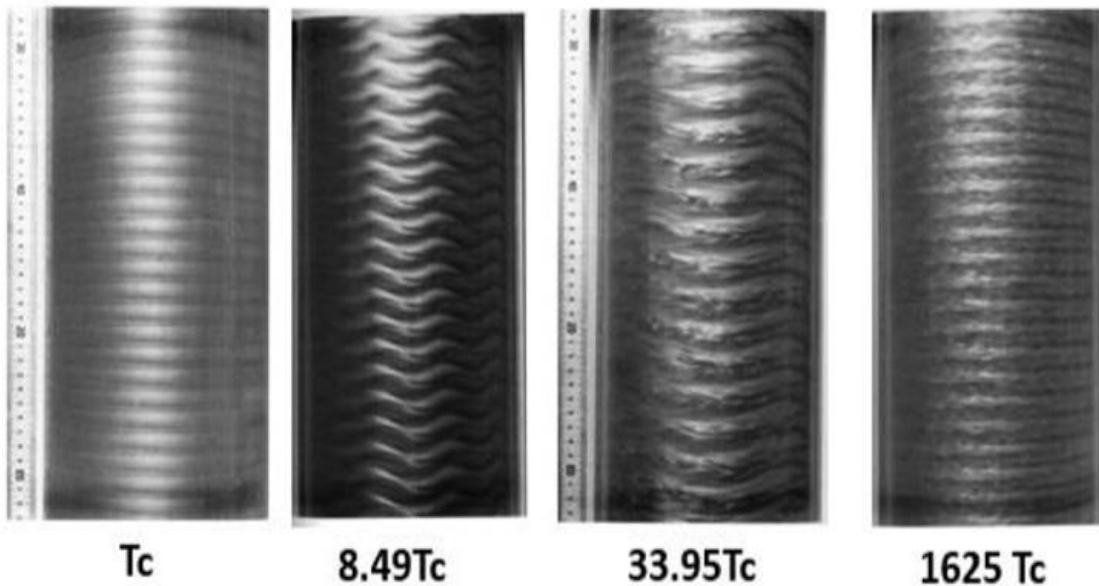


figura 2.2. Evolución de los vórtices de Taylor.

Aunque los flujos de la figura 2.2 son los más comunes, en el trabajo de Andereck, Liu and Swinney (1986) se estudió una gran variedad de condiciones de rotación en ambos cilindros, reportando un amplio diagrama de estabilidad de los modos presentes en él ahora conocido como problema de Taylor-Couette (figura 2.3, eje de las abscisas número de Taylor cilindro del exterior y eje de las ordenadas número de Taylor de cilindro interior).

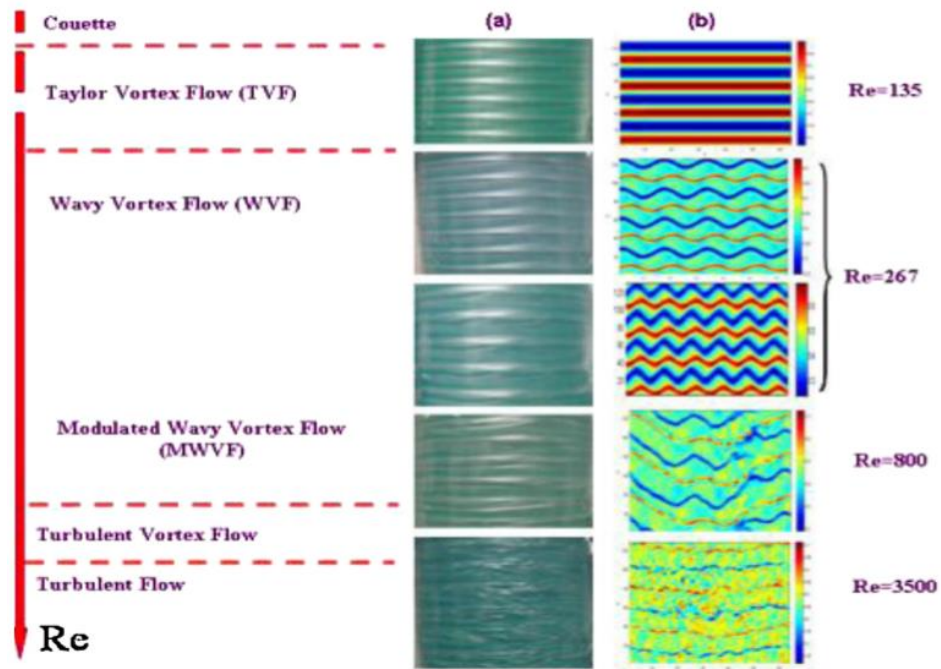


figura 2.3 Diagrama de estabilidad experimental (Nemri 2013).

Como ya se había mencionado anteriormente, en el caso del sistema de Taylor-Couette con el cilindro exterior estático, se observa en el diagrama de la Figura 2.3 que el flujo entre cilindros sólo pasa por 5 diferentes modos antes de llegar a la turbulencia:

1. Flujo de Couette
2. Vórtices de Taylor
3. Vórtices ondulados
4. Vórtices ondulados modulados
5. Vórtices turbulentos

Por otro lado, cuando ambos cilindros se encuentran rotando, pero en direcciones contrarias, el flujo se ve alterado apareciendo vórtices en forma de espirales a lo largo de la dirección axial del sistema. El problema clásico de la aparición de la primera inestabilidad de Taylor-Couette se refiere al cambio de

régimen del flujo desde uno concéntrico a uno helicoidal, en una geometría de cilindros concéntricos, donde al menos uno se encuentra en rotación. Este fenómeno ha sido abordado desde el punto de vista experimental, numérico y teórico, logrando describir exitosamente la condición crítica de estabilidad del flujo base en fluidos newtonianos (Taylor 1923). Se han planteado distintos enfoques para analizar la estabilidad de flujo, dentro de las cuales destaca el análisis de estabilidad lineal (Chandrasekhar 1962), método de energía (Serrin 1959); (Joseph 1976); (Di Prima y Swinney 1985) y método del gradiente de energía (Dou, 2006a).

2.3 INTRODUCCIÓN A LA MECANICA DE FLUIDOS

La estabilidad de los flujos está condicionada por la presencia de la viscosidad: aparece turbulencia cuando el balance entre los términos cinéticos y los viscosos descrito por el número de Reynolds alcanza un valor determinado. En presencia de turbulencia, las variables del flujo se vuelven aleatorias y no permanentes, lo que hace aumentar la velocidad de agitación de las partículas y, con ella, el transporte de cualquier fenómeno. En el flujo turbulento, los transportes de masa por difusión, de calor por conducción o de cantidad de movimiento son más importantes que en un flujo laminar (del orden de cien veces o más), por lo que el ingeniero y la ingeniera deben estar preparados para su interpretación porque existen aplicaciones industriales en las que interesa que el flujo sea, dependiendo del caso, laminar o turbulento.

En mecánica de fluidos, es fundamental el estudio que resulta de asociar las condiciones de contorno a las ecuaciones de estado termodinámico local o de proceso, y a las ecuaciones diferenciales que describen el movimiento fluido. Entre estas ecuaciones se encuentran las ecuaciones de Navier-Stokes, cuya aplicación, no obstante, a muchos cálculos técnicos sólo es posible tras la asunción de una serie de hipótesis simplificadoras que el analista debe valorar en cada caso. Por otra parte, Reynolds redujo las ecuaciones de Navier-Stokes a un sistema de ecuaciones que representa adecuadamente el flujo

turbulento medio, e introdujo las denominadas tensiones de Reynolds, que incorporan la tasa de transferencia turbulenta de cantidad de movimiento debida a las fluctuaciones de la velocidad. En la teoría de la longitud de mezcla de Prandtl, se supone que la cantidad de movimiento es una cantidad transportable entre capas adyacentes de fluido, y que las fluctuaciones de las componentes de la velocidad instantánea son del mismo orden. La hipótesis inicial de Prandtl consistió en admitir que la longitud de mezcla era proporcional de la distancia al contorno, lo que predecía una distribución de velocidad logarítmica cerca de la pared. Otros investigadores sugirieron que la magnitud que se conservaba durante el proceso de mezcla turbulenta era el momento cinético. Sobre esta base, Taylor desarrolló una teoría sobre el transporte de vorticidad que concuerda mejor con los resultados experimentales para el movimiento bidimensional. También fue Taylor el primero que desarrolló con éxito una teoría estadística sobre la turbulencia isotrópica. Con todo ello, se puede obtener una imagen más detallada de la turbulencia, considerando que la energía se distribuye entre remolinos de tamaños diferentes dentro de un espectro continuo de frecuencias. Los estados de remolinos más pequeños son de frecuencia más elevada y, en ellos, la viscosidad juega un papel disipativo decisivo. Los remolinos más grandes y, por tanto, los de menor frecuencia, son básicamente inerciales y disipan una porción ínfima de la energía total. La experiencia constata que la turbulencia puede ser visualizada como una sucesión de estados en los que la energía pasa de los remolinos de frecuencia más baja a los de más alta, y se disipa al final cuando alcanza un tamaño de remolino determinado por la microescala de Kolmogorov.

2.4 DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

Una de las técnicas de la mecánica de fluidos, es la dinámica de fluidos computacional (CFD), que se basa en métodos numéricos. Esta herramienta nos permite predecir diferentes comportamientos como por ejemplo obtener

campos de velocidades, líneas de corriente, campos de presión, flujos, turbulencia, transferencia de calor y reacciones.

La técnica del CFD se puede aplicar a sistemas que involucran flujo de fluidos, transferencia de calor y fenómenos asociados como reacciones químicas, por medio de simulaciones basadas en cómputo. La técnica del CFD es ampliamente usada en la industria y en aplicaciones no industriales. Algunas aplicaciones se centran en el análisis aerodinámico de aviones o automóviles, hidrodinámica de barcos, procesos de combustión, turbomaquinaria, biomedicina e ingeniería ambiental. En las últimas décadas, la disponibilidad de herramientas de cómputo cada vez más potentes y de menor costo, han hecho que las simulaciones por computadora sean más empleadas en el análisis del flujo de fluidos y transferencia de calor, dejando a un lado los costosos estudios experimentales, que en algunas aplicaciones ingenieriles no eran siempre necesarias. Algunas de las ventajas que ofrece la técnica de CFD sobre estos estudios experimentales son las siguientes:

- Reducción sustancial en el tiempo y los costos de los análisis.
- Habilidad para estudiar sistemas donde el control experimental era imposible o difícil de manejar.
- Resultados muy detallados y fáciles de reproducir, variando condiciones o parámetros fijos.

Los códigos de CFD son estructurados alrededor de algoritmos numéricos que pueden abordar problemas de flujo de fluidos y transferencia de calor. Se componen de tres elementos principales: un pre-procesador, un solucionador y un post-procesador.

El pre-procesador es donde se introducen todas las variables de entrada necesarias para que el solucionador trabaje. Sus principales actividades son la definición de la geometría (dominio computacional), la

generación de la malla (sub-dominios), la selección del fenómeno a modelar, la definición de las propiedades físicas del fluido y las condiciones de frontera.

El solucionador puede trabajar con varias técnicas de solución numéricas; como diferencias finitas, elementos finitos, volúmenes finitos o métodos espectrales. La principal diferencia entre las técnicas de solución numérica está en la forma en la cual se aproximan las variables de flujo por medio del proceso de discretización.

La última etapa de la técnica de CFD, es el post-procesamiento, que es donde se manipulan los resultados obtenidos del solucionador y comprende actividades como la visualización de los resultados, cambios en los colores, manejo de vectores, etc. (Versteeg y Malalasekera 1995).

2.4.1 Fenómeno de la turbulencia

El fenómeno de la turbulencia ha sido a través de los años ampliamente estudiado y todavía no resuelto en su totalidad por la complejidad que implica predecir el movimiento de los fluidos y sus fluctuaciones en el tiempo. Los avances en este campo de la física se concentran en la exposición de modelos matemáticos específicos que combinan teoría con experimentación y que son aplicables de forma general. Osborne Reynolds en 1883, experimentó con flujos en ductos y encontró una relación adimensional que proporciona una medida de la magnitud de las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas, visualizando patrones de flujo cambiantes que concentró en dos grandes grupos: flujo laminar y flujo turbulento. El flujo laminar tiene un comportamiento a pequeña escala, característico de bajas velocidades (bajos números de Reynolds) y que es gobernado principalmente por difusión. El flujo turbulento, sin embargo, es caracterizado por altas velocidades (mayores números de Reynolds), fluctuación en las presiones y un movimiento inestable y tridimensional. En la práctica la necesidad de tomar en cuenta el fenómeno de la turbulencia tiene que ver principalmente con la dimensión del sistema de

estudio, es decir, a mayor magnitud, mayor será la turbulencia presente en el fenómeno (Launder y Spalding 1972).

Existen diferentes definiciones de la turbulencia, entre las cuales, se encuentra la propuesta por Kolmogorov y Von Karman (1937): “la turbulencia es un movimiento irregular que aparece en los fluidos, cuando estos están en contacto con superficies sólidas o incluso cuando solamente están presentes corrientes del mismo fluido”. Por otro lado, de acuerdo Hinze (1975): “la turbulencia es una condición de irregularidad del flujo, en el cual las variables del problema tienen fluctuaciones aleatorias con respecto a las coordenadas espaciales y temporales, por lo cual distintos valores promediados pueden ser apreciados”.

Con respecto al fenómeno, se observa que su movimiento es gobernado por remolinos que aumentan la vorticidad y a su vez la cohesión de partículas que generan energía. La turbulencia es un fenómeno cíclico que involucra el transporte de energía desde las escalas de remolinos más grandes, hasta las más pequeñas, intercambiando energía cinética por calor que es disipado en por las escalas de escala menor, este fenómeno se conoce como “Cascadas de Energía” (Wilcox 1993). De acuerdo con la Teoría de equilibrio de Kolmogorov, podemos reafirmar este concepto: “Los remolinos más pequeños deben estar en un estado donde la razón de energía recibida de los remolinos más grandes sea cercanamente igual a la razón a la cual los remolinos más pequeños disipan energía en calor”. Es entonces que la turbulencia aumenta razonablemente el transporte de energía, de momentum y de masa. Algunas características generales del transporte turbulento son su alta inestabilidad y no linealidad, la continuidad del fenómeno, la irregularidad del flujo, la alta rotacionalidad, la fuerte disipación de energía y la alta difusividad provocada por los remolinos de gran escala.

Las estrategias para resolver un problema de transporte turbulento se concentran en dos grandes grupos: La simulación directa y el modelado de la turbulencia.

DNS (Simulación Numérica Directa): Se resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes de forma directa (5 variables) en todo el dominio espacial y temporal. Es necesario mallas muy finas en espacio y tiempo para reproducir las pequeñas escalas (escalas de Kolmogorov). Sus costos computacionales son muy altos, pero los resultados son similares a estudios experimentales.

Modelado de la Turbulencia: Aproximaciones estadísticas que resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes para flujos promedios y por medio de correlaciones empíricas, simulan el flujo real.

LES (Simulación a Gran Escala): Permite modelar la turbulencia con menor esfuerzo computacional que DNS. Se basa en el promedio de las ecuaciones de Navier-Stokes volumétricamente. Tiene un significado físico temporal y en tres dimensiones, evalúa volúmenes de control relativamente grandes, es decir, potencializa la evaluación de remolinos grandes que involucran el mayor transporte de energía y simula los remolinos pequeños con menor precisión.

RANS: La técnica estadística más utilizada por su menor costo computacional. Se basa en el promedio temporal de las variables del flujo, que consiste en descomponer una parte promedio y una parte fluctuante. El método permite el uso de mallas más gruesas en el dominio general, debido a la solución de escalas de remolinos de gran escala, sin embargo, las fronteras demandan mallas más finas para reproducir de mejor forma los efectos en la capa límite. En el proceso de promediar las variables de flujo, la no linealidad de las ecuaciones de Navier-Stokes producen nuevas incógnitas que deben modelarse y ajustarse a nuevas ecuaciones obtenidas, lo cual es conocido como el “problema de cerradura”.

2.4.2 Metodología de simulación numérica

Los métodos numéricos más utilizados para resolver las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía son tres: diferencias finitas (MDF), volumen finito (MVF) y elemento finito (MEF). Existen otros métodos, como los métodos espectrales, el método de elemento frontera y los autómatas celulares, pero la aplicación de estos está restringida a ciertos problemas especiales. El procedimiento numérico está basado en forma general en los siguientes pasos:

- Discretización por sustitución de aproximaciones en las ecuaciones gobernantes y subsecuentes manipulaciones matemáticas para obtener un sistema de ecuaciones algebraicas.
- Solución de las ecuaciones algebraicas por algún método directo o indirecto.

La principal diferencia entre las tres técnicas más utilizadas (MDF, MVF y MEF), es la forma de aproximar las variables de flujo y el proceso de discretización.

2.4.3 Método de Volumen Finito (MVF)

El método de volumen finito fue originalmente desarrollado como una forma especial de la formulación de diferencias finitas. La característica principal del método es la utilización de la forma integral de las ecuaciones de conservación. El dominio de solución se subdivide en un número finito de volúmenes de control adyacentes mediante una malla, la cual, a diferencia del método de diferencias finitas, define las fronteras de los volúmenes de control y no los nodos computacionales. Es entonces que alguna interpolación debe ser usada para expresar los valores de las variables en las superficies de los volúmenes de control en términos de los valores nodales. Las integrales son aproximadas por medio de alguna fórmula de cuadratura disponible. Como

resultado se obtiene una ecuación algebraica para cada volumen de control, en la cual aparecen valores de los nodos vecinos.

El MVF puede ser utilizado en cualquier tipo de malla, por lo cual, puede ser aplicado a geometrías complejas. El método es conservativo por construcción (las propiedades relevantes cumplen con la conservación para cada volumen), así que las integrales de superficie (las cuales representan flujos convectivos y difusivos) son las mismas para las interfaces (fronteras) de los volúmenes de control adyacentes. El método de discretización de volúmenes finitos es quizás el más simple de entender y de programar. Todos los términos que necesitan ser aproximados tienen significado físico, este es el motivo por el cual es muy utilizado en la ingeniería y en aplicaciones tecnológicas.

La desventaja del MVF comparado con el MDF, es que cuando se utilizan esquemas de alto orden, el MVF es más difícil de desarrollar en aplicaciones tridimensionales. Esto se debe al hecho de que el MVF requiere dos niveles de aproximación: interpolación e integración. El MVF representa el corazón de cuatro de los cinco códigos principales, comercialmente disponibles para la simulación de la dinámica de fluidos: PHOENICS, FLUENT, FLOW3D y STAR-CD (Versteeg y Malalasekera 1995).

El algoritmo numérico empleando el MVF consiste en los siguientes pasos:

- Integración de las ecuaciones gobernantes de flujo de fluidos sobre todos los volúmenes de control del dominio de solución.
- Discretización por sustituir una variedad de aproximaciones finitas para los términos en las ecuaciones integradas, los cuales representan procesos, tales como convección, difusión y fuentes. Esto convierte las ecuaciones integrales en un sistema de ecuaciones algebraicas.
- Solución de las ecuaciones algebraicas por un método iterativo.

Debido a que los fenómenos físicos que se encuentran en la vida diaria son complejos y no lineales, es necesaria una aproximación iterativa para la solución del problema. El procedimiento más popular para asegurar una correcta liga entre presión y velocidad es el algoritmo SIMPLE y para la solución del sistema de ecuaciones algebraicas es el método TDMA.

2.4.4 Algoritmos de Acople SIMPLE y SIMPLEC

La estrategia de solución de las ecuaciones de Navier-Stokes asume campos de velocidad y presión inicialmente conocidos y que son consecuencia del proceso iterativo y la solución conjunta de las demás variables de flujo. La solución de los campos de velocidad y presión presentan la problemática de involucrar términos convectivos no-lineales en las ecuaciones de momentum y el acoplamiento entre ellas. Lo anterior se debe a que cada componente de velocidad aparece en cada ecuación de momentum y en la ecuación de continuidad, así como la complejidad que involucra el tratamiento de la presión. Por ejemplo, en problemas bidimensionales, la presión aparece en ambas ecuaciones de momentum; sin embargo, no existe una ecuación para resolver el campo de presiones.

Para calcular los flujos (velocidades), es necesario calcular el campo de presiones como parte de la solución global. Si el flujo es compresible, la ecuación de continuidad puede utilizarse como una ecuación de transporte para calcular la densidad, mientras que para calcular la temperatura se emplea la ecuación de la energía.

Los problemas asociados con las no-linealidades en el conjunto de ecuaciones y con el acoplamiento de la velocidad y la presión, pueden resolverse al adoptar un proceso de solución iterativo, tal como el algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations).

Dicho algoritmo se inicia con un campo de presión adivinado, el cual es utilizado en la solución de las ecuaciones de momentum, a fin de producir

valores iniciales para las componentes de velocidad y, además, para la solución de la ecuación de corrección de presión (deducida a partir de la ecuación de continuidad); así se puede obtener un campo de presión corregida que a su vez actualiza los campos de velocidad y presión. El siguiente paso es verificar la convergencia de la solución y así comparar los resultados de acuerdo con un criterio de error previsto. Si el criterio de convergencia no se logra en el paso subsiguiente, el proceso iterativo se repite, hasta alcanzar una solución convergente.

Otros problemas pueden ser el tratamiento de las condiciones de frontera de la ecuación de corrección de presión (P') y la inconsistencia de tener que usar bajo-relajación para la presión (P). Esta inconsistencia se remedia con la modificación del algoritmo SIMPLE (SIMPLEC) propuesta por Van Doormaal y Raithby (1984). El algoritmo SIMPLEC (SIMPLE-Consistent), sigue el mismo procedimiento que el algoritmo SIMPLE, con un tratamiento diferente de las ecuaciones de momentum.

3. DESARROLLO TEÓRICO / EXPERIMENTAL

En este capítulo, se da una explicación de la metodología utilizada en el diseño y construcción de un reactor tipo Taylor-Couette, similar al implementado desde los primeros estudios por Geoffrey Ingram Taylor (1923), dos cilindros concéntricos uno fijo y el otro en rotación. Así mismo, se describen los análisis realizados en las pruebas de desinfección de agua por medio de luz ultravioleta (UV) y el efecto que tuvieron los vórtices toroidales rotatorios en este proceso. Las pruebas experimentales fueron desarrolladas en el laboratorio de mecánica de fluidos del CIICAP de la UAEM y en el laboratorio de ingeniería celular y biocatálisis del IBT de la UNAM.

Esta metodología fue realizada en diferentes etapas:

ETAPA 1: Diseño del reactor,

ETAPA 2: Simulación numérica (análisis de los vórtices toroidales rotatorios),

ETAPA 3: Construcción del reactor,

ETAPA 4: Análisis de velocimetría de imagen de partículas (PIV),

ETAPA 5: Prueba del reactor en el proceso de desinfección por UV,

ETAPA 6: Desarrollo del modelo cinético.

3.1 DISEÑO DEL REACTOR

Para el diseño de la geometría inicial y del reactor se utilizó un software de diseño asistido por computadora, SOLIDWORKS CAD 3D versión 2014, SP3. Como punto de partida para esta metodología se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

➤ Cilindros:

- Eliminar excentricidad y/o cualquier interferencia que afecte la formación de los vórtices toroidales rotatorios.
- Eliminar fugas y/o derrames de la muestra.
- Elegir un material resistente y que permita el paso de la luz UV.

- Elegir rodamientos de un material no permeable, resistente e inocuo.
 - Permitir la rotación del cilindro interno, sin que se afecte por las conexiones eléctricas de la lampara UV y/o el motor.
 - Permitir la toma de muestra, debe ser de fácil acceso.
 - De fácil limpieza y desinfección para posteriores análisis.
- Lampara UV:
- Utilizar una sola lampara, logrando que la irradiación UV llegue a toda la muestra.
 - Fijar la lampara en la parte interna del reactor, se debe cuidar su integridad física.
- Motor
- Eliminar el sobrecalentamiento, evitando un mal funcionamiento de este o descompostura inmediata debido a tiempos largos de operación.
 - Instalar un variador de velocidades para controlar de la velocidad de rotación (constante) del cilindro interno.

Para el diseño del reactor también se consideró que este fuera desmontable y compatible con otras piezas para futuros análisis.

3.2 SIMULACIÓN NUMÉRICA

En esta etapa se realizó el estudio del comportamiento del flujo desarrollado en el espacio anular (espacio entre los cilindros, e) del reactor tipo Taylor-Couette que se muestra en la **figura 3.1**, donde h es la altura del reactor y Ω es la velocidad angular. Este análisis se hizo en diferentes pasos: 1. Elaboración y mallado de la geometría, 2. Análisis de las mallas y 3. Análisis de flujo. Se utilizó el software ICEM CFD para la construcción del dominio computacional, el mallado, posteriormente se utilizó el software FLUENT para realizar el cálculo numérico.

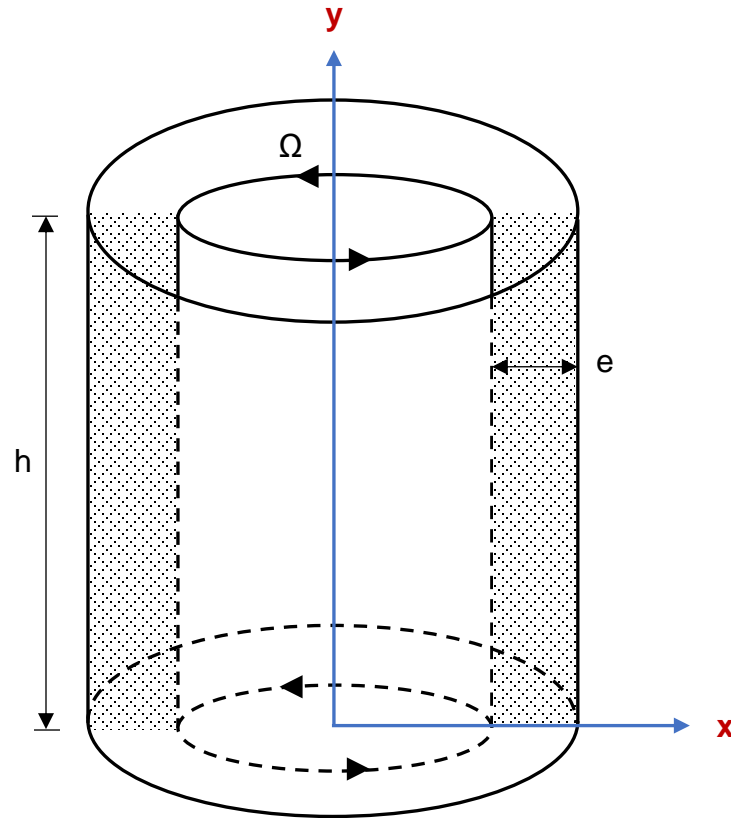


figura 3.1 Geometría utilizada en el análisis del comportamiento de flujo.

3.2.1. Elaboración y mallado de la geometría

La geometría se elaboró con ayuda del software ICEM CFD con base a las dimensiones propuestas en la etapa de diseño del reactor. La geometría tuvo un diámetro externo de 55 mm, 35 mm de diámetro interno, 10 mm de espacio anular y 170 mm de altura (con respecto al eje y). Se utilizó el mallado propio de ICEM CFD, donde se generaron cuatro mallas diferentes con elementos hexaédricos, malla 1 con 250 632 celdas, malla 2 con 505 164 celdas, malla 3 con 999 600 celdas y malla 4 con 1 503 424 celdas, en la **figura 3.2** se muestran las mallas generadas para el análisis.

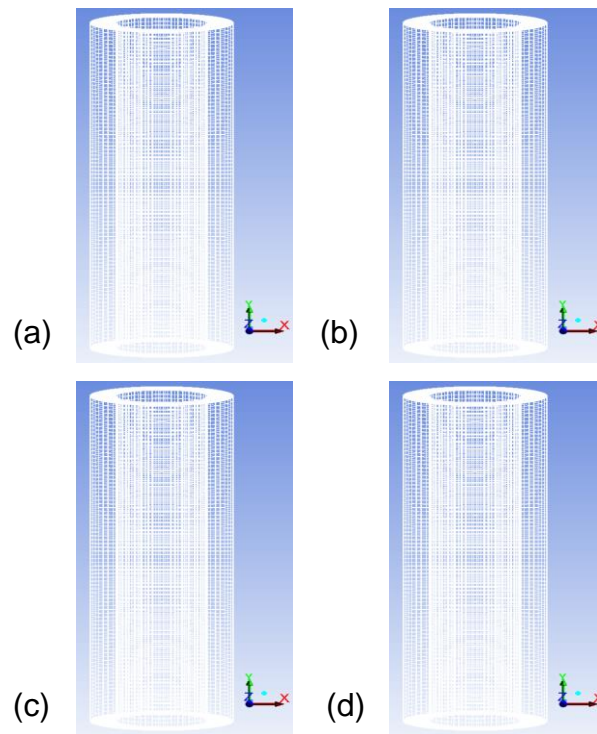


figura 3.2. Mallas generadas en ICEM CFD. (a) malla 1, (b) malla 2, (c) malla 3 y (d) malla 4.

3.2.2. Análisis de las mallas

Antes de realizar el análisis numérico se determinó el índice de convergencia de malla, ya que se buscó que el análisis siguiente a esta etapa fuera fiable. Se ocupó cada una de las cuatro mallas elaboradas anteriormente con las características mostradas en la **tabla 3.1**.

MALLA	No. CELDAS	NODOS	TIPO DE ELEMENTO
1	250 632	259 200	Hexaédrico
2	505 164	516 780	
3	999 600	1 018 080	
4	1 503 424	1 528 800	

tabla 3.1 Mallas con su número de celdas y nodos.

A las mallas descritas en la **tabla 3.1**, se realizó el análisis de convergencia de malla con ayuda del software ANSYS FLUENT versión 15.0. Se utilizó el modelo de turbulencia k-epsilon RNG, con el método de solución SIMPLE, el fluido de análisis fue agua líquida con una densidad de 998.2 kgm^{-3} , viscosidad de $0.001003 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ y una temperatura de 25°C y una velocidad angular para el cilindro interno de 13.945 rpm. De las cuatro mallas se obtuvo los parámetros mostrados en la **tabla 3.2**, donde r es la relación de tamaño, ϵ es la diferencia relativa entre mallas y % GCI el porcentaje del índice de convergencia de malla.

MALLA	r	ϵ	GCI	% GCI
1	/	/	/	/
2	1.504676	0.142229	0.337556	33.755644
3	1.282027	0.000480	0.002236	0.223600
4	1.169134	0.000251	0.002049	0.204962

tabla 3.2. Parámetros para el índice de convergencia de malla.

De acuerdo con Roache (2006) es ideal cuando el índice de convergencia de malla es menor al 1%, por esta razón se optó por utilizar la malla 3 (999 600 celdas y 1 018 080 nodos), la malla 4 (1 503 424 celdas y 1 528 800 nodos) también cubrió el criterio, pero el objetivo de este análisis era obtener resultados de los fenómenos involucrados independientemente del mallado, una malla con el menor número de elementos/nodos para un menor coste computacional pero con el número suficiente de elementos/nodos para la cual los resultados sean precisos, es decir, independientes de la misma.

3.2.3. Análisis de flujo

Este análisis se realizó para determinar la velocidad angular mínima y máxima a la cual se encontraban los vórtices toroidales rotatorios, se varió la

velocidad de 0 a 2000 rpm y se vio el efecto que tiene la velocidad de rotación del cilindro interno, en la aparición de los vórtices dentro del espacio anular.

Para el desarrollo de esta metodología se utilizó la malla 3, el programa ANSYS FLUENT versión 15.0, el modelo de turbulencia k-epsilon RNG y el método de solución SIMPLE. El fluido de análisis fue agua líquida con una densidad de 998.2 kgm^{-3} , viscosidad de $0.001003 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ y una temperatura de 25°C . La **figura 3.3** muestra una línea que se trazó para obtener el perfil de velocidades.

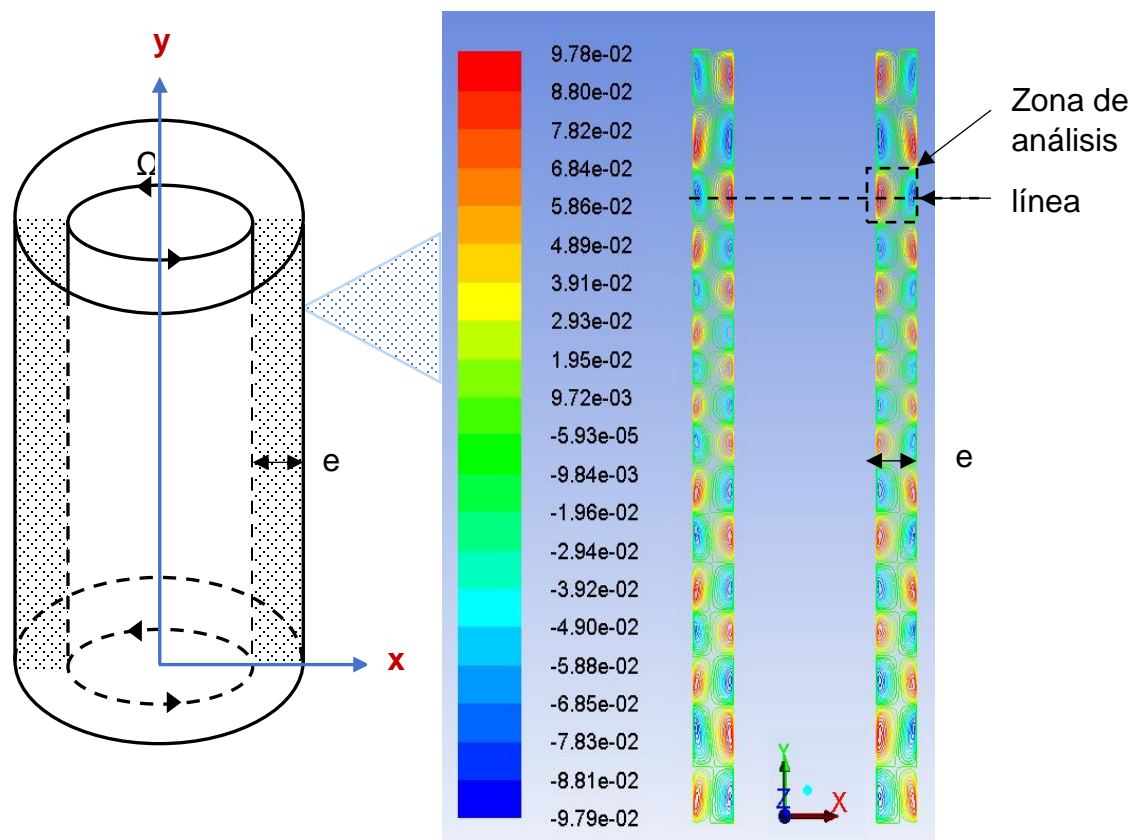


Figura 3.3. Línea trazada para obtener el perfil de velocidades.

El resultado de cada análisis se obtuvo cuando el residual caía por debajo de 10^{-5} para la presión y los tres componentes de velocidad. Este resultado ayudó a obtener las velocidades angulares (parámetros de operación) del cilindro interno utilizados en la parte experimental.

3.3 CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR

De acuerdo con el diseño del reactor desarrollado en el software SOLIDWORKS y los resultados de la simulación numérica CFD, se construyó el reactor tipo Taylor-Couette, utilizando el siguiente material:

- Motor trifásico de inducción cerrado (marca SIEMENS, 0.373 Kw, 60 Hz, 220/440 V y 1.80/0.90 A), con estas características se evitó el sobrecalentamiento del motor durante el tratamiento.
- Variador de frecuencia de 10 - 60 Hz (300 - 2000 rpm) el cual ayudó a que no se generaran variaciones en la velocidad de rotación, teniendo la misma velocidad por tiempos largos de operación.
- Dos rodamientos de acero inoxidable con reten de hule (marca NSK, 5.5 cm diámetro externo y 3.5 cm de diámetro interno), los rodamientos sirvieron para que el cilindro externo se encontrara fijo y el cilindro interno pudiera girar, el retén de hule evitó las fugas del fluido.
- Dos cilindros de vidrio transparente (PYREX de 5.5 cm de diámetro interno para el cilindro externo y 3.5 cm de diámetro externo para el cilindro interno y una altura de 17 cm), el vidrio ayudó a que la radiación de luz UV penetrara de forma directa hacia la muestra.
- Dos placas de nylamid (soporte superior e inferior del reactor), esto minimizo la excentricidad y vibraciones externas evitando que el vidrio sufriera rupturas.
- Lámpara UV (Tubo Fluorescente Germicida Ultravioleta UVc G15T8, Tec nolite, 254 nm, 15 W, 40 cm de largo).
- Un acoplamiento de nylamid para el cilindro interno, este material ayudó a que el vidrio no se quiebre o rompa debido a las vibraciones.
- Banda de motor dentada y un engrane de aluminio para acoplar el eje del motor y la banda.

Todos los materiales se ensamblaron de tal forma que se obtuvo la configuración mostrada en la **figura 3.4**.

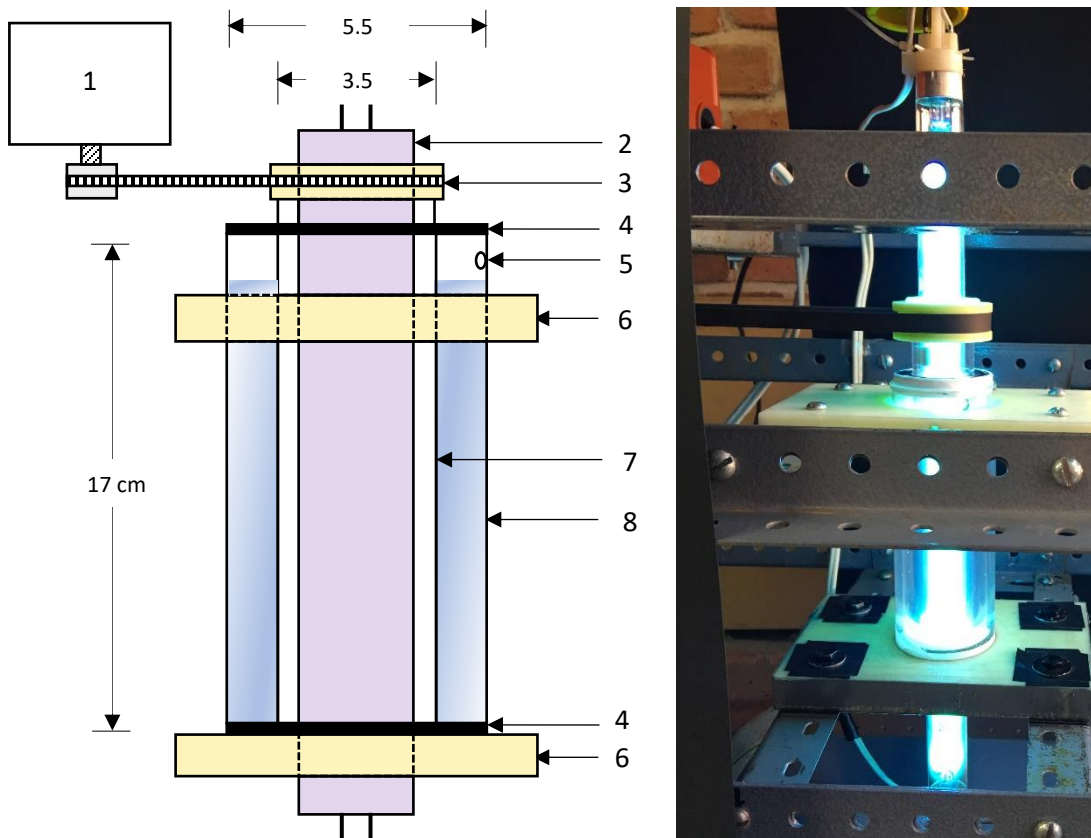


figura 3.4. Configuración experimental del reactor tipo Taylor-Couette: (1) motor, (2) lámpara UV, (3) banda dentada, (4) rodamientos, (5) orificio para toma de muestra, (6) soportes de cilindros, (7) cilindro interno, (8) cilindro externo.

3.4 ANÁLISIS DE VELOCIMETRÍA DE IMAGEN DE PARTICULAS (PIV)

Para la realización de las mediciones se contó con el equipo PIV el cual consta de las siguientes partes: cámara digital de alta velocidad con CCD marca Nikon modelo 80c83 equipada con un lente AF Micro-Nikkor 60 mm f/2.8D, equipo de rayos láser marca New Wave Research modelo 120 XT de 5 mW, posicionador marca Dantec Dynamics (traverse systems) y computadora con el software Dynamic Studio 6.1 para la realización del análisis, estos dispositivos se muestran en la **figura 3.5**.

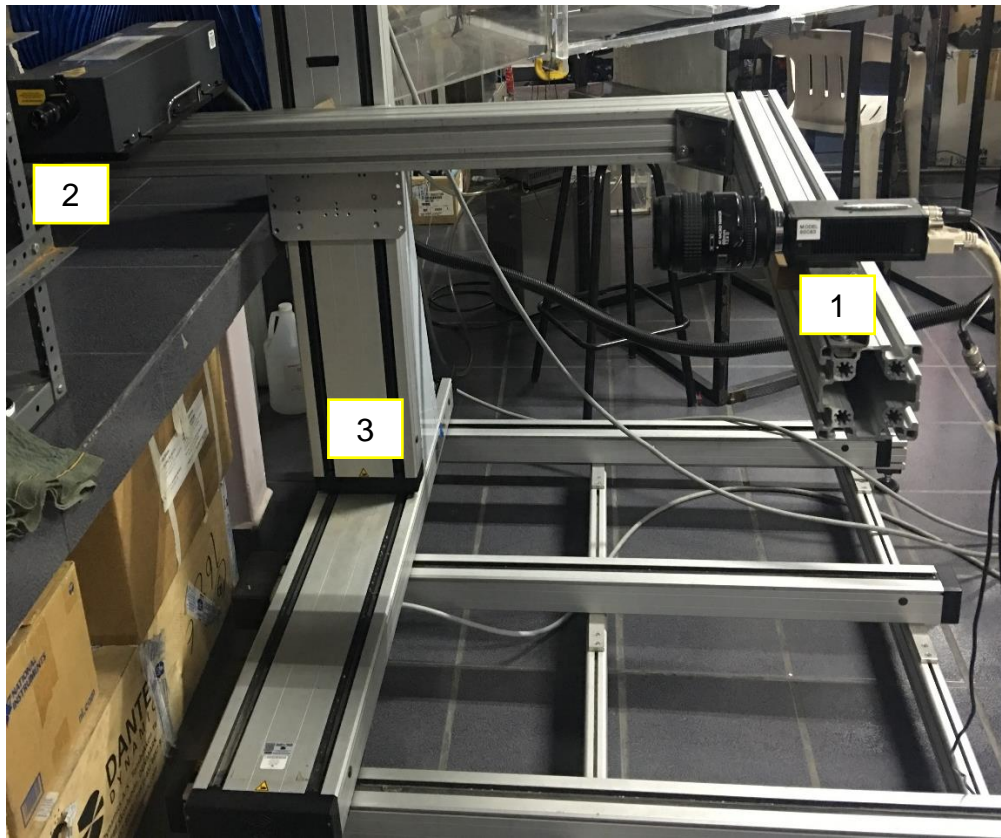


figura 3.5. Componentes para el análisis PIV. (1) cámara, (2) láser y (3) posicionador.

3.4.1. Uso del PIV

El primer paso para llevar a cabo las mediciones con PIV, consistió en calibrar la posición de la cámara, así como el tiempo entre los disparos del rayo láser de acuerdo con las características del flujo, la emisión de rayos láser pulsada tuvo una frecuencia máxima de 15 Hz y los intervalos de los pulsos estuvieron en el rango de 0.2 a 100 000 μs . Por otra parte, la cámara registró la luz reflejada por las partículas sembradas que siguieron la dinámica del flujo, estas partículas fueron plata con un tamaño de 20 μm , y el fluido de análisis fue agua líquida con una densidad de 998.2 kgm^{-3} , viscosidad de 0.001003 $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ y una temperatura de 25°C. Las imágenes resultantes (150

imágenes por análisis) y los vectores de velocidad se obtuvieron utilizando el algoritmo PIV. A fin de eliminar vectores erróneos, se utilizó un método de eliminación de vectores de error.

3.4.2 Análisis de flujo

La medición de la velocidad de flujo se efectuó usando PIV en un plano vertical, ubicado a la mitad del reactor tipo Taylor-Couette construido en el laboratorio de mecánica de fluidos del CIICAP, siendo la zona de análisis el espacio anular. Los disparos del rayo láser fueron de igual manera en dirección vertical mientras que la cámara se alineó perpendicularmente (90° con respecto a la posición de la luz láser) al plano iluminado y se colocó el reactor frente a la cámara y láser a la misma distancia con respecto a cada componente como se ilustra en la **figura 3.6**. El análisis de flujo en el PIV se realizó a una velocidad de rotación igual a 300 rpm, se eligió esta velocidad porque se comparó este resultado con los resultados obtenidos de la simulación numérica para la misma velocidad de rotación.

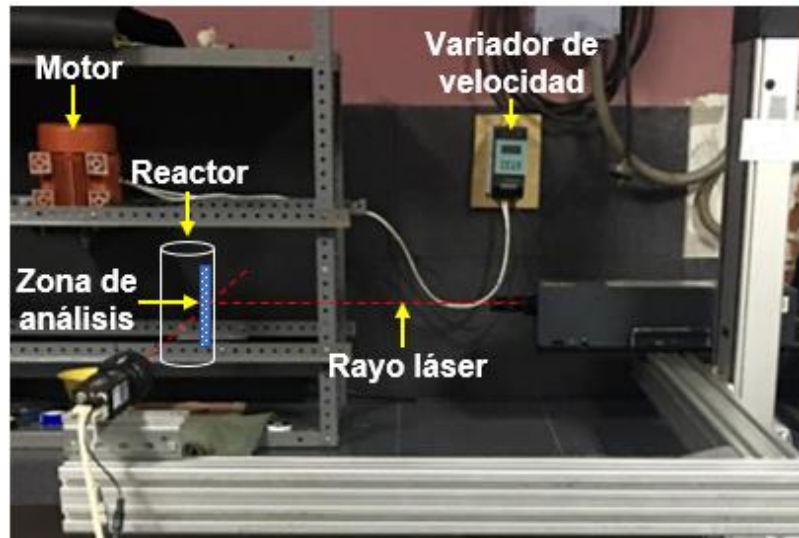


figura 3.6 Posición del láser, cámara y plano de medición del flujo.

Esta técnica se basó en la determinación de los desplazamientos de un grupo de partículas usando técnicas de correlación. La imagen que captó la cámara se subdividió en un número de áreas y las imágenes de las partículas fueron correlacionadas para estimar el vector de desplazamiento promedio. Para este análisis no se requirió el rastreo de partículas individuales, pero si se exige que se tengan varias partículas de cada región de interrogación para poder obtener resultados confiables.

3.5 PRUEBA DEL REACTOR EN EL PROCESO DE DESINFECCIÓN

Ya que se instaló y probó el reactor tipo Taylor-Couette, se llevó a cabo la prueba del reactor en un proceso real de desinfección de agua por UV. El análisis microbiológico se realizó en el laboratorio de ingeniería celular y biocatálisis del Instituto de Biotecnología de UNAM y en el laboratorio de mecánica de fluidos del CIICAP se llevó a cabo la prueba del reactor sobre la muestra de agua contaminada y se analizó el efecto de la velocidad angular y la irradiación por UV.

3.5.1 Obtención de la muestra

3.5.1.1. Cepa Bacteriana

En este trabajo se utilizó una cepa bacteriana de *Escherichia coli* XL-1 Blue (*E. coli*) como indicador de coliformes fecales en las muestras de agua para tratamiento.

3.5.1.2. Medios de cultivo

LB (Luria Bertani): Medio de cultivo que se utilizó de forma rutinaria para el crecimiento y activación de la cepa de *E. coli* en líquido. Está compuesto de 10 g de Bacto-triptona, 5 g de Extracto de Levadura y 10 g de Cloruro de Sodio para 1 L de agua desionizada.

Agar LB: Medio de cultivo utilizado para el crecimiento de la cepa de *E. coli* en sólido. Su composición es la del medio LB suplementado con 15 g/L de agar.

Cada medio de cultivo se esterilizó por calor húmedo en una autoclave a 121°C por 20 minutos.

3.5.1.3. Obtención y activación de células de *E. coli*

En una caja Petri con agar LB se estiró células de *E. coli* y se incubó toda la noche a 37°C, se observó el crecimiento en placa y se almacenó a 4°C. Para mantener viable la cepa bacteriana, se resembró en agar LB cada 6-7 semanas.

Para preparar el pre-cultivo se utilizó 6 ml de medio LB y una azada de células de *E. coli* de la caja almacenada a 4°C. Se Incubó toda la noche a 37°C y 200 rpm.

3.5.2 Condiciones de cultivo

E. coli se cultivó en medio LB a 37°C bajo condiciones anaerobias.

Para preparar el cultivo de *E. coli* se mezcló 1 ml del pre-cultivo y 90 ml de medio LB. Se incubó a 37°C y 200 rpm en un tiempo entre 1.5 y 2 horas aproximadamente o hasta tener el cultivo a una densidad óptica (DO₆₀₀) entre 0.20 y 0.30 nm.

En un espectrofotómetro modelo DU® 730, Beckman Coulter® se monitoreo las medidas de crecimiento bacteriano por medio de un seguimiento espectrofotométrico de la densidad óptica (DO) del cultivo a una longitud de onda fija de 600 nm.

3.5.3 Preparación de la muestra

A partir del cultivo con una DO₆₀₀ entre 0.20 y 0.30 nm (1.5 o 2 horas a 37°C, 200 rpm), se tomó entre 67 y 45 ml del cultivo según sea el caso (este volumen dependió de la DO final), se centrifugó en una centrifuga modelo

Sorvall ST 16R, Thermo Scientific a 4000 rpm, durante 8 minutos a 20°C, se eliminó el sobrenadante, se resuspendió el pelet en 190 ml de agua estéril y se mezcló vigorosamente, la mezcla resultante se observa en la **figura 3.7**, siendo esta el agua a la que se llevó a tratamiento en el reactor tipo Taylor-Couette. Se tomó 1 ml y se añadió en un tubo Eppendorf previamente marcado como Co tiempo inicial.

Las células obtenidas por este proceso tienen una concentración inicial de 10^8 UFC/ml, hacer la respectiva dilución si se requiere otra concentración. A partir de esta muestra se realizó una serie de diluciones para obtener concentraciones iniciales diferentes de 10^6 UFC/ml y 10^4 UFC/ml, estas diluciones se muestran en **la figura 3.7**. Se mantuvo cada muestra en hielo antes, durante y después del tratamiento (aproximadamente 4°C).

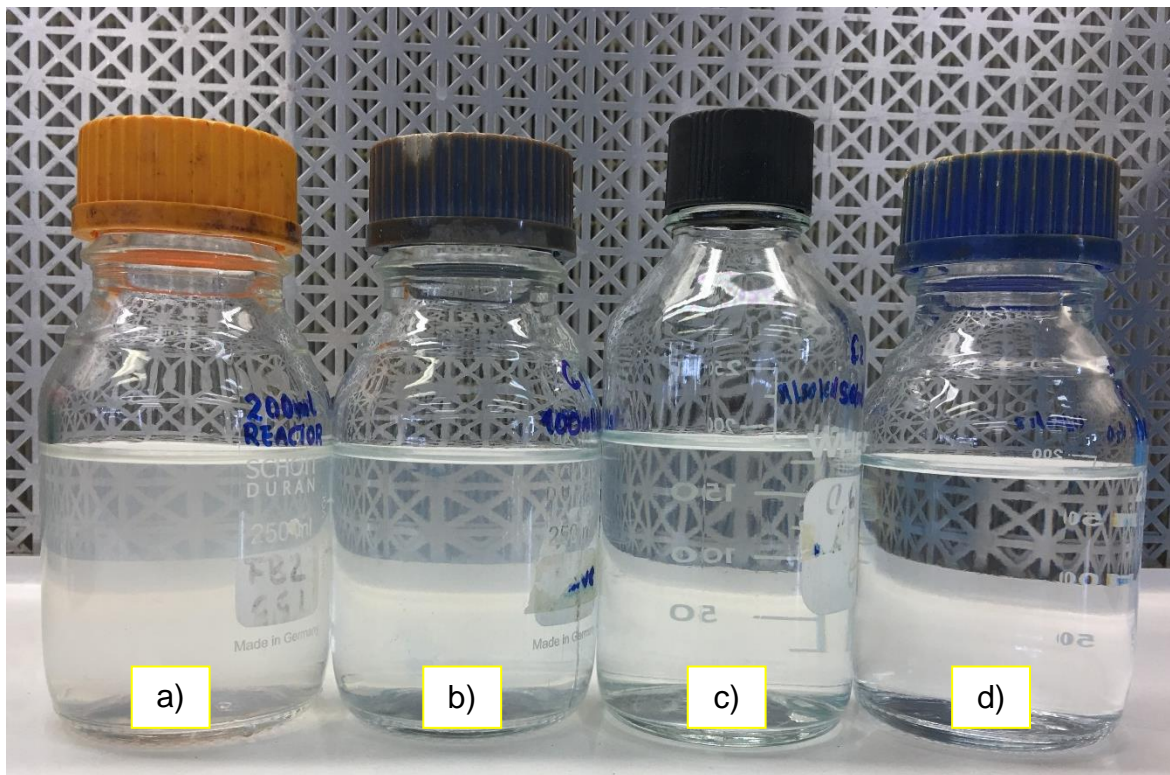


figura 3.7 Muestras de agua contaminada. (a) 10^8 UFC/ml, (b) 10^6 UFC/ml, (c) 10^4 UFC/ml y (d) agua estéril sin carga microbiana.

3.5.4 Efecto de los vórtices en la desinfección de agua

En esta sección se probó el reactor tipo Taylor-Couette que se diseñó y construyó en etapas anteriores como parte de este proyecto de investigación y se analizó el efecto de la velocidad de rotación (vórtices toroidales rotatorios) en la desinfección de agua, comparando las diferentes velocidades de rotación 0 (sin agitación), 300, 600, 1200 y 2000 rpm (con agitación).

Antes de iniciar los análisis se montó el reactor con la lampara UV en una estructura metálica como se muestra en la **figura 3.8** y se corroboró que ningún componente del reactor presentara fallas durante el proceso de desinfección.

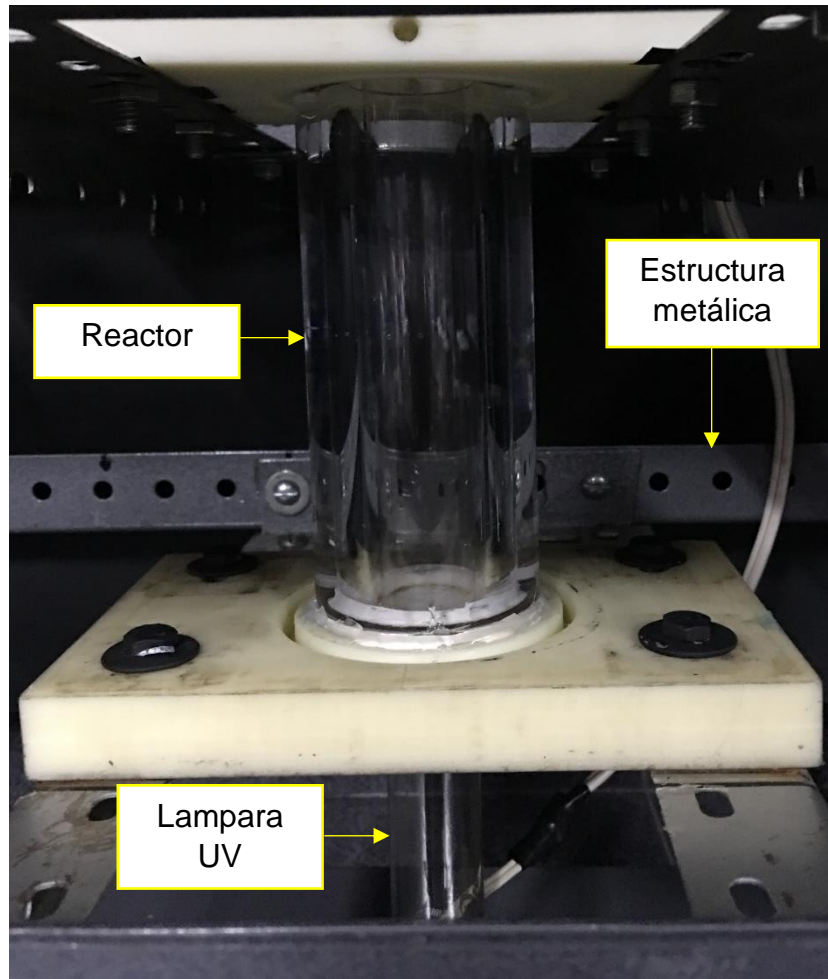


figura 3.8 Montaje del reactor para el análisis de desinfección.

3.5.4.1 Desinfección sin agitación

Se realizó el análisis de desinfección a tres diferentes concentraciones iniciales 10^8 UFC/ml (C_{01}), 10^6 UFC/ml (C_{02}) y 10^4 UFC/ml (C_{03}) y se evaluó el abatimiento microbiano, según el tiempo de exposición de la luz UV.

La toma de las muestras se realizó dependiendo la concentración inicial, cada 15 minutos por 75 minutos para C_{01} , cada 5 minutos por 20 minutos para C_{02} y por último se tomó la muestra cada 3 minutos por 15 minutos para C_{03} .

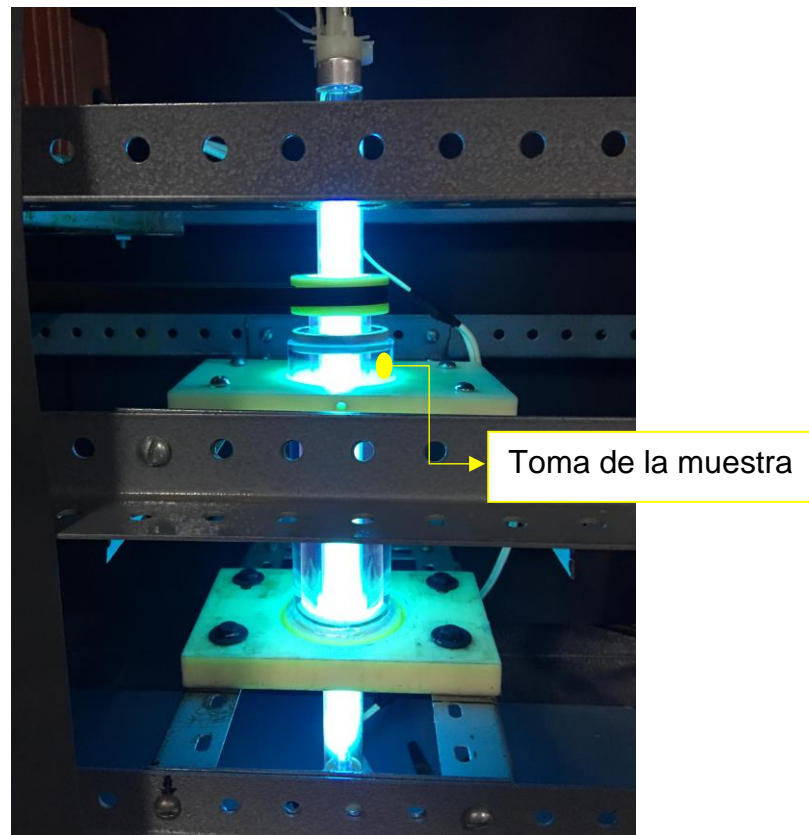


figura 3.9. Toma de la muestra para el análisis de desinfección.

Para iniciar el análisis se agregó al reactor 190 ml de la muestra a 4°C , se tomó inmediatamente con una aguja y jeringa estéril 1 ml de la muestra (t_0) y se colocó en un tubo Eppendorf de 1.5 ml, se encendió la

lámpara UV de 254 nm que se colocó en la parte interna del cilindro interno, como se muestra en la **figura 3.9**, y se repitió el procedimiento de la toma de muestra según las concentraciones y los tiempos de tratamiento (t_1 , t_2 , t_3 , t_4 , t_5 y t_6).

Este procedimiento se realizó por triplicado para cada concentración inicial.

3.5.4.2 Desinfección con agitación con luz UV

Para el análisis con agitación, se evaluó el abatimiento microbiano, según el tiempo de exposición de la luz UV y la velocidad de rotación del cilindro interno. Se evaluó el efecto de la velocidad a 300, 600, 1200 y 2000 rpm.

Se siguió el procedimiento anterior para la toma de la muestra.

Para iniciar el análisis se agregó al reactor 190 ml de la muestra a 4°C, se tomó inmediatamente con una aguja y jeringa estéril 1 ml de la muestra (t_0) y se colocó en un tubo Eppendorf de 1.5 ml, se encendió la lámpara UV de 254 nm que se colocó en la parte interna del cilindro interno, se encendió el motor y se ajustó la velocidad de rotación a 300 rpm (constante) y se repitió el procedimiento de la toma de muestra según las concentraciones, los tiempos de tratamiento y velocidades de rotación que se manejó en este análisis.

Este procedimiento se realizó por triplicado para cada concentración inicial, tiempo de análisis y velocidades de rotación.

3.5.4.3 Dilución y cuenta en placa

De las muestras que se obtuvieron durante el tratamiento de desinfección, se tomó 100 μ l de la muestra al t_0 , se colocó esta cantidad en un tubo Eppendorf con 900 μ l de agua estéril, se agitó vigorosamente

de un lado a otro por 15 segundos (dilución -1), se transfirió 100 μ l de la dilución 1 a un segundo tubo con 900 μ l de agua estéril, se agitó vigorosamente de un lado y otro por 15 segundos (dilución -2) y se repitió este procedimiento hasta completar una serie de diluciones de -1 a la -8, se realizó este procedimiento por triplicado y para cada uno de los tiempos de análisis. Se preparó cajas Petri con agar LB y se colocó una gota de 10 μ l de cada dilución en una caja Petri con el agar LB, como se muestra en la **figura 3.10**.

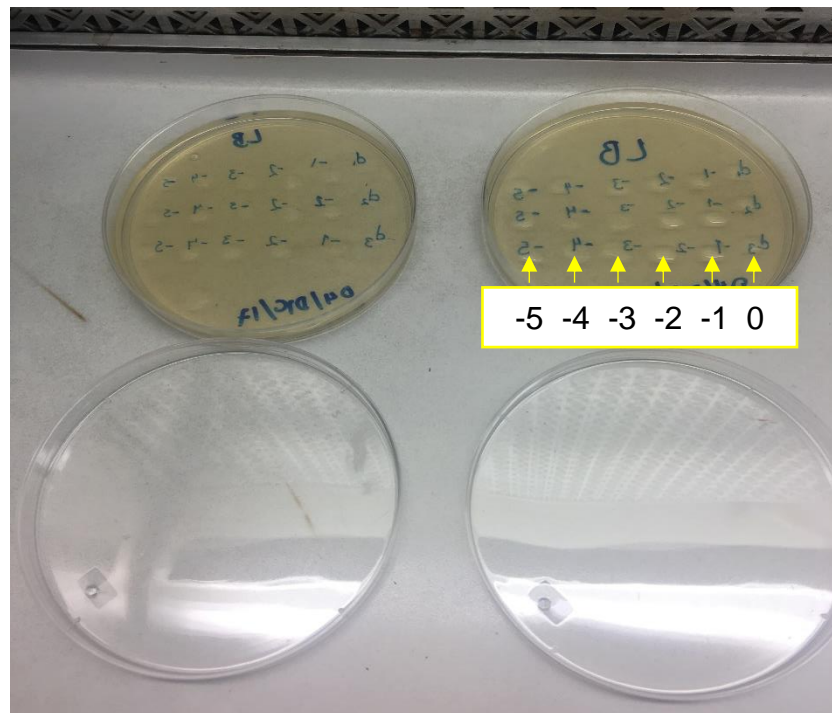


figura 3.10. Diluciones por triplicado para el análisis de C_{O_2} .

Para obtener resultados se incubó cada placa durante 14 horas a 30°C. Después del crecimiento en placa, se contó el número de colonias de *E. coli* presentes. El conteo se hizo como se ilustra en la **figura 3.11** y se realizó los cálculos para la interpretación de datos.

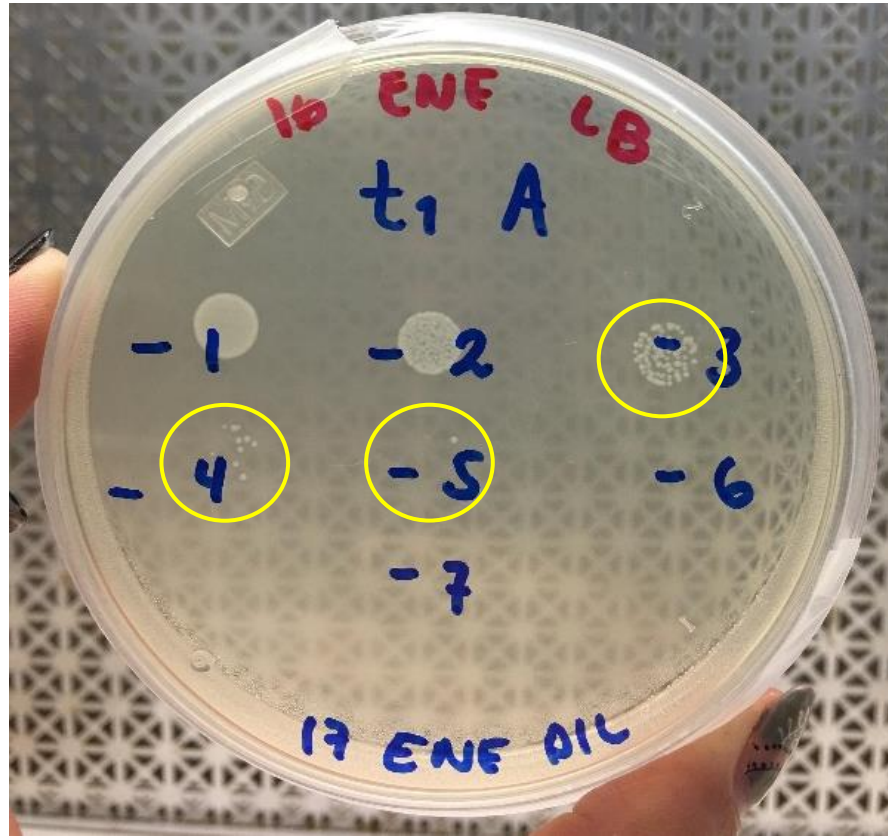


figura 3.11 Conteo en placa de la muestra con C_{01} en el tiempo 1 (t_1).

3.6 DESARROLLO DEL MODELO CINÉTICO

El modelo matemático que ayudó a predecir el comportamiento del abatimiento microbiano en el reactor tipo Taylor-Couette a diferentes condiciones de operación (variables) como fue la velocidad de rotación y tiempos de tratamiento a diferentes concentraciones, se obtuvo a partir de datos experimentales y analizados en el programa informático desarrollado y distribuido por Microsoft Corp, Excel. Dicho modelo sirvió para comprobar qué variables son capaces de predecirse y se realizó ajustando la cinética de abatimiento microbianos a líneas de tendencia (con menos error). Para ello, únicamente se realizó la integración conjunta de todos los datos experimentales.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo experimental. Los resultados se muestran de acuerdo con el siguiente orden:

9. Diseño y construcción del reactor,
10. Análisis de los vórtices toroidales rotatorios: en CFD y PIV,
11. Efecto de los vórtices en el proceso de desinfección por UV,
12. Modelo cinético de predicción del abatimiento microbiano.

4.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR

Se realizó una revisión bibliográfica para el diseño del reactor tipo Taylor-Couette similar al implementado desde los primeros estudios por G. I. Taylor (1923), dos cilindros concéntricos uno fijo y el otro en rotación.

Como punto de partida se diseñó un primer prototipo del reactor en el software SOLIDWORKS CAD 3D, este diseño se muestra en la figura 4.1. Con este primer diseño se construyó y probó el equipo. En esta primer esta se tuvo complicaciones de diseño y funcionamiento, para lo cual, se diseñó y construyó un segundo prototipo del reactor (figura 4.2), se tomaron en cuenta todos los errores de diseño y funcionamiento que se muestran en la tabla 4.1.

Cilindros	Lampara UV	Motor
• Excentricidad entre cilindros.	• Lampara no fija.	• Calentamiento del motor.
• Fugas.	• Interferencia con conexiones eléctricas.	• Velocidades variables.
• Material quebradizo.		
• Rodamientos oxidables.		

tabla 4.1 Errores de diseño del reactor tipo Taylor-Couette.

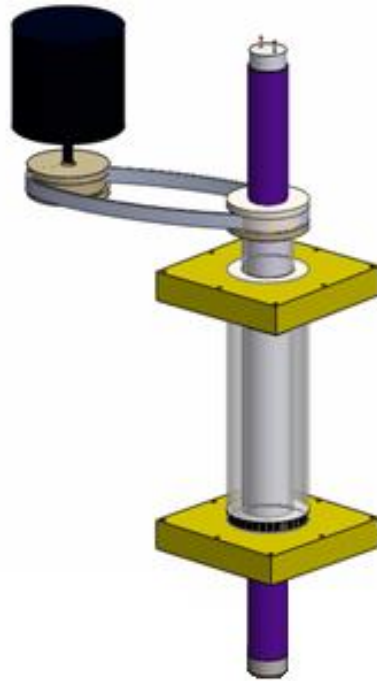


figura 4.1. Esquema del primer prototipo en CAD.

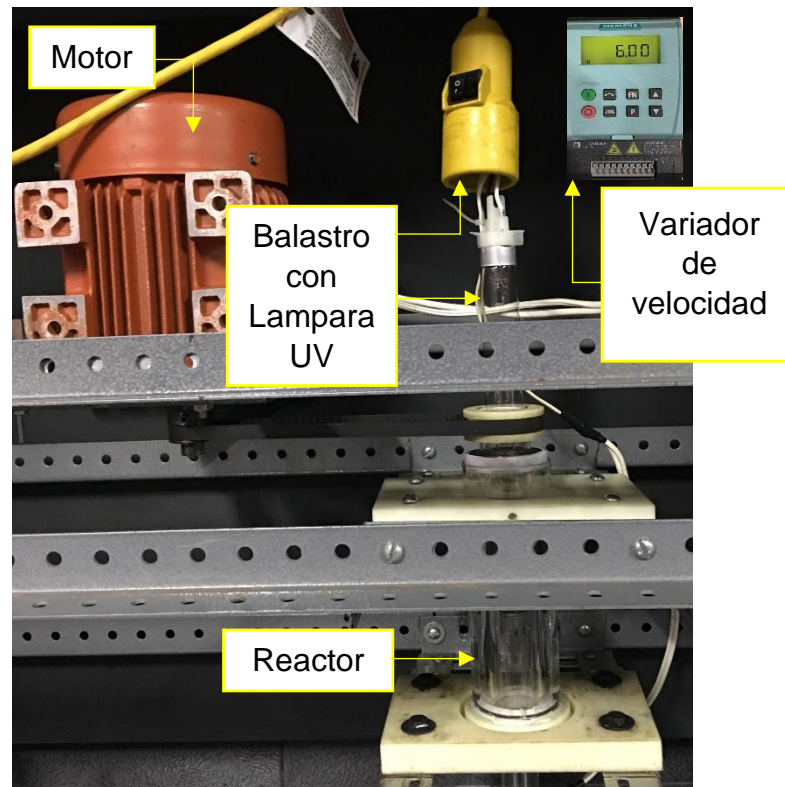


figura 4.2. Reactor y componentes del reactor tipo Taylor-Couette.

4.2 ANÁLISIS DE LOS VORTICES TAYLOR-COUETTE

Se estudió el comportamiento del flujo desarrollado en el espacio anular del reactor tipo Taylor-Couette que se diseñó y construyó en el laboratorio de mecánica de fluidos del CIICAP, realizando un análisis numérico (CDF) previo al análisis experimental del flujo (PIV).

Se validó los resultados con la comparación de estos dos análisis y se definió las condiciones de operación (velocidad de rotación) utilizadas en las pruebas de desinfección con UV.

4.2.1 Simulación numérica

4.2.1.1 Malla y Convergencia de Malla

Con base a la geometría que se elaboró en el software ICEM CFD para este análisis, se generó cuatro mallas diferentes, las características de cada malla se muestran en la tabla 4.2.

MALLA	No. CELDAS	NODOS	CARAS	TIPO DE ELEMENTO
1	250 632	259 200	760 392	
2	505 164	516 780	1 527 042	
3	999 600	1 018 080	3 017 196	Hexaédrico
4	1 503 424	1 528 800	4 535 544	

tabla 4.2. Características de las mallas utilizadas en el análisis de flujo.

Se realizó la simulación numérica para las cuatro mallas a una misma velocidad, la velocidad utilizada se calculó a partir de las ecuaciones 4.1 y 4.2.

$$Re = \frac{\Omega r_i e}{\mu} \quad (4.1) \quad y \quad Ta = Re \sqrt{\frac{e}{r_i}} \quad (4.2)$$

Tapan K. Sengupta (2001) en su trabajo “A Taylor vortex photocatalytic reactor for water purification”, nos dice que para un número de Reynolds (Re) igual a 253 y un número de Taylor (Ta) igual a 16 298, se genera una inestabilidad de flujo que resulta para la formación de los vórtices toroidales rotatorios. Siguiendo esta referencia, se calculó Re y Ta para diferentes velocidades de rotación (Ω) y las características del reactor diseñado y construido en el CIICAP ($r_i = 0.0175$ m, $e = 0.01$ mm y $\mu = 0.00000101$ m²s⁻¹), se muestran los resultados de los cálculos teóricos en la tabla 4.3.

Ω	REACTOR CIICAP		PROTOTIPO TAPAN	
rpm	Re	Ta	Re	Ta
1	18.1	13.7	49.9	638.1
5	90.7	68.6	249.7	15951.9
5.065	91.9	69.5	253.0	16369.4
10	181.4	137.2	499.5	63807.7
13.945	253.0	191.3	696.5	124082.4
15	272.2	205.7	749.2	143567.3
20	362.9	274.3	999.0	255230.8
25	453.6	342.9	1248.7	398798.2
50	907.2	685.8	2497.4	1595192.7
100	1814.5	1371.6	4994.8	6380770.9
300	5443.4	4114.8	14984.5	57426938.4
600	10886.7	8229.6	29968.9	229707753.8
700	12701.2	9601.2	34963.7	312657775.9
800	14515.6	10972.8	39958.6	408369340.0
900	16330.1	12344.4	44953.4	516842446.0
1000	18144.5	13716.0	49948.2	638077093.8
1200	21773.4	16459.2	59937.9	918831015.0
1400	25402.3	19202.3	69927.5	1250631103.8
1800	32660.1	24688.7	89906.8	2067369783.8
2000	36289.0	27431.9	99896.4	2552308375.1
3000	54433.5	41147.9	149844.6	5742693843.9

tabla 4.3 Valores de Re y Ta para el reactor del CIICAP y el prototipo utilizado por Tapan (2001).

Observando los resultados de la tabla 4.3, se seleccionó la velocidad de 13.945 rpm, ya que a esta velocidad se generan los vórtices toroidales rotatorios, útiles para la realización de este proyecto. Se realizó la simulación numérica en el software FLUENT para el cálculo del índice de convergencia de malla, en la figura 4.3 se muestra el comportamiento de la velocidad en un punto medio (0.0225 en el eje “x”, 0.085 en el eje “y” y 0 en el eje “z”) de la zona de análisis con respecto al número de celdas de cada malla y en la tabla 4.4 se muestran los resultados numéricos del análisis.

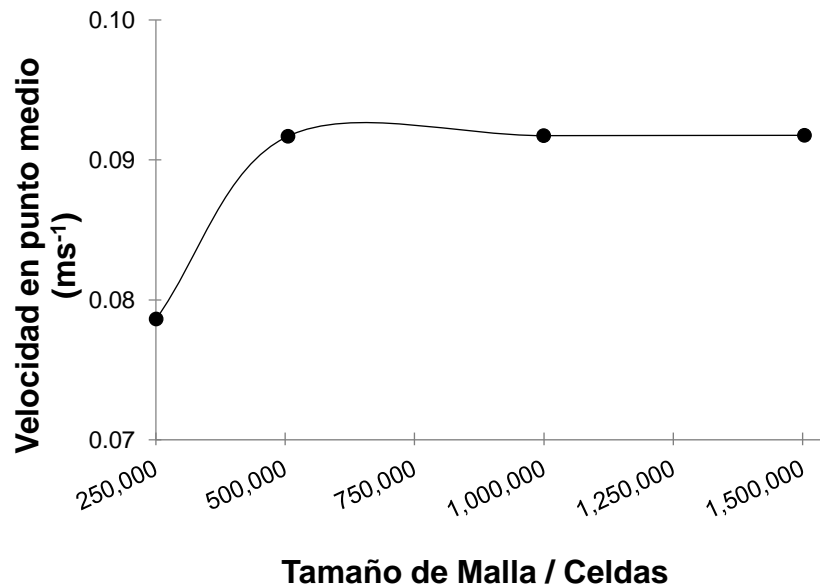


figura 4.3. Convergencia de malla a una velocidad de 13.945 rpm.

MALLA	No. CELDAS	r	ϵ	GCI	% GCI
1	250 632	/	/	/	/
2	505 164	1.504676	0.142229	0.337556	33.755644
3	999 600	1.282027	0.000480	0.002236	0.223600
4	1 503 424	1.169134	0.000251	0.002049	0.204962

tabla 4.4. Resultados numéricos del análisis de convergencia de malla.

De acuerdo con Roache (2006) es ideal cuando el índice de convergencia de malla es menor al 1%, se observa que la malla 3 y 4 cumplen este criterio, sin embargo, se eligió la malla 3 con 999 600 elementos, ya que una malla con un número de elementos menor es mejor para disminuir el coste computacional para la cual los resultados sean precisos, es decir, independientes de la misma malla.

4.2.1.2 Análisis de flujo

Ya definida la malla a utilizar, se analizó el comportamiento del flujo en el reactor tipo Taylor-Couette que se diseñó en el CIICAP. La geometría y malla utilizada se muestra en la figura 4.4.

El análisis se realizó para visualizar la aparición de vórtices en el reactor tipo Taylor-Couette, y se corroboró la aparición de los vórtices toroidales rotatorios con los resultados teóricos, así se determinó el rango de velocidades a ocupar en la parte experimental.

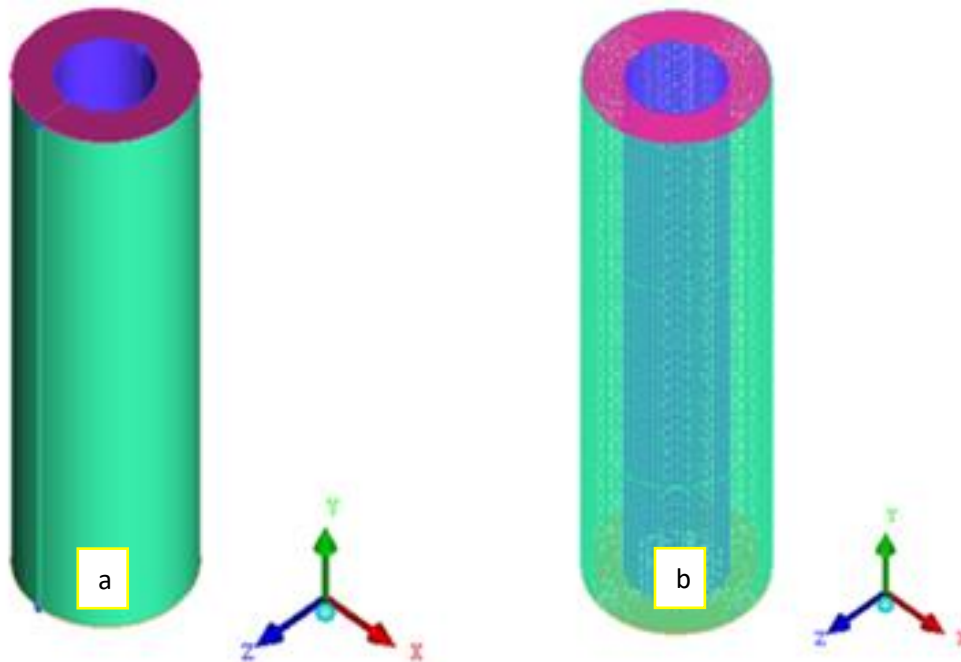


figura 4.4. Geometría sin malla (a) y geometría con malla (b) utilizadas en el análisis numérico.

La figura 4.5 muestra los contornos de la velocidad axial, para la velocidad de rotación de 13.945 rpm, a la cual, se forman por completo los vórtices toroidales rotatorios, observando que un mínimo cambio en la velocidad de rotación (9.549 rpm y 9.645 rpm) es crucial para la formación de los vórtices. Se comprobó con esto, los cálculos teóricos mostrados en la tabla 4.3 y lo dicho por Tapan K. Sengupta (2001).

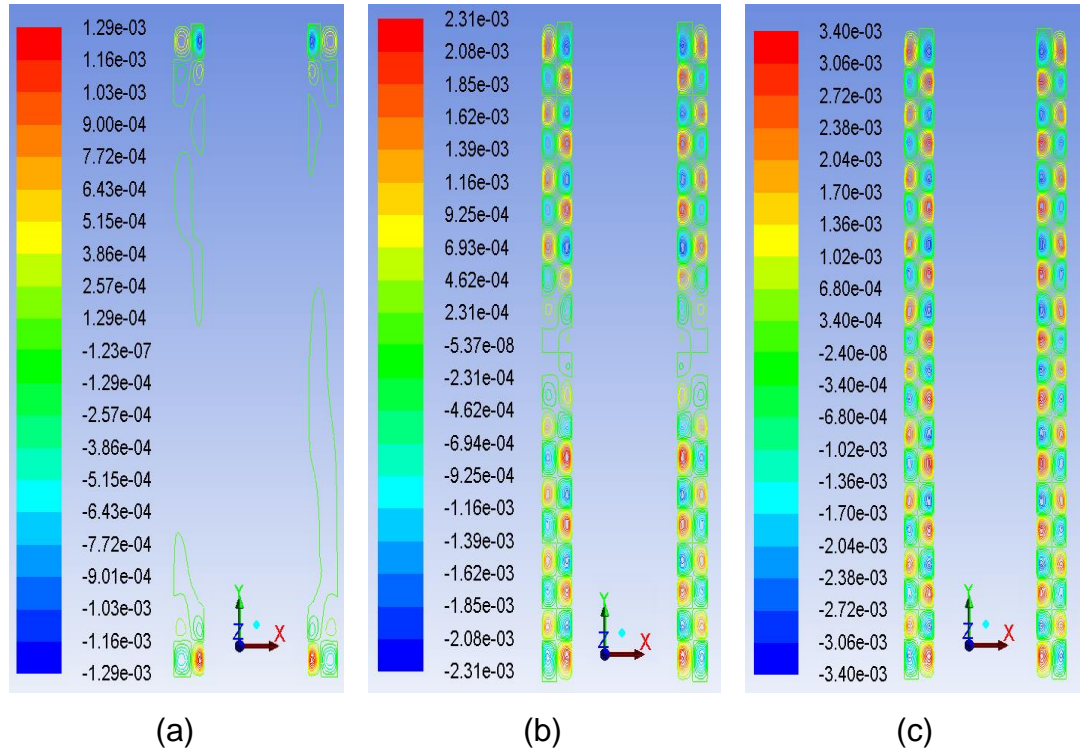


figura 4.5 Perfil de velocidades a 9.549 rpm (a), 9.645 rpm (b) y 13.945 rpm (c).

La figura 4.6 muestra los contornos de velocidad axial a 100 rpm, 300 rpm y 600 rpm, y la figura 4.7 los contornos de velocidad axial para 1200 y 2000 rpm, se analizó dichos comportamientos y se determinó las condiciones de operación del reactor para el análisis experimental desarrollado. Se observó que a medida que aumenta la velocidad de rotación disminuye el número de vórtices formados en el espacio anular del reactor, se vio que el patrón de flujo cambia con esta tendencia.

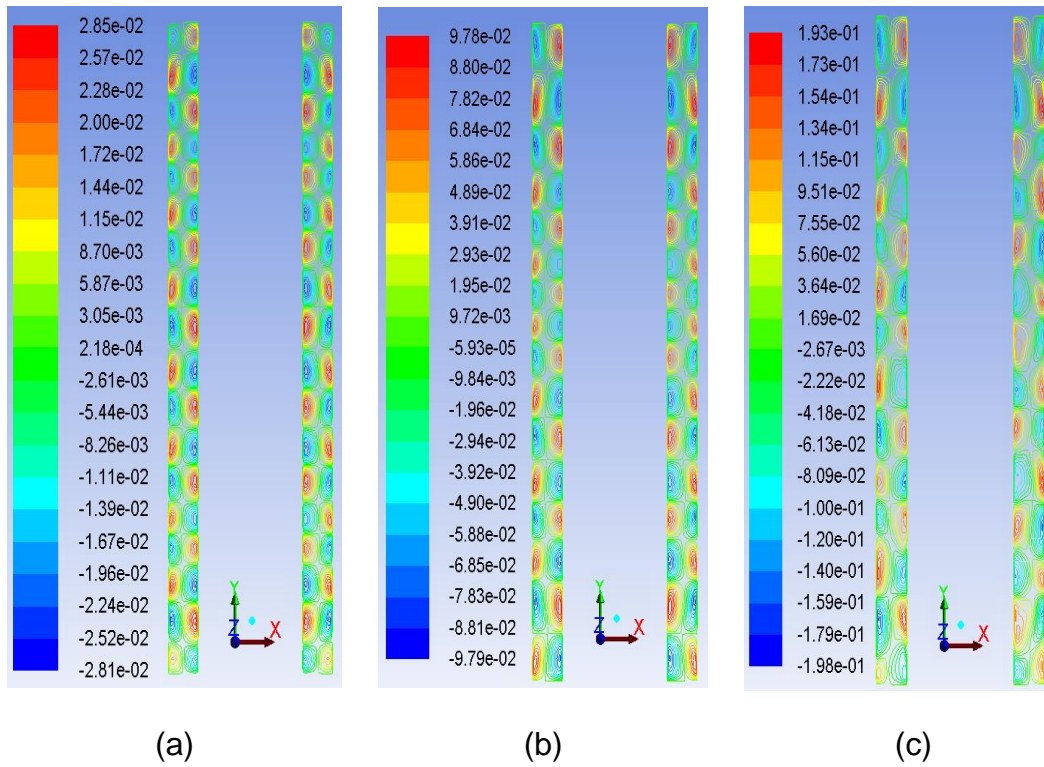


figura 4.6 Perfil de velocidades a 100 rpm (a), 300 rpm (b) y 600 rpm (c).

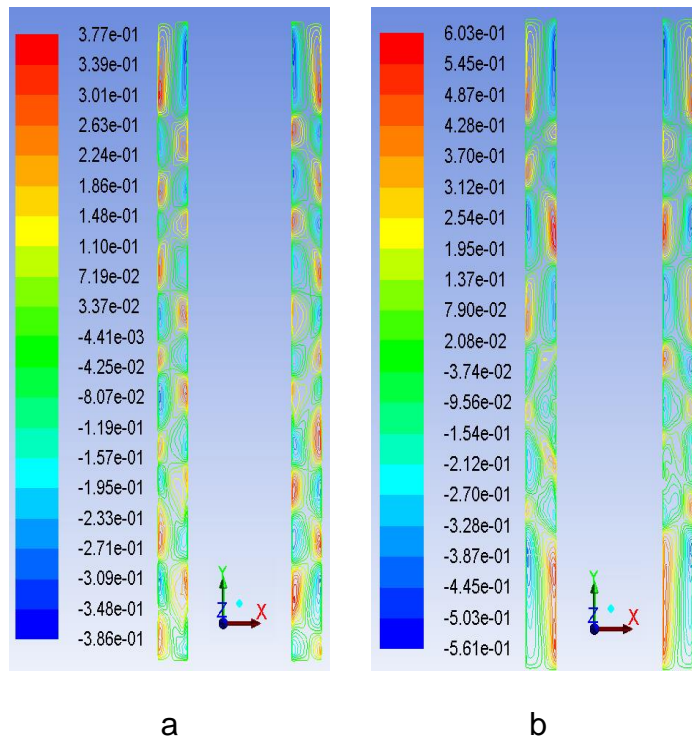


figura 4.7 Perfil de velocidades a 1200 rpm (a) y 2000 rpm (b).

Se realizó el análisis de las velocidades de rotación de 300, 600, 1200 y 2000 rpm, a partir del perfil de velocidades. Se tomó la velocidad en el punto medio del vórtice, sobre el eje "x", como se muestra en la figura 4.8.

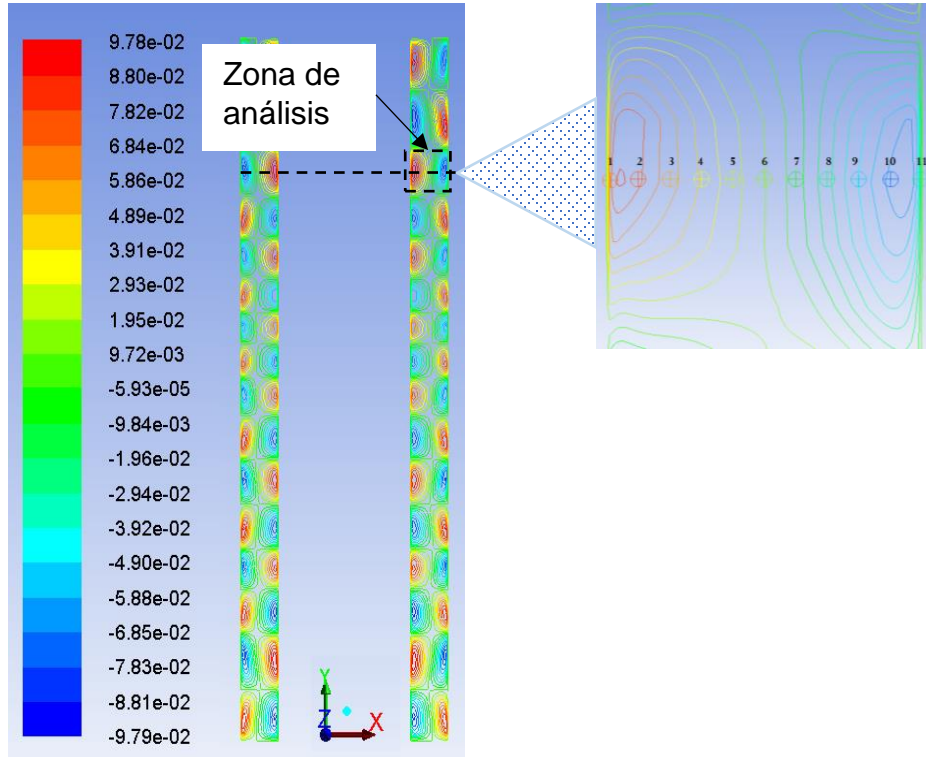


figura 4.8. Zona de análisis para obtener el perfil de velocidades.

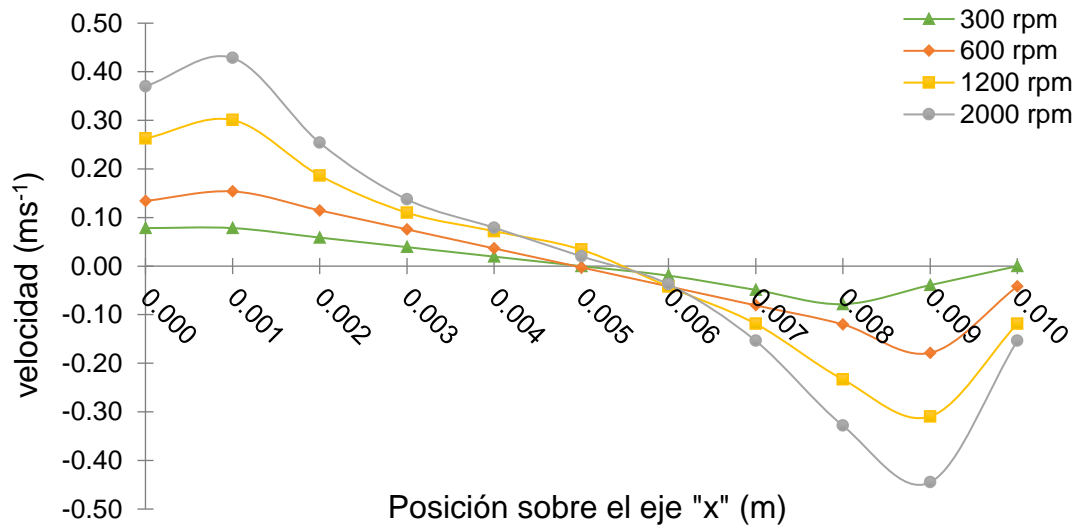


figura 4.9. Perfiles de velocidades a 300, 600, 1200 y 2000 rpm.

De acuerdo con la figura 4.9, se observó que a medida que aumenta la velocidad de rotación del cilindro interno, aumenta la velocidad del vórtice, comportándose de la misma forma en todas las velocidades de rotación evaluadas. La velocidad se tomó a lo largo del espacio anular desde 0.0 m a 0.01 m, manteniendo fija la posición en “y” y “z”, y se observó que a la mitad del espacio anular la velocidad del vórtice se anula, existiendo una zona con velocidad cero, pero a medida que se sigue desplazando hacia la parte externa del espacio anular, la velocidad axial comienza a aumentar.

4.2.2 Análisis de velocimetría de imagen de partículas (PIV)

El análisis PIV se realizó para la velocidad de 300 rpm, y se validó los resultados de la simulación numérica. Se comparó los perfiles de velocidad del modelo computacional con la técnica de PIV, para la posición en “x” de 0.0 m a 0.01 m y la posición “y” y “z” fija, estos resultados se muestran en la figura 4.10.

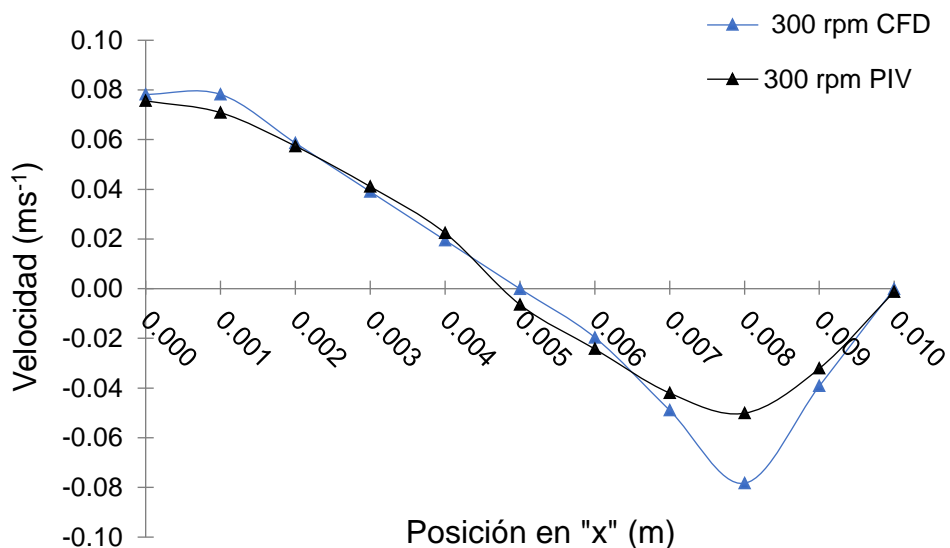


figura 4.10. Perfiles de velocidades a 300 rpm en CFD y PIV.

En la tabla 4.5 se muestra que no hay una variación significativa de la velocidad axial del vórtice, comportándose el flujo de la misma manera en ambos análisis (los signos indican la dirección del flujo, arriba y abajo).

Posición			Velocidad Axial (ms^{-1})	
x (m)	y (m)	z (m)	300 rpm CFD	300 rpm PIV
0.000	0.139	0	0.078213	0.075589
0.001	0.139	0	0.078213	0.070854
0.002	0.139	0	0.058645	0.057383
0.003	0.139	0	0.039077	0.041083
0.004	0.139	0	0.019509	0.022412
0.005	0.139	0	-0.000059	-0.006407
0.006	0.139	0	-0.019628	-0.024255
0.007	0.139	0	-0.048980	-0.041999
0.008	0.139	0	-0.078332	-0.050133
0.009	0.139	0	-0.039196	-0.032102
0.010	0.139	0	-0.000059	-0.001237

tabla 4.5 Resultados de la velocidad axial a 300 rpm para CFD y PIV.

En el análisis PIV, se corroboró que si hay aparición de vórtices (figura 4.11), siendo estas velocidades aptas para el desarrollo experimental del efecto de los vórtices Taylor-Couette en la desinfección de agua por UV.

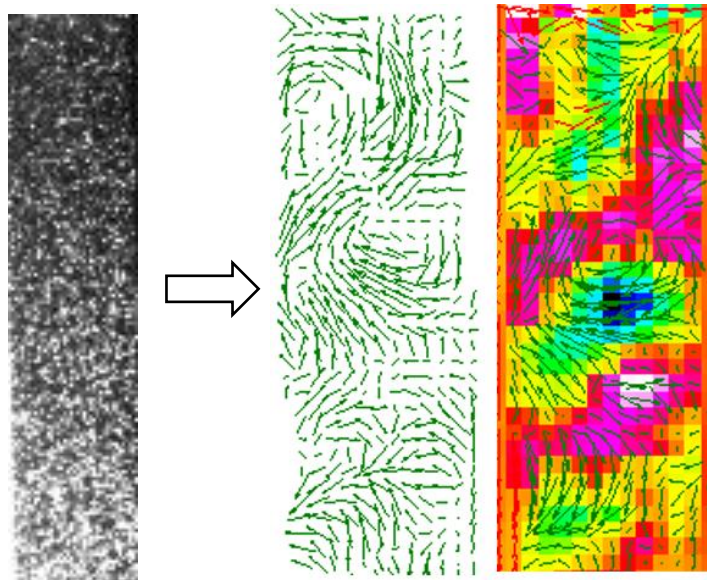


figura 4.11. Mapa vectorial (a) y Mapa escalar (b) del análisis de PIV.

4.3 EFECTO DE LOS VORTICES EN LA DESINFECCION POR UV

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en la desinfección de agua por medio de la radiación de luz UV en el reactor tipo Taylor-Couette.

Así mismo, se evaluó el efecto de los vórtices toroidales rotatorios para diferentes condiciones de operación y concentraciones de la muestra. En este análisis se evaluó tres concentraciones iniciales (10^8 UFC/ml, 10^6 UFC/ml y 10^4 UFC/ml) y cuatro velocidades de agitación (300 rpm, 600 rpm, 1200 rpm y 2000 rpm).

Primero se evaluó la concentración de 10^8 UFC/ml, se vio el efecto de los vórtices toroidales rotatorios sobre el proceso de desinfección con UV, se analizó el abatimiento microbiano a diferentes velocidades de agitación (300, 600 y 2000 rpm), se incluyó una prueba sin agitación para corroborar el efecto de los vórtices, los resultados se muestran en la figura 4.12. El muestreo se realizó cada 15 minutos durante 75 minutos.

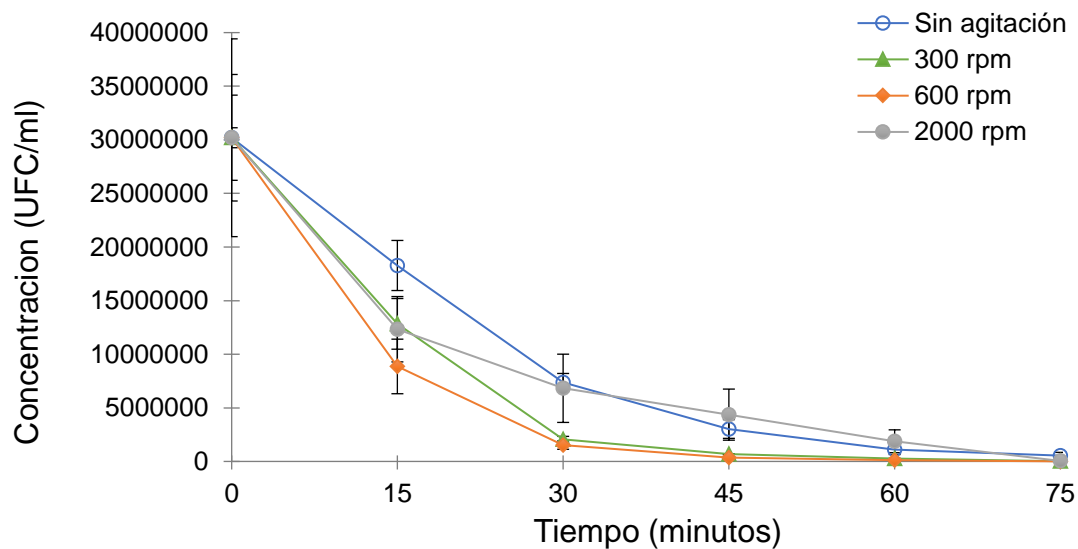


figura 4.12. Efecto de los vórtices en la desinfección de agua por UV a concentración inicial de 10^8 UFC/ml.

En los resultados de desinfección, se observó el efecto que tiene la velocidad de rotación del cilindro interno en el tratamiento con luz UV, para la

velocidad de 300 y 600 rpm se disminuyó el tiempo de tratamiento, siendo 600 rpm, la velocidad donde se observa que disminuye notablemente la carga microbiana en un menor tiempo de exposición de UV. Se observó que, a la velocidad de 2000 rpm, después de los 30 minutos, la carga microbiana empieza ir en aumento, viéndose afectado el proceso de desinfección por el calentamiento de la muestra (aproximadamente 37°C) debido a la energía cinética generada por la velocidad de rotación del cilindro interno, impidiendo el abatimiento microbiano y favoreciendo el crecimiento de *E. coli*.

Así mismo, en la figura 4.13 se muestran los resultados obtenidos en la desinfección de agua por medio de luz UV en el reactor tipo Taylor-Couette a una concentración de 10^6 UFC/ml, se evaluó el efecto que tienen los vórtices toroidales rotatorios sobre el abatimiento microbiano a diferentes velocidades de agitación 300, 600, 1200 y 2000 rpm, se incluyó el análisis sin agitación. El muestreo se realizó cada 5 minutos durante 20 minutos.

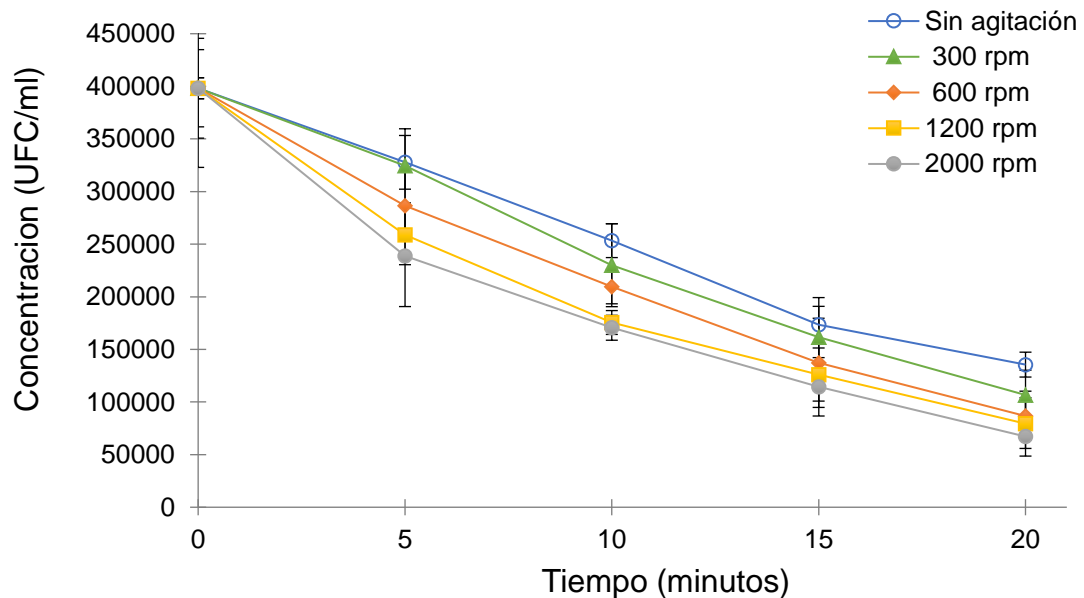


figura 4.13. Efecto de los vórtices en la desinfección de agua por UV a concentración inicial de 10^6 UFC/ml.

En este análisis también se observó el efecto de la velocidad de rotación del cilindro en el tratamiento de desinfección, a medida que incrementa la velocidad de rotación, hay un efecto sobre el abatimiento microbiano, siendo 2000 rpm, la velocidad más efectiva.

Por último, en la figura 4.14 se muestran los resultados obtenidos en la desinfección de agua por medio de luz UV en el reactor tipo Taylor-Couette a una concentración de 10^4 UFC/ml, se evaluó el efecto que tienen los vórtices toroidales rotatorios sobre el abatimiento microbiano a diferentes velocidades de agitación 300, 600 y 2000 rpm, se incluyó el análisis sin agitación. El muestreo se realizó cada 3 minutos durante 15 minutos.

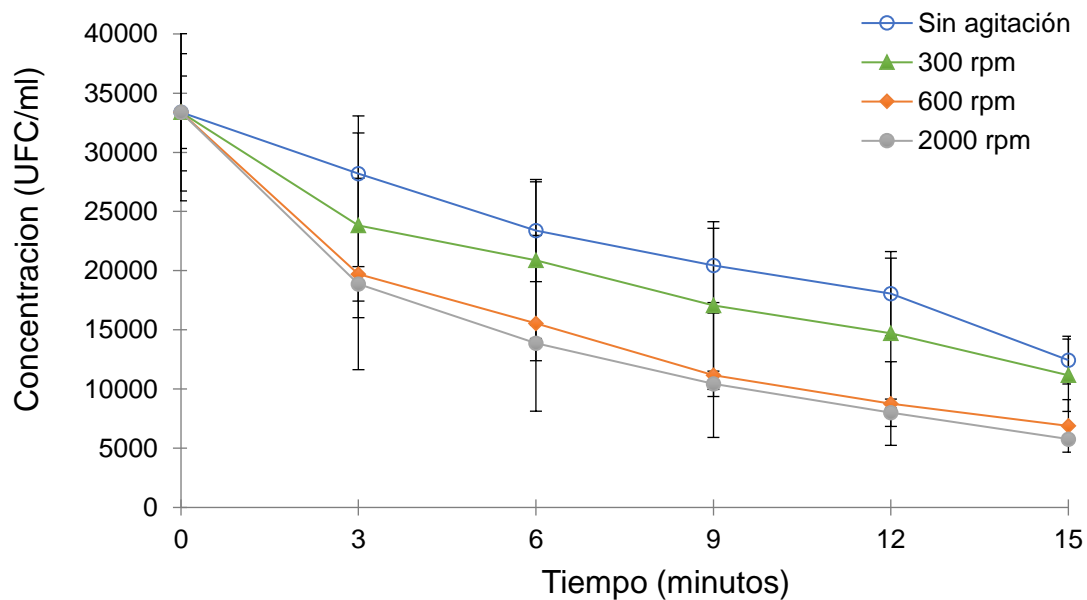


figura 4.14. Desinfección de agua por medio de luz UV en un reactor tipo Taylor-Couette con una concentración inicial de 10^4 UFC/ml.

En la tabla 4.6 se muestra un comparativo entre las diferentes concentraciones iniciales manejadas y las diferentes velocidades de rotación del reactor Taylor-Couette. Comparando todos los resultados, se observó que

los vórtices toroidales influyen en el tratamiento con luz UV, corroborando la hipótesis planteada al inicio del proyecto.

Análisis	% de abatimiento de <i>E. coli</i>		
	10 ⁸ UFC/ml	10 ⁶ UFC/ml	10 ⁴ UFC/ml
sin agitación	1.80	34.04	37.28
300	0.07	26.79	33.45
600	0.03	21.77	20.64
1200	NA	19.95	NA
2000	0.16	16.88	17.31

tabla 4.6. % de abatimiento microbiano en los diferentes tratamientos.

Se realizó un análisis control únicamente para la concentración de 10⁶ UFC/ml, se eliminó la radiación con luz UV, con el fin de descartar un estrés por agitación en el microorganismo de referencia, los resultados se muestran en la figura 4.15.

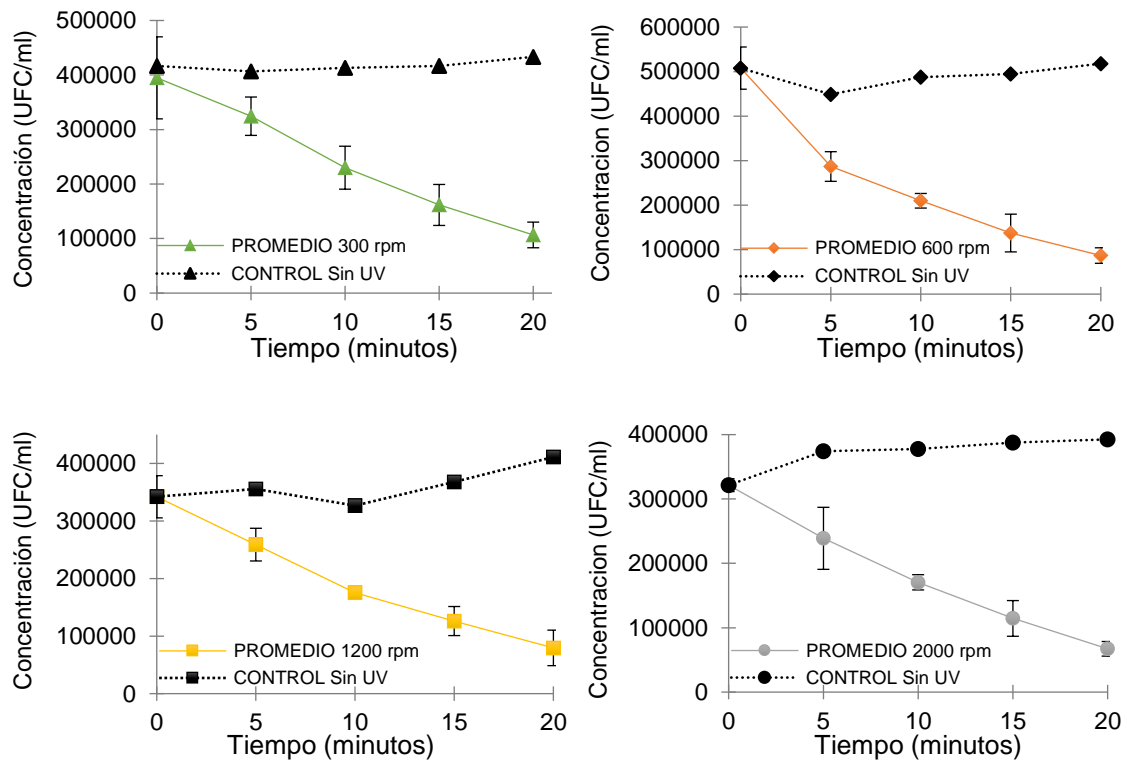


figura 4.15. Controles sin agitación para una concentración de 10⁶ UFC/ml.

En la figura 4.15 se muestra el reactor durante el proceso de desinfección de agua, se visualizó los vórtices a simple vista cuando se irradiaba la muestra con luz UV.

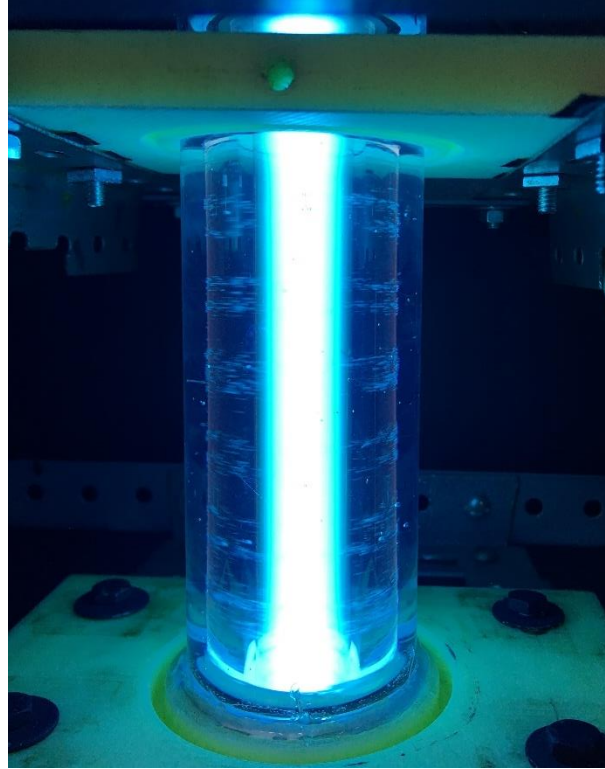


figura 4.16 Reactor tipo Taylor-Couette durante el proceso de desinfección con UV.

4.4 MODELO CINÉTICO DE PREDICCIÓN DEL ABATIMIENTO MICROBIANO

Para la construcción del modelo cinético se utilizó los resultados obtenidos en las pruebas con concentración de 10^6 UFC/ml. A la figura 4.13 se trazó una línea de tendencia por cada velocidad de rotación, esto se muestra en la figura 4.17. La línea de tendencia se ajusta a una función de tipo exponencial. Así mismo en la tabla 4.7 se muestran las constantes obtenidas a partir de cada línea de.

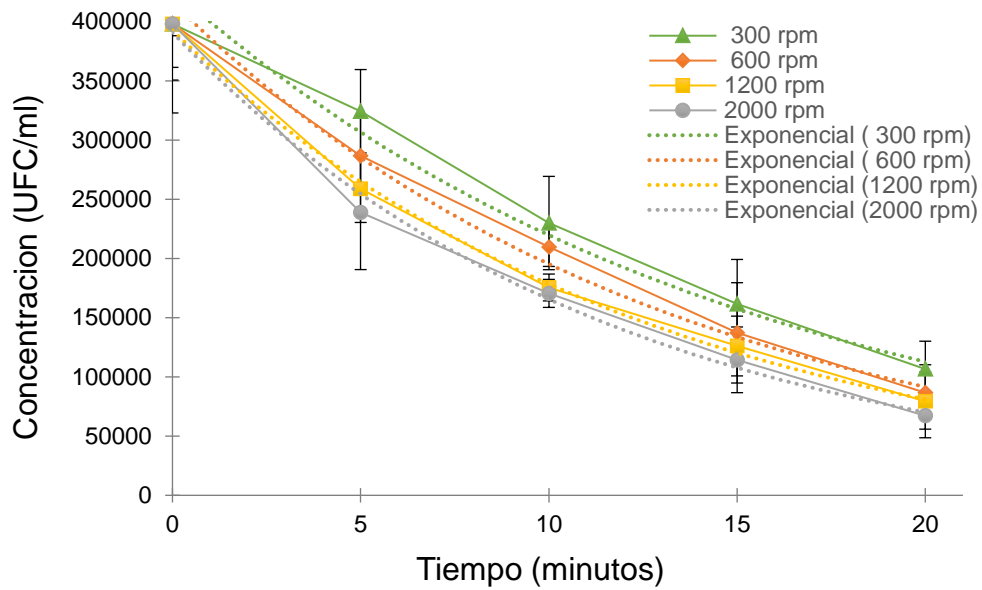


figura 4.17. Líneas de tendencia para los resultados del análisis a concentración de 10^6 UFC/ml

rpm	k	C ₀	R ²
300	0.067	427806	0.9873
600	0.076	416639	0.9925
1200	0.079	392798	0.9977
2000	0.086	391021	0.9943

Tabla 4.7. Constantes de las ecuaciones generadas a las diferentes velocidades de rotación.

Se analizó los datos y a partir de esto se generó el modelo cinético matemático. Se utilizó los valores de k para generar otra grafica (figura 4.18), la cual se ajustó a una línea de tendencia de tercer orden, $y = 2E-11x^3 - 7E-07x^2 + 8E-05x + 0.0491$; $R^2 = 1$. Con esta ecuación se realizó una serie de cálculos, los cuales ayudaron a realizar predicciones sobre el abatimiento microbiano a diferentes velocidades de agitación. En la figura 4.18 se muestran los resultados obtenidos en el modelado de la cinética de inactivación de *E. coli*. en un tratamiento con UV en el reactor tipo Taylor-Couette con espacio anular de 1 cm.

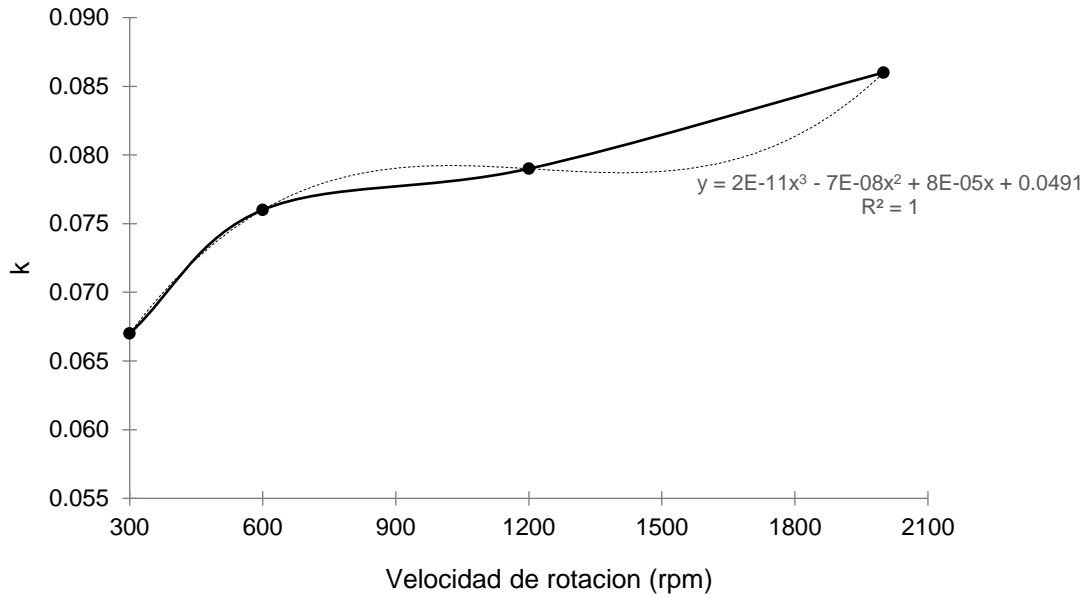


figura 4.18. Línea de tendencia de los valores de k a diferentes velocidades de rotación a una concentración inicial de 10^6 UFC/ml.

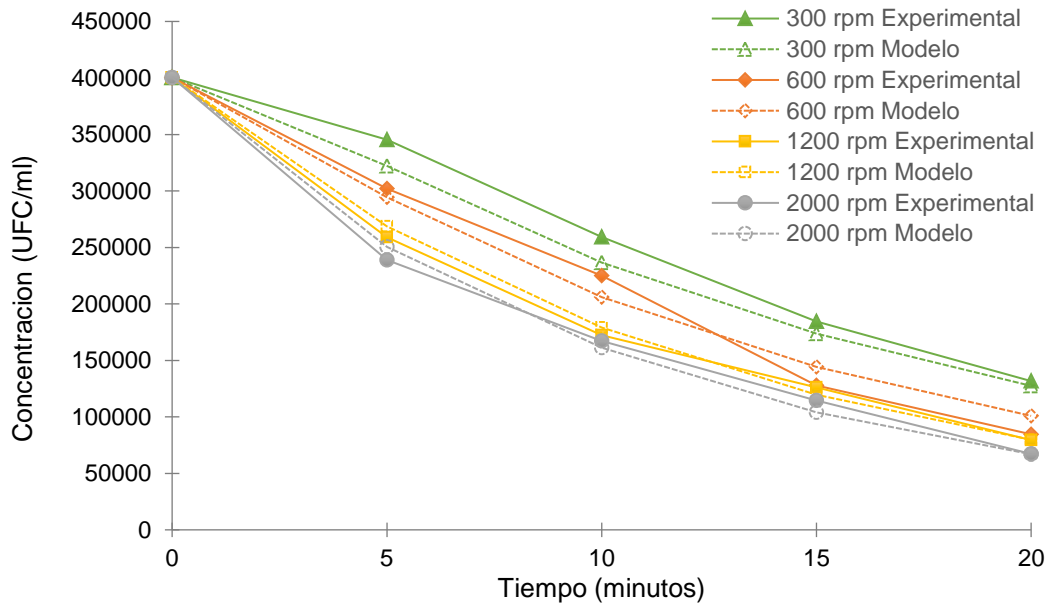


figura 4.19. Líneas de tendencia para el abatimiento microbiano experimental y del modelo cinético en un reactor tipo Taylor-Couette.

Se observa en la figura 4.19 que los resultados del modelado se ajustan a los resultados obtenidos en la parte experimental.

5.1 CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un reactor tubular tipo Taylor-Couette acoplado con una lámpara de luz UV en el interior del reactor con las características básicas para llevar a cabo un tratamiento de desinfección de agua.

Durante la operación del reactor se visualizó la aparición de vórtices toroidales (Taylor-Couette), obteniendo la inestabilidad de flujo deseada, esta inestabilidad ayudó a evaluar mediante experimentación en el reactor tubular, el efecto de los vórtices Taylor-Couette durante el proceso de desinfección.

Las pruebas de desinfección por medio de radiación UV muestran que los vórtices toroidales generados a partir de las 300 rpm a las 2000 rpm, tienen un efecto sobre el abatimiento microbiano, inactivando en un menor tiempo de exposición UV a la bacteria *E. coli* (microorganismo de referencia para cuantificación de coliformes) con respecto a tratamientos convencionales (sin agitación).

Además, de acuerdo con los resultados obtenidos, no se recomienda utilizar el reactor por tiempos mayores a 45 minutos, ya que a velocidades de rotación por arriba de las 2000 rpm a tiempos largos de operación generan un calentamiento de la muestra (37°C), favoreciendo el crecimiento de *E. coli*.

Así mismo, la realización de la simulación numérica sirvió como punto de partida para el desarrollo experimental, mostrando datos preliminares del comportamiento del flujo dentro del reactor, reduciendo el número de prueba experimentales, para determinar parámetros de operación en la experimentación y por ende tiempo y recursos. Se corroboró los resultados obtenidos de la simulación numérica CFD validándose mediante una comparación con datos obtenidos de forma experimental con el uso de PIV.

Con los resultados obtenidos se generó un modelo cinético, el cual servirá para predecir el comportamiento del abatimiento microbiano optimizando recursos.

5.2 RECOMENDACIONES

El reactor fue de fácil operación y mantenimiento, con posibilidades reales de escalamiento y modificaciones para llevarse a cabo diferentes análisis. Considerando la fragilidad del material utilizado, podría construirse un reactor de las mismas características, pero con otro tipo de material para los cilindros, como el plástico, pudiendo ofrecer resultados interesantes que podrían probarse, con el fin de que el reactor pudiera operarse sin ningún cuidado ya que el material utilizado (vidrio) tenía que manejarse con precaución para no ocasionar accidentes.

En busca de mejorar el proceso; el reactor puede probarse en un futuro con diferente espacio anular (distancia entre cilindros) pudiendo optimizar el proceso de desinfección aumentando significativamente los volúmenes de agua de tratamiento. Así mismo se pueden reducir los tiempos de tratamiento considerablemente, si se utiliza la desinfección fotocatalítica como un paso final del tratamiento.

Es preciso ensayar con otros tipos de microorganismos indicadores, a parte de los coliformes fecales, se sugiere la utilización de bacterias gran positivas, esporas y virus para valorar el efecto de los vórtices Taylor-Couette sobre estos microorganismos.

REFERENCIAS

Abbaszadegan, M., Hasan, N.M., Gerba, P.C., Roessler, F.P., Wilson, R.B., Kuennen, R. y Dellen, V.E., (1997), The disinfection efficacy of a point-of-use water treatment system against bacterial, viral and protozoan waterborne pathogens, *Water Research*, 31 (3), 574-582.

Abcha N., Latrache N., Dumunchel F. and Mutabazi I., Qualitative relation between reflective light intensity by Kalliroscope flakes and velocity field in the Taylor-Couette system, 2008; *Experiments in fluids*, 45:85-94.

Acher A., E. Fischer, R. Turnheim y Y. Manor, (1997), Ecologically Friendly Wastewater Disinfection Techniques, *Water Research*, 31 (6), 1398-1404.

Andereck C.J., Liu S.S. and Swinney H.L., (1986) Flow regimes in a circular Couette system with independently rotating cylinders, *J. Fluid Mech.* 164: 155-183.

Andreadakis A., D. Mamais, D. Christoulas y S. Kabylafka (1999), Ultraviolet Disinfection of Secondary and Tertiary Effluent in the Mediterranean Region, *Water Science and Technology*, 40(4/5), 253-260.

Bahri A., C. Basset, F. Oueslati y F. Brissaud (2001), Reuse of Reclaimed Wastewater for Golf Course Irrigation in Tunisia, *Water Science and Technology*, 43(10), 117-124.

Blatchley III E., C. Bastian, R. Duggirala, J. Allegan, M. Moore y P. Schuerch (1996), Ultraviolet Irradiation and Chlorination/Dechlorination for Municipal Wastewater Disinfection: Assessment of Performance Limitations, *Water Environment Research*, 68(2), 194-204.

Braun W., De Lillo F. and Eckhardt B., (2006), Geometry of particle paths in turbulent flows, *Journal of turbulence*, 7, 62.

Bolton, J.R. y Cotton, C.A.C., (2011), The Ultraviolet Disinfection Handbook. American Water Works Association, New York, U.S.A., 2011.

Cáceres, L.O. (1990) Desinfección del agua. Ministerio de salud. 1, 147-325.

Cairns W. (1993) Comparing Disinfection by Ultraviolet Light and Chlorination- The Implications of Mechanism for Practice. Planning, Design and Operations of Effluent Disinfection Systems Specialty Conference Series. May 23-25 WEF, Whippany N.J, 555.

Cairns W., G. Sakamoto, M. Devries y D. van Dijk (1995), The Impacts of Wastewater Quality on Ultraviolet Disinfection of Reclaimed Wastewater, Disponible en: <http://www.trojanuv.com/papers/waterreclaim.htm>.

CCC (2003) Drinking Water Chlorination, A Review of Disinfection Practices and Issues, Chlorine Chemistry Council.

Chandrasekhar, S. (1962), Hydrodynamic and hydromagnetic stability, Dover, New York.

Chong M.S., Perry A. E. and Cantwell B. J., (1990), A general classification of threedimensional flow fields, Physics of Fluids A 2, 765-777.

Chu W.H., J.Y. Wang y C.M. Kao (2003), A Simplified Risk-Based Approach for Process Screening in Municipal Wastewater Reclamation and Reuse, Water Science and Technology, 47(1), 257-262.

Clancy J., Z. Bukhari, T. Hargy, J. Bolton, B. Dussert y M. Marshall (2000), Using UV to Inactivate Cryptosporidium, Journal AWWA, 92(9), 97-104.

Craun G. (1991), Epidemiologic Studies of Organic Micropollutants in Drinking Water. En: The Handbook of Environmental Chemistry. O. Hutzinger (ed). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 5, pt. A.

Darby J., M. Heath, J. Jacangelo, F. Loge, P. Swaim y G. Tchobanoglous (1995) Comparison of UV Irradiation to Chlorination: Guidance for Achieving Optimal UV Performance. Water Environment Research Foundation.

Deng R., Arifin D., Chyn M. and Wang C., (2010), Taylor vortex flow in presence of internal baffles, 2010; Chemical Engineering Science, 65 4598-4605.

Díaz Díaz F. y L. Serrano (2002) Desinfección de Agua con Luz Ultravioleta. Agua Latinoamérica, 2(2):46-49.

Di Prima, R. y Swinney, H. L. (1985), Instabilities and transition in flow between concentric rotating cylinders, In Hydrodynamic instabilities and the transition to turbulence, 139-180. Springer.

Dodds L, W. King, C. Woolcott y J. Pole (1999), Trihalomethanes in Public Water Supplies and Adverse Birth Outcomes, Epidemiology, 10(3), 33-237.

Dominguez-Lerma M. A., Alers G. and Cannell D. S., (1984), Effects of "Kalliroscope" flow visualization particles on rotating Couette-Taylor flow, Physics of fluids, 28,1204.

Dou, H.-S. (2006a), Mechanism of flow instability and transition to turbulence, International Journal of Non-Linear Mechanics, 41(4), 512-517.

Dunnick J. y R. Melnick (1993), Assessment of the Carcinogenic Potential of Chlorinated Water: Experimental Studies of Chlorine, Chloramine, and Trihalomethanes, Journal of the National Cancer Institute, 85(10), 817-822.

Environmental Protection Agency (EPA). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. (1999a) "Desinfección con cloro". Septiembre.

Facile N., B. Barbeau, M. Prévost y B. Koudjonou (2000) Evaluating Bacterial Aerobic Spores as a Surrogate for Giardia and Cryptosporidium Inactivation by Ozone. *Water Research*, 34(12):3228-3246.

Griffiths J.K., Waterborne Diseases y S.R. Quah, (2017), *International Encyclopedia of Public Health (Second Edition)*, Academic Press, Oxford. 388-401.

Hijnen, W.A.M., Beerendonk, E.F. y Medema, G.J., (2006), Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan cysts in water: a review. *Water Res.* 40 (1), 3–22.

Jiménez B., A. Chávez y C. Hernández (1999), Alternative Treatment for Wastewater Destined for Agricultural Use, *Water Science and Technology*, 40(4/5), 355-362.

Joret J., V. Mennecart, C. Robert, B. Compagnon y P. Cervantes (1997) Inactivation of Indigenous Bacteria in Water by Ozone and Chlorine. *Water Science and Technology*, 35(11/12):81-86.

Joseph, D. D. (1976), Stability of fluid motions. i, ii. NASA STI/Recon Technical Report A, 77:12423.

Karl G. Lindenauer and Jennie I. Darby, (1994), "Ultraviolet disinfection of wastewater: Effect of dose on subsequent photoreactivation", *Water Research*, Vol. 28, No. 4, pp. 805-817.

Kenneth C., C. Lynch, M. Hildesheim, M. Dosemeci, J. Lunin, M. Alavanja y G. Craun (1998) Drinking Water Source and Chlorination Byproducts I. Risk of Bladder Cancer. *Epidemiology*, 9(1):21-28.

Kim, W.-S., (2014). Application of Taylor vortex to crystallization, *J. Chem. Eng. Jpn.* 47, 115–123.

Koschmieder E. L., (1975), "Effect of finite disturbances on axisymmetric Taylor vortex flow, *Physics of fluids*, 18, 499

Kowalski, W., (2009). *Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-01998-2.

Laguerre R., Nore C., Leorat J. and Guermond J.-L., (2008), Cyclic nonlinear dynamo action in a finite Taylor Couette flow, *Journal of Physics*, 137 1.

Launder B., Spalding D., (1972), "Lectures in Mathematical Model of Turbulence", Academic Press.

Lazarova V., M. Janex, F. Fiksdal, C. Oberg, I. Barcina y M. Pommepuy (1998) Advanced Wastewater Disinfection Technologies: Short and Long Term Efficiency. *Water Science and Technology*, 38(12):109-117.

Lee, S., Choi, A., Kim, W.-S., Myerson, A.S., (2011). Phase transformation of sulfamerazine using a Taylor Vortex, *Cryst. Growth Des.* 11, 5019–5029.

Lindenauer K. y J. Darby (1994) Ultraviolet Disinfection of Wastewater Effect of Dose on Subsequent Phororeactivation. *Water Research*, 28 (4):805-817.

Liltved H. y B. Landfald (2000) Effects of High Intensity Light o Ultraviolet-Irradiated and NonIrradiated Fish Pathogenic Bacteria. *Water Research*, 34(2):481-486.

Manela A. and Frankel I., (2007), On the compressible Taylor-Couette problem, *Journal of Fluid Mechanics*, 588 59-64

Matisse P. and Gorman M., (1984), Neutrally buoyant anisotropic particles for flow visualization, *Physics of Fluids* 27 759-760.

Marouan Nemri, Eric Climent, Sophie Charton, Jean-Yves Lanoë and Denis Ode (2013). Experimental and numerical investigation on mixing and axial

dispersión in Taylor-Couette Flow patterns. *Chemical Engineering Research and Desing.* 91, 2346-2354.

Nguyen, A.T., Kim, J.M., Chang, S.M., Kim, W.S., (2011). Phase transformation of guanosine 5-monophosphate in continuous Couette-Taylor crystallizer: experiments and numerical modeling for kinetics, *Ind. Eng. Chem. Res.* 50, 3483–3493.

Nguyen, A.T., Joo, Y.L., Kim, W.S., (2012). Multiple feeding strategy for phase transformation of GMP in continuous Couette-Taylor crystallizer, *Cryst. Growth Des.* 12, 2780–2788.

Ogihara T. and Nomura M., (2002), Continuous Synthesis of Monodispersed Alumina Particles by the Hydrolysis of Metal Alkoxide Using Taylor Vortex, *KONA powder and particle journal*, 20 231-232.

Oguma K., H. Katayama y S. Ohgaki (2002) Photoreactivation of *Escherichia coli* after Low- or Medium-Pressure UV Disinfection Determined by an Endonuclease Sensitive Site Assay. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(12):6029-6035.

Organización Mundial de la Salud. (1996) Developing Human Healthrelated Chemical Guidelines for Reclaimed Water and Sewage Sludge Applications in Agriculture.

Park, S.A., Lee, S., Kim, W.-S., (2015). Polymorphic crystallization of sulfamerazine in Taylor vortex flow: polymorphic nucleation and phase transformation, *Cryst. Growth Des.* 15, 3617–3627.

Park, S., Kim, W.-S., (2018). Influence of fluid motions on polymorphic crystallization of Lhistidine: Taylor vortex flow and turbulent eddy flow, *Cryst. Growth Des.* 18, 710–722.

Patankar S., (1980), Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere Publishing Corporation.

Peng J. and Zhu K., (2010), Linear instability of two-fluid Taylor-Couette flow in the presence of surfactant, Journal of Fluid Mechanics, 651 357-361

Rajeshwar K. y J. Ibañez (1997), "Environmental Electrochemistry". Fundamentals and Applications in Pollution Abatement. Ed. Academic Press. 625-693.

Reynolds K. (2002) Ultraviolet Light: An Alternative Disinfectant. Water Conditioning and Purification, 44 (6):74-77.

Rice, G.R., Bollyky, J.L., Lacy, J.W. (1986) Analytical Aspects of Ozone Treatment of Water and Wastewater. 1, 15-50.

Richter O., Menges M. and Krausaar-Czarnetzki B., (2009), Investigation of mixing in a rotor shape modified Taylor-vortex reactor by the means of a chemical test reaction, Chemical Engineering Science, 64 2384-2386.

Roberts P., (1965), Appendix in experiments on the stability of viscous flow between rotating cylinders. VI. Finite amplitude experiments, Proc. Royal Society, A 238, 531556.

Rojas-Valencia, M. T. Orta de Velasquez, N. Garcia Ramirez; M.Martínez-Zamudio and Víctor Franco.(2005), "Removal of microorganisms present in lettuces and soil irrigated with treated wastewaters".Memorias del International Conference Environmental, Industrial and Applied microbiology. March 15-18th, Badajoz, Spain.

Rüdiger G., Gellert M., Schultz M. and Hollerbach R., Dissipative Taylor-Couette flows under the influence of helical magnetic fields, 2010. Physical review E, 82 0163119, 1-3. Sang-Hyuk L., Hee-Taeg C., Cheol-Woo P. and

Hyoung-Bum K.. Experimental investigation of the effect of axial wall slits on Taylor-Couette flow, 2009. Fluid Dynamics Research, 41 045502 12

Sangho Lee and Richard M. Lueptow, (2002), "Experimental verification of a model for rotating reverse osmosis", Desalination, 146, 353-359.

Sakamoto G. (2000) Finite and Nonrenewable. UV Disinfection of Reclaimed Wastewater: The North American Experience. Environmental Protection, 11(10), 20-25.

Sakamoto G., D. Schwartzel y D. Tomowich (2001) UV Disinfection for Reuse Applications in North America. Water Science and Technology, 43(10):173-178.

Shaban A., G. El-Taweel y G. Ali (1997) UV Ability to Inactivate Microorganisms Combined with Factors Affecting Radiation. Water Science and technology. 35(11/12) : 107-112.

Singh J. and Bajaj R., Couette flow in ferrofluids with magnetic field, 2005. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 294 53-55.

Solomon C., P. Casey, C. Mackne y A. Lake (1998) Ultraviolet Disinfection. National Small Flows Clearinghouse. Fact Sheet WWFS0M20. Environmental Technology Initiative. ETI, 1-4.

Sommer R., T. Haider, A. Cabaj, W. Pribil y M. Lhotsky (1998) Time Dose Reciprocity in UV Disinfection of Water. Water Science and Technology, 38(12):145-150.

Song, K., Mohseni, M., Taghipour, F., (2016). Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: a review. Water Res. 94, 341–349.

Tapan K. Sengupta, Mohammad F. Kabir and Ajay K. Ray (2001). A Taylor vortex photocatalytic reactor for water purification. IND. ENG. CHEM. RES. 40, 5268-5281.

Task Force on Wastewater Disinfection (1996) Wastewater Disinfection. Water Environment Federation. Municipal Subcommittee. III. Series: Manual of Practice. FD; no. 10. ISBN 157278-036-3.

Taylor, G. I. (1923). Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders. Mathematical, Physical & Engineering Sciences, 223 289-294.

Umbreit W. (1962) Modern Microbiology. W.H. Freeman and Company. Pp. 507.

US EPA (1999) Alternative Disinfectants and Oxidants. EPA guidance Manual.

Task Force on Wastewater Disinfection (1996) Wastewater Disinfection. Water Environment Federation. Municipal Subcommittee. III. Series: Manual of Practice. FD; no. 10. ISBN 157278-036-3.

Van Doormaal J. y Raithby G. "Enhancements of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flow". Numerical Heat Transfer, Vol. 7, Pags. 147-163, 1984.

Versteeg H., Malalasekera W., "An Introduction to Computational Fluid Dynamics, the Finite Volume Method", Longman Scientific & Technical, 1995.

Walowit, J., Tsao S. and Di-Prima R.C., Stability of flow between arbitrarily spaced concentric cylindrical surfaces including the effect of a radial temperature gradient, 1964, Trans. Journal of Applied Mechanics, 31, 585-593.

White F., Fluids mechanics, 1999. Mc Graw Hill.

REFERENCIAS

White, C.G. Handbook of Chlorination and Alternative Disinfectants. (1999). In: Waster, water and health in hot climates. R.Feachem, M. McGarry and D. Mara.(ed). John Wiley & Sons. New York.

Woodall, C.J., (2009). Desalination. 248, 616–621.

Zimmer J., R. Slawson y P. Huck (2003) Inactivation and Potential Repair of *Cryptosporidium parvum* Following Low- and Medium- Pressure Ultraviolet Irradiation. *Water Research*, 37:3517-3523.