



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA

“MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO HIDRODINÁMICO DE
UN DIGESTOR ANAERÓBICO DE LAGUNA CUBIERTA
MEDIANTE CFD”

TESIS
QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL
DEL AGUA

PRESENTA

RICARDO ADOLFO MARTÍNEZ GARCÍA



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO, JUNIO DE 2013

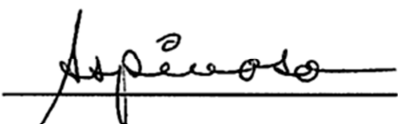


**MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO HIDRODINÁMICO DE UN DIGESTOR ANAERÓBICO
DE LAGUNA CUBIERTA MEDIANTE CFD**

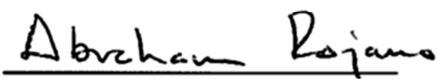
Tesis realizada por Ricardo Adolfo Martínez García bajo la dirección del comité asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR:


DR. TEODORO ESPINOSA SOLARES

ASESOR:


DR. ABRAHAM ROJANO AGUILAR

ASESOR:


M.C. OMAR RESÉNDIZ CANTERA

DEDICATORIA

*A mis papás **Ana Rosa y Ricardo**, y a mi hermanita **Carolina Jazmín** por su amor, apoyo incondicional e inspiración en la vida.*

*A mi abuelito **Enrique** por su apoyo, compañía y paciencia que me ha brindado durante toda mi estancia en Chapingo.*

*A **Edith** por brindarme todo su amor, paciencia, comprensión y estar conmigo en los momentos más difíciles y maravillosos: Te amo.*

*A mi tío **Juan José** por el afecto, apoyo, consejos y trabajo brindado.*

*A toda mi familia en general por confiar en mí y brindarme su apoyo, especialmente a mi tío **Juan Manuel**, mi tío **Arturo** y mi tía **Gloria**.*

*A mi abuelita **Rosita**, donde quiera que estés sé que este logro te llenaría de orgullo.*

*A mis amigos y compañeros del posgrado **Nadia, Mario, Benito, Jesús, Mulmaro, Telésforo, Yaneli y Naela**.*

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado para la realización de mis estudios de Maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo y Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua por haberme aceptado como alumno en su programa y facilidades para el desarrollo de esta tesis.

Al Dr. Teodoro Espinosa Solares por haber aceptado dirigir esta tesis, por su aportes, observaciones, orientación y paciencia para desarrollar este trabajo de investigación.

Al Dr. Abraham Rojano Aguilar y al Maestro Omar Reséndiz Cantera por sus aportes y apoyo para el desarrollo de esta investigación.

Al personal académico del Posgrado IAUIA por el apoyo académico e impartición de cursos durante mi estancia en la Maestría.

Al Centro de Investigación en Bioenergéticos por el financiamiento de la presente investigación.

Al Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola por el uso del laboratorio de Energía durante la etapa experimental.

Al Dr. Eleazar Aguirre Mandujano, Dra. Consuelo Lobato Calleros y M.C. Juan Carlos Cuevas por el apoyo brindado en las pruebas reológicas.

Al coordinador del Posgrado IAUIA, Dr. Eugenio Romanchik por sus aportaciones a la investigación y formación académica.

A la empresa Rancho La Hondonada S.P.R. de R.L. de I.C. por la utilización de sus instalaciones y facilitar los datos para el desarrollo del presente trabajo.

A la Ing. Maria del Carmen González Rangel por los datos proporcionados relacionados con la operación del digestor industrial.

A Rosy por toda su paciencia y ayuda en los trámites necesarios durante mi estancia en el posgrado.

DATOS BIOGRÁFICOS

Ricardo Adolfo Martínez García nació el 20 de marzo de 1985 en Texcoco, Estado de México, hijo de Ana Rosa García Villafuerte y Ricardo Martínez Rosales, ambos Ingenieros Agrónomos especialistas en Sociología Rural por parte de la Universidad Autónoma Chapingo. A la edad de tres años se traslada junto con sus padres a la ciudad de Aguascalientes, Ags., donde radicó los siguientes 14 años. En septiembre de 1991 ingresa a la primaria estatal Enrique García Gallegos egresando en julio 1996 con promedio general obtenido de 9.6. Continuó sus estudios de educación básica en la secundaria general num. 3 “Congreso de Anáhuac” durante el periodo de agosto de 1996 a julio de 1999, logrando obtener su certificado con un promedio final de 8.7. En agosto de 1999 ingresa al nivel medio superior en el Centro de Estudios Tecnológicos, Industrial y de Servicios CETIS num. 155, finalizando sus estudios en julio de 2002 con promedio final de 9.8. El 7 de julio de ese año es seleccionado para estudiar el nivel superior en la Universidad Autónoma Chapingo, inscribiéndose en el nivel propedéutico en la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas (URUZA), donde permaneció durante el ciclo escolar 2002-2003. En julio de 2003 se traslada a la unidad central de la UACH para continuar con sus estudios en la carrera de Ingeniería Agroindustrial. En junio de 2007 concluye sus estudios de Ingeniería con un promedio final de 9.1. En julio de ese mismo año ingresa a trabajar en la empresa SINDEMEX XXI S.A. de R.L., y un mes más tarde viaja Almería, España, donde radicó de agosto a diciembre de 2007. Al regresar a México, ingresa a la empresa Philip Eyewear S.A. de C.V. donde se desempeñó en el periodo de diciembre de 2007 a mayo de 2010 como Director de Ingeniería y Proyectos de TEKMAH. En julio de 2010 ingresa a trabajar en el proyecto “Creación de un inóculo acelerador del compostaje pollo-paja” en convenio con la Universidad Autónoma Chapingo y la empresa Hy-Line de México S.A. de C.V. En 2011 obtiene su título profesional como Ingeniero Agroindustrial con la tesis titulada “Estudio de Factibilidad Técnica-Económica para el establecimiento de una planta de producción de biodiesel en la UACH a partir de aceites de desecho”. En junio de 2011 es aceptado para ingresar a la maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la UACH, donde inicia sus estudios en agosto de ese mismo año. Su trabajo de investigación se tituló “Mejoramiento del desempeño hidrodinámico de un digestor anaeróbico de laguna cubierta mediante CFD”.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	I
LISTA DE CUADROS.....	III
TABLA DE NOMENCLATURA.....	IV
RESUMEN Y ABSTRACT.....	VI
INTRODUCCIÓN.....	1
1. OBJETIVO GENERAL	3
2. OBJETIVOS PARTICULARES.....	3
CAPÍTULO 1. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
1. DIGESTIÓN ANAERÓBICA.....	4
1.1. TIPOS DE DIGESTORES ANAERÓBICOS	5
1.1.1. Digestores completamente agitados	5
1.1.2. Digestores de flujo pistón.....	6
1.1.3. Digestores de laguna cubierta	7
1.2. MODELOS MATEMÁTICOS EN LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA	8
1.3. HIDRODINÁMICA E INFLUENCIA DEL MEZCLADO EN LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA.....	10
2. REOLOGÍA.....	11
2.1. CONCEPTOS Y DEFINICIONES.....	11
2.1.1. Fluidos newtonianos	12
2.1.2. Fluidos no newtonianos	12
2.2. MODELOS REOLÓGICOS NO NEWTONIANOS	13
2.3. MODELOS DE REOLOGÍA EN LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA	14

3. ANÁLISIS DIMENSIONAL Y MODELADO A ESCALA.....	16
3.1. TEOREMA PI DE BUCKINGHAM	16
3.2. ADIMENSIONALIZACIÓN DE LAS ECUACIONES GOBERNANTES	17
3.3. PRINCIPIO DE SIMILITUD.....	18
4. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)	20
4.1. FUNDAMENTOS Y DESCRIPCIÓN.....	20
4.2. ESTUDIOS DE CFD APLICADOS EN LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA	21
5. VELOCIMETRÍA DE IMÁGENES DE PARTÍCULAS (PIV).....	26
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA.....	29
1. CARACTERÍSTICAS DEL DIGESTOR ANAERÓBICO ORIGINAL.....	30
1.1. DIMENSIONES Y CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN.....	30
1.2. CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DEL FLUIDO DE TRABAJO DEL REACTOR ORIGINAL	31
2. SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO DEL DIGESTOR ORIGINAL.....	32
2.1. DESARROLLO DEL MODELO CFD	32
2.1.1. Ecuaciones generales del modelo de flujo y turbulencia	32
2.1.2. Supuestos.....	32
2.1.3. Modelo reológico	33
2.1.4. Código computacional	33
2.2. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL MODELO ORIGINAL	34
2.2.1. Modelo a escala.....	34
2.2.2. Fluido modelo	35
2.2.3. Descripción del equipo PIV.....	35
2.2.4. Configuración experimental del equipo PIV	37
3. ALTERNATIVAS DE OPERACIÓN MEDIANTE CFD	37

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	40
1. CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DEL FLUIDO DE TRABAJO ORIGINAL.....	40
2. SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO ORIGINAL.....	44
2.1. ESCALAMIENTO DEL REACTOR ORIGINAL.....	44
2.2. CARACTERIZACIÓN DEL FLUIDO MODELO.....	49
2.3. VALIDACIÓN DEL MODELO CFD ORIGINAL	50
3. ALTERNATIVAS DE OPERACIÓN MEDIANTE CFD	54
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	62
1. CONCLUSIONES.....	62
2. RECOMENDACIONES.....	63
BIBLIOGRAFÍA.....	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Procesos bioquímicos asociados a las diferentes poblaciones de microorganismos (Fuente: Fountoulakis et al., 2005).	4
Figura 2. Ejemplo de digestor completamente agitado (Fuente: Valle-Guadarrama <i>et al.</i> , 2009).....	6
Figura 3. Ejemplo de digestor flujo pistón.....	7
Figura 4. Ejemplo de digestor anaeróbico de laguna cubierta	8
Figura 5 . Comportamiento reológico de diferentes fluidos (Fuente: Barnes, 2000).....	13
Figura 6 . Biogás producido en un digestor de laguna cubierta con simulación CFD (Fuente: Fleming, 2002).....	22
Figura 7. Efecto del mezclado y tiempos de retención hidráulica en un digestor anaeróbico (Fuente: Karim <i>et al.</i> , 2005a)	22
Figura 8. Simulación en CFD de un digestor agitado mediante recirculación de gas con su validación mediante CARPT (Fuente: Vesvikar y Al-Dahhan, 2005).	23
Figura 9. Modelo CFD de un digestor agitado con comportamiento newtoniano y no newtoniano (Fuente: Wu y Chen, 2008).	24
Figura 10. Modelo CFD del mezclado en un digestor anaeróbico industrial (Fuente: Meroney y Colorado, 2009).....	24
Figura 11. Modelo CFD de un digestor anaeróbico con viscosidad ajustada a la ley de la potencia (Fuente: Langner, 2009).....	25
Figura 12. Campos de velocidad generados mediante PIV en un digestor anaeróbico para producción de hidrógeno (Fuente: Montante <i>et al.</i> , 2013).	27
Figura 13. Campos vectoriales de velocidad axial en un reactor de camas fluidizadas (Fuente: Reddy <i>et al.</i> , 2013).....	28
Figura 14. Mapas vectoriales de velocidad al interior de un digestor anaeróbico de circulación interna (Fuente: Wu <i>et al.</i> , 2012).	28

Figura 15. Estrategia metodológica.	29
Figura 16. Características geométricas y dimensionales del digestor original.....	30
Figura 17. Reómetro empleado en la determinación de las curvas de flujo	31
Figura 18. Histograma de calidad de malla.....	34
Figura 19. Configuraciones analizadas en CFD para mejoramiento del desempeño hidrodinámico.	38
Figura 20. Curvas reológicas experimental y ajustada a Cross, Repetición 1	41
Figura 21 . Curvas reológicas experimental y ajustada a Cross, Repetición 2.....	41
Figura 22. Curvas reológicas experimental y ajustada a Cross, Repetición 3	42
Figura 23. Resumen de las curvas de flujo del fluido de trabajo encontradas experimentalmente	43
Figura 24. Comportamiento reológico de la goma xantana al 0.05 %.....	49
Figura 25 . Viscosidades adimensionales del fluido original y el fluido modelo (goma xantana 0.05 %).....	50
Figura 26 . Comparación entre vectores de velocidad CFD (a) y PIV (b).....	51
Figura 27 . Perfiles de velocidad en X y plano XY	52
Figura 28. Comparación de las líneas de corriente entre las simulaciones CFD (a) y PIV (b).....	53
Figura 29. Vectores de velocidad en la vista lateral de las configuraciones analizadas.	55
Figura 30 . Vectores de velocidad en la vista superior de las configuraciones analizadas	56
Figura 31. Líneas de corriente en la vista superior de las configuraciones analizadas. .	57
Figura 32. Viscosidad y derivada de la viscosidad	58
Figura 33. Vista lateral de los contornos de viscosidad	59
Figura 34 . Vista superior de los contornos de viscosidad.....	60

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Características de los componentes del equipo PIV utilizado	36
Cuadro 2 . Valores de las configuraciones analizadas en CFD	39
Cuadro 3. Parámetros del modelo de Cross para las repeticiones de la reometría	40
Cuadro 4. Valores de los parámetros de escalamiento y relaciones de similitud	48
Cuadro 5. Porcentaje de espacio muerto en las configuraciones analizadas	61

TABLA DE NOMENCLATURA

Símbolo	Significado	Unidades
$\bar{D}$	Tensor de deformación	Adimensional
Eu	Número de Euler	Adimensional
$\bar{F}$	Fuerza de cuerpo	$N \cdot m^{-3}$
Fr	Número de Froude	Adimensional
G_k	Generación de k	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-3}$
G_ω	Generación de ω	$kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-2}$
I	Vector unitario	Adimensional
k	Energía cinética de turbulencia	$m^2 \cdot s^{-2}$
K	Índice de consistencia	$Pa \cdot s^n$
l	Longitud de referencia	m
$\dot{m}$	Flujo másico	$kg \cdot s^{-1}$
n	Índice de la ley de la potencia	Adimensional
P	Presión	$N \cdot m^{-2}$
P^*	Presión adimensional	Adimensional
P_0	Presión de referencia	$N \cdot m^{-2}$
Re	Número de Reynolds	Adimensional
S_k	Término fuente de k	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-3}$
S_ω	Término fuente de ω	$kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-2}$

St	Número de Strouhal	Adimensional
t	Tiempo	s
t^*	Tiempo adimensional	Adimensional
u	Velocidad en el eje	$m \cdot s^{-1}$
u^*	Velocidad adimensional en el eje x	Adimensional
$\vec{v}$	Vector de velocidad	$m \cdot s^{-1}$
v	Velocidad en el eje y	$m \cdot s^{-1}$
V	Velocidad de referencia	$m \cdot s^{-1}$
v^*	Velocidad adimensional en el eje y	Adimensional
w	Velocidad en el eje z	$m \cdot s^{-1}$
w^*	Velocidad adimensional en el eje w	Adimensional
x^*	Longitud en x adimensional	Adimensional
Y_k	Disipación de k	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-3}$
Y_ω	Disipación de ω	$kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-2}$
y^*	Longitud en y adimensional	Adimensional
z^*	Longitud en z adimensional	Adimensional
$\dot{\gamma}$	Velocidad de cizalla	s^{-1}
Γ_k	Difusividad efectiva de k	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
Γ_ω	Difusividad efectiva de ω	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
η	Viscosidad dinámica no newtoniana	Pa·s

η^*	Viscosidad dinámica adimensional	Adimensional
η_0	Viscosidad en la región newtoniana superior	Pa·s
η_0^*	Viscosidad newtoniana superior adimensional	Adimensional
η_∞	Viscosidad en la región newtoniana inferior	Pa·s
η_∞^*	Viscosidad newtoniana inferior adimensional	Adimensional
μ	Viscosidad dinámica	Pa·s
ρ	Densidad	kg·m ⁻³
$\bar{\tau}$	Esfuerzo viscoso	N·m ⁻²
τ	Tiempo de referencia	s
ω	Tasa específica de disipación	s ⁻¹

MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO HIDRODINÁMICO EN UN DIGESTOR ANAERÓBICO DE LAGUNA CUBIERTA MEDIANTE CFD

CFD MODEL FOR HYDRODYNAMIC PERFORMANCE ENHANCEMENT OF A COVERED LAGOON ANAEROBIC DIGESTER

Ricardo Adolfo Martínez García¹, Teodoro Espinosa Solares^{1,2}, Abraham Rojano Aguilar¹, Omar Reséndiz Cantera¹.

RESUMEN

La digestión anaeróbica de residuos de explotaciones pecuarias ofrece varios beneficios como son la reducción de olores y agentes patógenos, la producción de biogás y biofertilizantes. La producción de metano se ve influenciada, entre otros factores, por el desempeño hidrodinámico del digestor empleado. El objetivo de esta investigación fue desarrollar un modelo CFD de un digestor anaeróbico de laguna cubierta con su respectiva validación experimental. Adicionalmente se analizaron cuatro diferentes configuraciones del digestor original. Para tal fin, el modelo en CFD se generó con base en las características del reactor y las propiedades del fluido de trabajo. La validación experimental se realizó mediante velocimetría de imágenes de partículas en un modelo a escala del digestor original. Los resultados mostraron que al incluir la recirculación se mejora el patrón de flujo. Así, la reducción de espacio muerto original fue en el rango del 13 al 20 %. La configuración con el mejor desempeño hidrodinámico fue a una distancia de 12 m y con un ángulo de 90° respecto a la línea de entrada, y flujo másico de 4.8685 kg·s⁻¹.

Palabras clave: CFD, Digestión Anaeróbica, Reología, Escalado de digestor, Velocimetría de imágenes de partículas

ABSTRACT

Anaerobic digestion of livestock farms provides many advantages such as reduction of odor and pathogens and production of biogas and biofertilizer. Among other factors, methane production is affected by the hydrodynamic performance of the digester employed. The aim of this work was to develop and validate a CFD model of a covered lagoon anaerobic digester. Additionally, four different configurations of the original digester were analyzed. For this purpose, the CFD model was generated based on the reactor characteristics and fluid work properties. Experimental validation was performed through particle image velocimetry in a scaled-down digester model. Results show that by recirculating the material, the flow pattern improves. In this way, the original dead space was reduced by between 13 to 20 percent. The best hydrodynamic performance configuration was at 12 m and 90° with respect to the input line, and 4.8685 kg·s⁻¹ mass flux.

Keywords: CFD, Anaerobic digestion, Rheology, Scale-down digester, Particle Image Velocimetry

¹ Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del agua

² Departamento de Ingeniería Agroindustrial

INTRODUCCIÓN

La generación de energía a partir de biomasa, es una tendencia reciente que puede ser acoplada a las actividades económicamente productivas. Una de las tendencias comunes de las actividades de producción animal en Europa y en los países desarrollados en general es intensificar la producción animal que va siempre acompañada de producción de un excedente de estiércol animal, lo que representa una amenaza de contaminación considerable del medio ambiente en estas áreas, pero al mismo tiempo, representa un nicho de oportunidades para la generación de bioenergía. Generar fuentes bioenergéticas eficientemente al mismo tiempo que evitar el exceso de fertilización no sólo es importante por razones de protección del medio ambiente, sino también por razones económicas (Appels *et al.*, 2008).

La digestión anaeróbica de estiércol animal y lodos provenientes de aguas residuales, ofrece varios beneficios por la mejora de sus cualidades fertilizantes, la reducción de olores y agentes patógenos y la producción de un combustible renovable, el biogás (Lauwers *et al.*, 2013)

Rancho La Hondonada S.P.R. de R.L. de I.C. es una empresa ganadera especialista en la crianza de ganado lechero, caracterizada principalmente por la obtención de productos lácteos bajo un sistema de manejo orgánico y responsabilidad medio ambiental con el entorno. Es por esto que el manejo correcto de los residuos animales es prioritario para la empresa con el objetivo de eliminar agentes patógenos.

La empresa actualmente cuenta con cuatro digestores anaeróbicos de laguna cubierta con capacidad de 250 m³ cada uno y tasas de procesamiento de 20,000 kg diarios de estiércol, los cuales fueron puestos en marcha a partir del año 2008 y han sido operados en condiciones mesofílicas.

Dentro del programa de fortalecimiento de la empresa para la mejora de las condiciones de operación en la planta, se han implementado procesos de mejora continua que incluyen evaluaciones tecnológicas y optimización del uso de la energía en sus

instalaciones con el objetivo de reducir costos e inversiones, mejorar de la calidad de los productos y aumentar la productividad. Los resultados preliminares han mostrado que los rendimientos de biogás se encuentran por debajo de la capacidad de diseño. Dentro de los principales motivos se encuentra un deficiente desempeño hidrodinámico asociado a la sedimentación de los lodos de digestión y generación de zonas estancadas (ausencia de movimiento), indicadores de la existencia de un mezclado deficiente en el sistema.

La Dinámica de Fluidos Computacional, por sus siglas en inglés CFD (Computational Fluid Dynamics) es un método numérico y herramienta aceptada y utilizada para evaluar y optimizar los diseños de diferentes procesos sin la necesidad de incurrir en gasto del desarrollo de prototipos (Bridgeman, 2012). Así, la CFD es una alternativa para la evaluación y mejoramiento del proceso de digestión anaeróbica llevado a cabo en la empresa “Rancho La Hondonada”. La implementación de este tipo de estudio no sólo representaría la mejora de un proceso en esta empresa, sino también marcaría la pauta para la implementación de técnicas numéricas modernas como la CFD en los digestores anaeróbicos de laguna cubierta, que de acuerdo con Monroy *et al.* (2000), son el tipo más ampliamente distribuido en México para el tratamiento de los desechos pecuarios debido a los relativos bajos costos de inversión y mantenimiento.

El presente trabajo consistió en desarrollar un estudio experimental y numérico para mejorar el desempeño del digestor hidrodinámico del digestor anaeróbico original. La investigación constó de cuatro capítulos principales; primeramente se presenta la revisión de literatura que incluye los conceptos previos necesarios para el desarrollo del tema así como también los antecedentes de investigaciones realizadas por diferentes autores en los temas específicos que abordó el presente trabajo. En el capítulo de metodología se describen los procedimientos empleados en cada uno de los apartados estudiados. Posteriormente se presenta el capítulo de resultados y discusión y finalmente el apartado de conclusiones y recomendaciones.

1. OBJETIVO GENERAL

Proponer alternativas para la mejora del desempeño hidrodinámico de un digestor anaeróbico industrial de laguna cubierta a través CFD.

2. OBJETIVOS PARTICULARES

- Evaluar el desempeño hidrodinámico de un digestor anaeróbico industrial de laguna cubierta mediante CFD.
- Validar experimentalmente el modelo CFD empleando un fluido modelo, un modelo físico a escala y velocimetría de imágenes de partículas.
- Explorar mediante CFD condiciones de flujo de recirculación de efluente orientadas a reducir los espacios muertos de la configuración original del digestor.

CAPÍTULO 1. REVISIÓN DE LITERATURA

1. DIGESTIÓN ANAERÓBICA

El proceso de digestión anaeróbica es una serie de procesos combinados y complejos en los que diferentes residuos son transformados principalmente en una mezcla compuesta de metano e hidrógeno que recibe el nombre de biogás (Valle-Guadarrama et al., 2011). De acuerdo con Langner (2009), la digestión anaeróbica es un proceso microbiológico mediante el cual se convierten materiales orgánicos en componentes inorgánicos de estructura más simple, mediante la acción de diferentes microorganismos (Figura 1). En este proceso se encuentran involucrados consorcios complejos de microorganismos, incluyendo bacterias hidrolíticas, acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas, además de arqueas (Fountoulakis *et al.*, 2005).

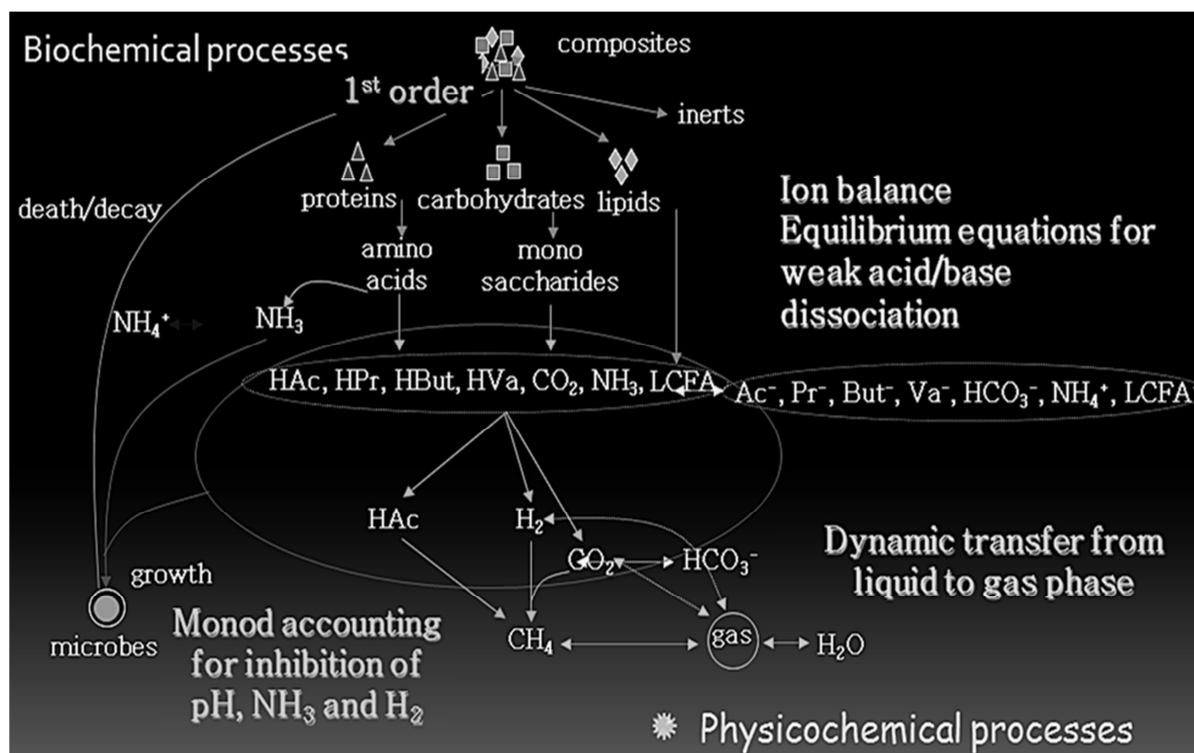


Figura 1. Procesos bioquímicos asociados a las diferentes poblaciones de microorganismos (Fuente: Fountoulakis et al., 2005).

La acción de los microorganismos depende de diferentes factores del ambiente como temperatura, pH y composición química del sustrato, entre otros. De acuerdo con Fleming (2002), los digestores anaeróbicos se encuentran influenciados por mecanismos físicos como la advección, sedimentación de los sólidos en suspensión, mezclado, formación de burbujas, flujo de calor al interior del digestor e intercambio con las paredes. La interacción de todos estos factores produce un sistema complejo al interior de los digestores.

Los productos finales de la digestión anaeróbica son biogás y efluente líquido. El efluente líquido contiene nutrientes en forma soluble, es casi inodoro y puede ser utilizado como fertilizante agrícola. El biogás se encuentra compuesto principalmente por metano (60%, dependiendo de los parámetros del proceso) y dióxido de carbono, además de pequeñas cantidades de ácido sulfhídrico, amoníaco y vapor de agua (Appels *et al.*, 2008).

1.1. TIPOS DE DIGESTORES ANAERÓBICOS

Existe una gran variedad de diseños para los digestores anaeróbicos que procesan los residuos ganaderos, sin embargo se pueden agrupar en tres principales grupos: digestores completamente agitados, flujo pistón y lagunas cubiertas.

1.1.1. Digestores completamente agitados

Se caracterizan por utilizar tanques en su mayoría cilíndricos con fondo plano, ovalado o cónico, elaborados principalmente en acero o concreto y provistos con dispositivos de agitación mecánica entre los que se pueden encontrar hélices, aspas, inyectoras de burbujas, mangueras de recirculación de lodos o gas, etc (Wu, 2011). El fluido empleado en la digestión generalmente tiene un porcentaje de sólidos totales menor al 10%. Se pueden trabajar en condiciones mesofílicas o termofílicas, con tiempos de retención de entre 10 y 20 días. Este tipo de digestores son los más complejos y demandan altos costos de inversión, operación y mantenimiento (Hilkiah Igoni *et al.*, 2008). Un ejemplo de este tipo es el digestor encontrado en la planta piloto de West Virginia State University (Figura 2).

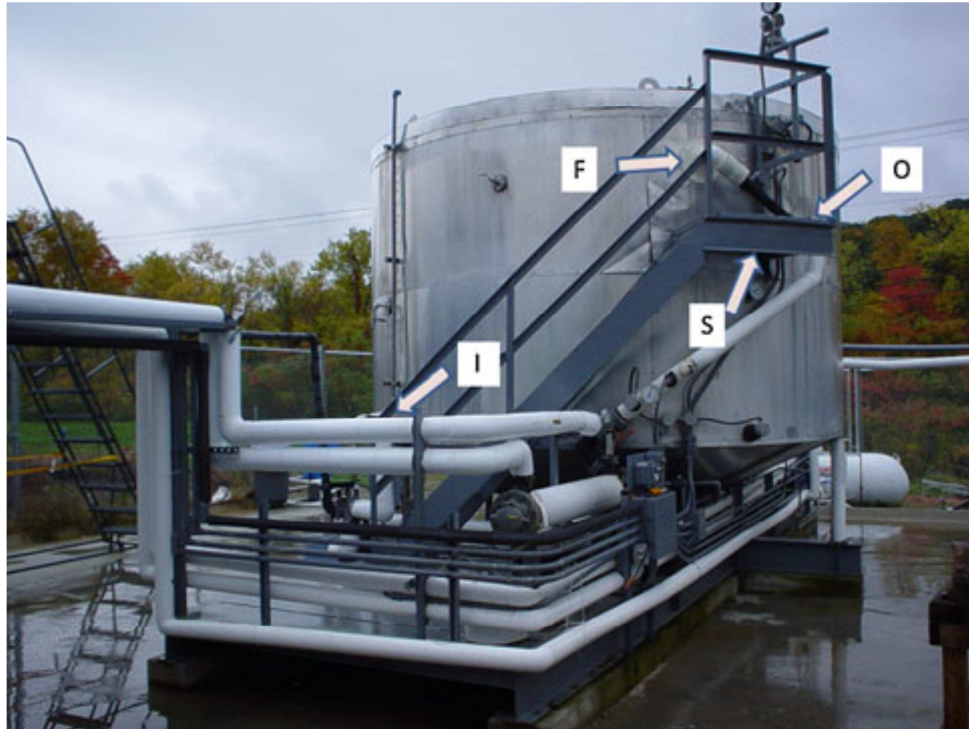


Figura 2. Ejemplo de digestor completamente agitado (Fuente: Valle-Guadarrama *et al.*, 2009)

1.1.2. Digestores de flujo pistón

Consisten comúnmente en largos canales de concreto excavados en el suelo y cuentan con una cubierta flexible que atrapa el biogás producido en su interior (Hilkiah Igoni *et al.*, 2008). El líquido a digerir entra por un extremo del canal y es extraído en el otro, generalmente no se utiliza algún sistema de mezclado, sin embargo es común que cuenten con tanques de premezclado para el líquido a introducir de tal manera que alcance la concentración deseada (10 a 15% de sólidos totales). Algunas variaciones en el diseño incluyen formas de herradura, con tubos subterráneos de acero, entre otros. A menudo son operados en condiciones mesofílicas con tiempos de retención variables entre 1 y 30 días. Son más baratos y de menor complejidad que los digestores completamente agitados (Langner, 2009). En la Figura 3 se muestra un ejemplo de este tipo de digestor.



Figura 3. Ejemplo de digestor flujo pistón

1.1.3. Digestores de laguna cubierta

Se caracterizan por contar con una cubierta flexible flotante en la parte superior que colecta el biogás producido en la laguna, a menudo la cubierta es de color negro para absorber el calor de la radiación solar y calentar el digestor. Estos tipos de digestores son los más sencillos en el manejo y los de menor costo de operación y mantenimiento (Hilkiah Igoni *et al.*, 2008). Generalmente se operan en condiciones mesofílicas o psicrófilas y son típicamente implementados para el tratamiento de aguas que resultan del lavado de establos ganaderos, por lo que su contenido de sólidos totales a menudo es menor al 6 % (Wu y Chen, 2011). En la Figura 4 se presenta un ejemplo de este tipo de digestor.



Figura 4. Ejemplo de digestor anaeróbico de laguna cubierta

1.2. MODELOS MATEMÁTICOS EN LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA

Al intervenir una gran variedad de fenómenos físicos, químicos y microbiológicos en el proceso de digestión anaeróbica, se forma un sistema complejo que no puede predecirse a través de cálculos simples. Los datos experimentales a menudo proveen información valiosa para el entendimiento y control del fenómeno, sin embargo también presentan limitaciones como el desconocimiento de diferentes parámetros o la necesidad de excesiva instrumentación para poder conocer ampliamente el estado del sistema (Fleming, 2002).

En las pasadas dos décadas se han propuesto gran cantidad de modelos para la digestión anaeróbica y se han utilizado diferentes variedades de métodos para la estimación de variables y parámetros, así como para la validación de los modelos (Donoso-Bravo *et al.*, 2011).

La mayoría de los modelos se encuentran destinados a la predicción de los parámetros y variables involucradas en los siguientes fenómenos (Appels *et al.*, 2008).

- Crecimiento y dinámica de poblaciones de microorganismos
 - Influencia de sólidos
 - Tiempos de retención hidráulica
 - Reducción de sólidos volátiles

- Diseño (forma y condiciones de operación) de los digestores y cubiertas
- Efecto de la temperatura y flujo de calor
- Mezclado e hidrodinámica

El modelado del proceso de la digestión anaeróbica surgió de la necesidad de operar eficientemente los sistemas anaeróbicos al principio de los años 70s. Los primeros modelos fueron relativamente simples debido al limitado conocimiento que existía del proceso. La investigación experimental, y el posterior incremento en la capacidad de cómputo y los sistemas de análisis, condujeron al desarrollo de modelos más detallados en años recientes (Donoso-Bravo *et al.*, 2011).

La primera generación de modelos en la digestión anaeróbica se enfocó en describir los pasos limitantes dentro del proceso, considerando que la digestión anaeróbica es un proceso de varias etapas donde un paso más lento afecta la velocidad global (Hill y Barth, 1977), sin embargo los pasos limitantes pueden ser distintos bajo diferentes condiciones de operación (Speece, 1983). Algunos autores consideraron a la metanogénesis o a la hidrólisis como la etapa crítica para la producción de biogás (Eastman y Ferguson, 1981). Esta serie de modelos se caracterizaron por haber sido sencillos y fáciles de usar, sin embargo, no fueron capaces de describir adecuadamente el desempeño del proceso, especialmente bajo condiciones de régimen no estacionario.

Una segunda generación de modelos consideró la concentración de ácidos grasos volátiles como un parámetro clave, incorporando la acidogénesis y acetogénesis de manera separada (Hill, 1982). En diferentes modelos se incluyó la presión parcial de hidrógeno como un parámetro clave regulador que afecta el potencial redox en la fase líquida y en diferentes grupos microbianos, con metanogénicos diferenciados acetoclásticos e hidrogenotróficos (Costello *et al.*, 1991; Ruzicka, 1996). En este grupo de modelos se consideró al potencial redox como una función de la presión parcial de hidrógeno que determina la producción de ácidos grasos volátiles.

Los estudios microbiológicos posteriores determinaron la aparición de otra generación de modelos (Batstone *et al.*, 2000; Kalyuzhnyi, 1997; Kalyuzhnyi y Davlyatshina, 1997; Siegrist *et al.*, 2002; Vavilin *et al.*, 1994). Este grupo de modelos incorporan procesos y

especies adicionales, cinéticas más detalladas con inhibición y escenarios con diferentes sustratos.

Como una respuesta a la necesidad de un modelo genérico y global para la digestión anaeróbica, el grupo encargado del modelado matemático del proceso de digestión anaeróbica del IWA (International Water Association) generó el modelo conocido Anaerobic Digestion Model No.1 (ADM1) con el fin de sentar una base común para posteriores desarrollos de modelos y estudios de validación con resultados comparables (Batstone *et al.*, 2002). Este modelo describe la dinámica de 24 especies e incluye 19 procesos de bioconversión, lo que lo hace un modelo con una gran cantidad de parámetros.

En años recientes, se han publicado diferentes aplicaciones basadas en el ADM1. Algunos autores aplicaron el modelo a la predicción del comportamiento en tanques agitados, mientras que otros lo utilizaron en sistemas con parámetros distribuidos (Batstone *et al.*, 2004). Algunos otros autores han incorporado procesos que fueron descartados en el modelo original.

1.3. HIDRODINÁMICA E INFLUENCIA DEL MEZCLADO EN LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA

La DA está afectada, primeramente, por su tiempo de retención en el reactor y el grado de contacto entre el sustrato de entrada y una población bacteriana viable, estos parámetros son una función del régimen hidrodinámico o mezclado en los reactores (Espinosa-Solares et al., 2008). Un mezclado apropiado es necesario para el óptimo funcionamiento y operación de los biodigestores, ya que asegura la distribución uniforme del sustrato y los microorganismos, evita la sedimentación de partículas pesadas en el fondo, impide la flotación de biomasa en la superficie y mantiene el pH y temperatura deseada para el proceso microbiológico (Terashima et al., 2009). Los patrones de flujo al interior del digestor determinan la eficiencia del biorreactor y, por lo tanto, marcan el tipo de diseño que logre las mejores condiciones para la producción de biogás (Vesvikar y Al-Dahhan, 2005).

Joubert y Britz (1987) determinaron que el rendimiento de obtención de metano puede ser optimizado mediante el mezclado del fluido de trabajo a través de la recirculación del efluente en un digestor anaeróbico híbrido. Grobicki y Stuckey (1992) encontraron que el espacio muerto en un digestor anaeróbico de platos puede ser determinado mediante el análisis de las distribuciones de los tiempos de residencia (RTD), parámetro que indica el nivel de mezclado en este tipo de digestores. Collivignarelli y Bina (1993) reportaron que existe una relación directa entre el volumen de espacio muerto y el nivel de mezclado en digestores anaeróbicos, además mencionan que existe una relación directa entre la cantidad de sólidos en las aguas residuales y el porcentaje de espacio muerto en los reactores.

En el trabajo elaborado por Karim *et al.* (2005a) se evaluaron los rendimientos de metano en función de diferentes técnicas de mezclado y cantidad de sólidos en los lodos digeridos; los resultados mostraron que los rendimientos de biogás fueron de 29% , 22% y 15 % mayores para agitación por recirculación de lodos, agitación mecánica y recirculación de gas, respectivamente, comparados con la cantidad de gas obtenida sin mezclado; por otra parte, reportaron que existe una relación directa entre la cantidad de sólidos y la sedimentación de sólidos, reflejándose en la disminución en los rendimientos de biogás. Kaparaju *et al.* (2008) encontraron que a moderada intensidad y periodos intermitentes de mezclado se obtienen mayores rendimientos en la producción de metano comparado con altas y bajas intensidades de mezclado y agitación continua.

2. REOLOGÍA

2.1. CONCEPTOS Y DEFINICIONES

La reología es la parte de la física que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir, siendo una rama de la mecánica de medios continuos. Una de las metas más importantes en reología es encontrar ecuaciones constitutivas para modelar el comportamiento de los materiales, principalmente de carácter tensorial (Malkin *et al.*, 2006).

Los fluidos se definen como las sustancias que se deforman de manera continua bajo la influencia de un esfuerzo cortante. Uno de los conceptos más importantes en líquidos es

la viscosidad, definida como la oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales y de acuerdo con su comportamiento bajo velocidad de cizallamiento (Ec. 1) se pueden clasificar en newtonianos y no newtonianos (Çengel y Cimbala, 2012).

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy} \quad (1)$$

2.1.1. Fluidos newtonianos

Los fluidos newtonianos presentan una relación lineal entre la magnitud del esfuerzo cortante aplicado (τ) y la velocidad de deformación o de cizalla $\dot{\gamma}$. La Ec. (2) de la ley de la viscosidad de Newton expresa dicha relación:

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (2)$$

Esta ecuación diferencial expresa que el esfuerzo cortante (τ) que produce un movimiento relativo entre capas de fluido es directamente proporcional al gradiente de velocidad establecido en la dirección normal a las superficies que se desplazan ($\dot{\gamma}$), siendo la constante de proporcionalidad, la viscosidad dinámica del fluido (μ). Para este tipo de fluidos, la viscosidad solamente depende de la temperatura y la presión (Gubert y UPC, 2010).

2.1.2. Fluidos no newtonianos

Los fluidos no newtonianos son aquellos en los que los esfuerzos de corte no se relacionan linealmente con la velocidad de cizallamiento. Para estos fluidos la viscosidad no es considerada como una constante sino como una función del gradiente de velocidad y el tiempo de aplicación del esfuerzo (Chhabra y Richardson, 2011). El modelo no newtoniano generalizado se define matemáticamente de acuerdo a la Ec. (3):

$$\tau = \eta(\dot{\gamma}) \dot{\gamma} \quad (3)$$

Donde $\eta(\dot{\gamma})$ es la viscosidad aparente y está en función de la velocidad de cizallamiento $\dot{\gamma}$. La caracterización de los fluidos no newtonianos se realiza mediante ensayos del tipo esfuerzo-velocidad de cizalla, que proporcionan un diagrama que relaciona ambas variables llamado curva de flujo, a partir de ella pueden deducirse ecuaciones matemáticas representativas de las curvas obtenidas (Barnes, 2000).

2.2. MODELOS REOLÓGICOS NO NEWTONIANOS

Los modelos reológicos son una relación matemática que permite caracterizar la naturaleza reológica de un fluido, estudiando la deformación producida a una velocidad de cizallamiento específica (Mezger, 2006).

Las relaciones entre el esfuerzo y la deformación resultantes de las pruebas experimentales se relacionan a través de las llamadas ecuaciones constitutivas. El análisis de las propiedades mecánicas del material se basa en determinados modelos idealizados cuyo comportamiento se describe por un número reducido de parámetros (Braun y Rosen, 2008). En la Figura 5 se presentan graficados los comportamientos reológicos de diferentes tipos de fluidos.

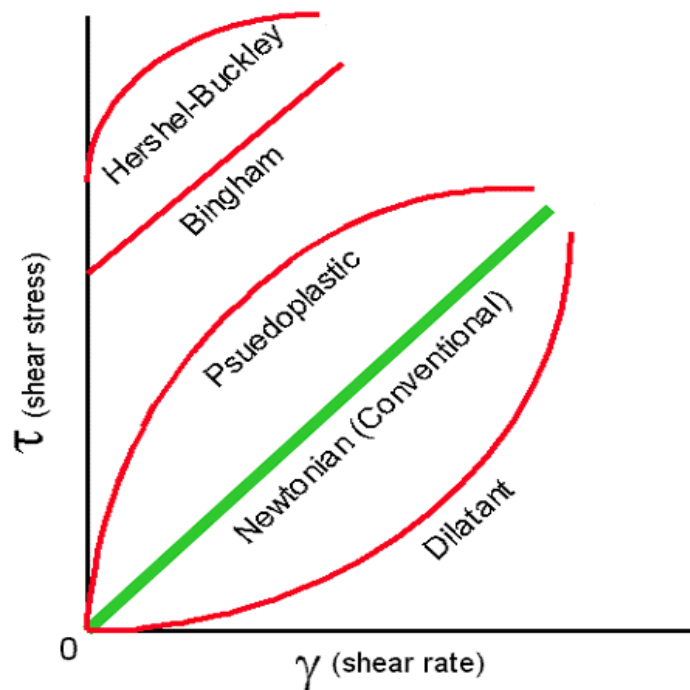


Figura 5 . Comportamiento reológico de diferentes fluidos (Fuente: Barnes, 2000)

De acuerdo con Chhabra y Richardson (2011), los fluidos no newtonianos pueden clasificarse en tres amplias clases relacionadas con los diferentes comportamientos reológicos: independientes del tiempo, dependientes del tiempo y viscoelásticos.

Los fluidos independientes del tiempo son aquellos en los que la velocidad de deformación es una función exclusivamente dependiente del esfuerzo cortante ($\tau = f(\dot{\gamma})$). En este tipo de fluidos encontramos los materiales pseudoplásticos, plásticos y dilatantes.

En los fluidos dependientes del tiempo el esfuerzo cortante se presenta como una función de la velocidad de cizallamiento y del tiempo de aplicación del esfuerzo ($\tau = f(\dot{\gamma}, t)$). Se subclasifican en Tixotrópicos y Reopécticos.

Los fluidos viscoelásticos presentan simultáneamente características viscosas y elásticas.

2.3. MODELOS DE REOLOGÍA EN LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA

La digestión anaeróbica puede ser realizada a partir de diferentes materiales como los desechos agrícolas, desechos de industrias alimentarias, aguas industriales, aguas municipales, basura y desechos sólidos, y estiércol de establos e instalaciones ganaderas (Monroy *et al.*, 2000). Todos estos materiales presentan características físico-químicas diferentes y por ende propiedades de flujo diferentes.

Desde los años 70's, diversos estudios se han realizado en diferentes materiales utilizados en la digestión anaeróbica. Chen y Hashimoto (1976), determinaron los modelos matemáticos que describen las propiedades reológicas de suspensiones de desechos aireados de aves de corral en relación con la concentración de sólidos y la temperatura; concluyeron que las suspensiones presentaban un comportamiento pseudoplástico ajustado al modelo de la ley de la potencia que indica que la viscosidad η decrece con el aumento en la velocidad de cizalla $\dot{\gamma}$ (Ecuación 4).

$$\eta = k\dot{\gamma}^{n-1} \quad (4)$$

El modelo de la ley de la potencia ha sido uno de los más utilizados en la caracterización reológica de fluidos utilizados en la digestión anaeróbica, principalmente en suspensiones de estiércol animal de cerdos (Langner, 2009), ganado bovino lechero (Achhari-Begdouri y Goodrich, 1992; El-Mashad *et al.*, 2005; Landry *et al.*, 2006; Landry *et al.*, 2004), ovino (Landry *et al.*, 2004) y avícola (Chen y Hashimoto, 1976).

Chen (1986) determinó las propiedades reológicas de las suspensiones de desechos de ganado bovino de engorda, así como el efecto de la temperatura y la concentración de sólidos totales en dichas suspensiones. Slatter (1997) realizó la caracterización reológica de los lodos provenientes de la digestión anaeróbica y realizó una correlación matemática de los parámetros involucrados. Para ambos casos, el modelo que mejor representó la viscosidad y el esfuerzo cortante en función de la velocidad de cizalla fue el modelo de Herschel-Bulkley, un modelo similar al de la ley de la potencia pero con un término para fuerza de cedencia, que es la fuerza necesaria para que el material fluya (Ec. 5).

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n \quad (5)$$

Guibaud *et al.* (2004) y Sozanski *et al.* (1997) realizaron estudios reológicos de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales y encontraron que dichas propiedades se ajustaban al modelo plástico de Bingham (Ec. 6), donde los parámetros se encontraban influenciados principalmente por la cantidad de sólidos totales y la temperatura de los sólidos.

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma}^n \quad (6)$$

Mori *et al.* (2006) encontró que los lodos activados provenientes de aguas residuales presentaron un comportamiento que se ajusta al modelo de Sisko (Ec. 7) a velocidades de cizalla intermedias y altas, donde la viscosidad tiende a un valor límite.

$$\tau = \mu_\infty \dot{\gamma} + k\dot{\gamma}^n \quad (7)$$

Eshtiaghi *et al.* (2012) sugiere que otro modelo empleado para los lodos producto de la digestión anaeróbica, puede ser el de Cross (Ec. 8). Este modelo consiste principalmente de cuatro parámetros experimentales, dos de ellos K y n que se relacionan con una región similar a la ley de la potencia, y otros dos referentes a límites en los cuales el material tiende a comportarse como fluido Newtoniano a bajas (μ_0) y a altas velocidades de cizalla (μ_∞). Sybilski (1996) es otro autor que encontró similares resultados.

$$\eta = \eta_\infty + \frac{\eta_\infty - \eta_0}{1 + K(\dot{\gamma})^n} \quad (8)$$

3. ANÁLISIS DIMENSIONAL Y MODELADO A ESCALA

El análisis dimensional es una herramienta conceptual muy utilizada en la física, la química y en la ingeniería, ayuda en la comprensión de fenómenos que involucran una combinación de diferentes variables y parámetros físicos. Es utilizada en la verificación de relaciones, cálculos, y construcción de hipótesis razonables sobre situaciones complejas que puedan ser verificadas experimentalmente (Himmelblau y Bischoff, 1992).

El análisis dimensional permite sustituir en fenómeno físico el conjunto original de parámetros dimensionales involucrados en un problema físico por otro conjunto adimensional más reducido. Estos parámetros adimensionales permiten analizar con mayor facilidad el sistema de estudio y reducir el número de experimentos necesarios para determinar el comportamiento de un sistema (Potter y Wiggert, 2002).

El análisis dimensional también es la base para realizar ensayos a escala utilizados en muchas ramas de la ingeniería como la química, aeronáutica, mecánica o ingeniería civil. A partir de estos ensayos en modelos escalados, se obtiene información sobre lo que ocurre en el fenómeno a escala real, siempre y cuando exista similitud física entre el fenómeno real y el experimental (Herranz *et al.*, 1989).

3.1. TEOREMA PI DE BUCKINGHAM

El Teorema Pi de Buckingham es un enunciado de la relación entre una función expresada en términos de parámetros dimensionales y una función expresada en términos de parámetros adimensionales. Su empleo proporciona un método simple para formar parámetros adimensionales que gobiernan un fenómeno físico. Los parámetros resultantes reciben el nombre de grupos π (Kline, 2011).

Este teorema establece lo siguiente (Çengel y Cimbala, 2012): *“Dado un problema físico en el cual el parámetro dimensional dependiente es una función de $n - 1$ parámetros dimensionales independientes no únicos (o grupos π)”*. Se puede expresar la relación entre las variables en forma funcional mediante la Ec. (9).

$$x_1 = g(x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (9)$$

Donde x_1 es el parámetro dependiente y $x_2, x_3, \dots, x_n$ son los $n - 1$ parámetros independientes. Matemáticamente, se puede expresar la relación funcional en la forma equivalente a la Ec. (10).

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (10)$$

Donde f es una función no especificada, diferente de g . El Teorema Pi de Buckingham establece que dada una relación entre n parámetros con la anterior forma, entonces los n parámetros pueden agruparse en $m = n - h$ razones adimensionales independientes, o parámetros π , lo que se expresa en forma funcional mediante la Ec. (11) o bien Ec. (12).

$$F(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n) = 0 \quad (11)$$

$$\pi_1 = G(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n) \quad (12)$$

El número h suele ser igual al número mínimo de dimensiones independientes requeridas para especificar las dimensiones de todos los parámetros $x_1, x_2, \dots, x_n$. El teorema no predice la forma funcional de F o G . La relación funcional entre parámetros π adimensionales independientes debe determinarse de manera experimental (Bun, 2000).

3.2. ADIMENSIONALIZACIÓN DE LAS ECUACIONES GOBERNANTES

El acercamiento del Teorema Pi de Buckingham para el análisis dimensional es un procedimiento rápido y fácil que produce un conjunto de parámetros adimensionales, sin embargo, no proporciona la manera de determinar si la lista inicial de parámetros independientes es completa (Himmelblau y Bischoff, 1992).

El método de adimensionalización de las ecuaciones gobernantes y de sus condiciones de frontera no experimenta esta limitación, sin embargo las ecuaciones gobernantes y las condiciones límite deben estar completamente especificadas. Las ecuaciones gobernantes y las condiciones de frontera contienen todos los parámetros independientes pertinentes y también pueden proporcionar una guía acerca de cuándo

algunos parámetros dominan claramente sobre otros, tal como cuando los efectos inerciales dominan sobre los efectos viscosos o viceversa (Astarita, 1997).

El objetivo de la adimensionalización de las ecuaciones gobernantes es su normalización, de tal manera que cada término sea de orden uno o menor, de esta manera es posible observar el orden de magnitud de cada término para una situación particular dada, y así determinar cuándo ciertos términos son despreciables con relación a otros (concepto referido como orden de magnitud o análisis de escala). El análisis del orden de magnitud también puede proporcionar información con respecto a la forma funcional de la solución de la ecuación. Los argumentos del orden de magnitud se utilizan, por ejemplo, para simplificar las ecuaciones de Navier-Stokes en el desarrollo de las ecuaciones de capa límite. Kline (2011) proporciona una discusión detallada sobre la adimensionalización de estas ecuaciones gobernantes y de sus condiciones límite.

Ruzicka (2008) proporciona una breve descripción del procedimiento:

1. Identificar las escalas del problema (por ejemplo, longitud, tiempo y velocidad). Las escalas muestran ser tales que variables dependientes adimensionales en las ecuaciones y condiciones límite son de orden uno.
2. Se adimensionaliza cada término en las ecuaciones gobernantes y condiciones de frontera utilizando las escalas del problema.
3. Se elige uno de los coeficientes de un término en cada ecuación gobernante y condiciones límite y se divide cada término en la ecuación o en la condición límite por éste.
4. Los coeficientes adimensionales resultantes de los términos en la ecuación normalizada y las condiciones límite son los parámetros independientes adimensionales relevantes. Si las ecuaciones gobernantes y condiciones límite son más completas, los resultados del análisis dimensional serán más exactos.

3.3. PRINCIPIO DE SIMILITUD

El principio de similitud hace referencia a la relación que existe entre sistemas físicos y su tamaño, siendo básico en el escalamiento de procesos físicos y químicos (Ruzicka, 2008).

Los sistemas físicos se caracterizan en general por tres cualidades: tamaño, forma y composición. El principio de similitud establece *“la configuración espacial y temporal de un sistema físico, está determinado por las relaciones de las magnitudes dentro del propio sistema y no dependen del tamaño ni de la naturaleza de las unidades en las cuales se miden esas magnitudes”* (Zufferey, 2006).

La similitud es un concepto que puede emplearse en la verificación de modelos., de acuerdo con Astarita (1997), se dice que un modelo tiene semejanza con un sistema si se verifica que ambos tienen:

Similitud geométrica: el modelo tiene la misma forma que el sistema a analizar, siendo usualmente un modelo a escala,

Similitud cinemática: las tasas de cambio del flujo en el sistema y en el modelo deben ser similares

Similitud dinámica: los cocientes formados por todas las fuerzas actuantes deben ser los mismos en el sistema y en el modelo.

Los modelos a escala se emplean en estudios complejos donde no hay soluciones analíticas o donde las simulaciones numéricas no son suficientemente confiables y/o se desea su verificación experimental. El diseño de experimentos a escala requiere de un análisis previo, ya que mientras la geometría puede ser sencillamente definida por una transformación de escala, otros parámetros como la velocidad, la presión, etc. no responderán a una ley tan sencilla. La semejanza se alcanza cuando las condiciones de ensayo son tales que los resultados son aplicables al sistema (Cheng y Cheng, 2004).

El análisis de acuerdo al principio de similitud consiste principalmente en los siguientes pasos (Rozen y Kostanyan, 2002):

1. Identificar los parámetros que describen el sistema,
2. Reducir el número de parámetros mediante técnicas de análisis dimensional.
3. Identificar cuáles de los parámetros adimensionales deben permanecer constantes entre el modelo y el sistema, para asegurar la semejanza,

4. Derivar de las relaciones de invarianza para los parámetros adimensionales de las relaciones de escala.

Hay situaciones en las que no es posible asegurar semejanza estricta, es decir, preservar todos los parámetros adimensionales: en esos casos habrá que analizar qué aspectos del modelo se quieren privilegiar y mantener la invarianza de los parámetros adimensionales correspondientes (Ruzicka, 2008).

4. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

4.1. FUNDAMENTOS Y DESCRIPCIÓN

Existen dos métodos fundamentales para diseñar y analizar sistemas ingenieriles relacionados con el flujo de fluidos: experimentación y cálculo (Budynas *et al.*, 2011). La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de sustancias (Patankar, 1980).

La CFD se basa en la solución numérica de las ecuaciones diferenciales del flujo de fluidos, conocidas como las ecuaciones de continuidad (Ec. 13) y Navier-Stokes para conservación de momento lineal en las direcciones x (Ec. 14), y (Ec. 15) y z (Ec. 16) (Çengel y Cimbala, 2012):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (13)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) + \rho g_x \quad (14)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right) + \rho g_y \quad (15)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right) + \rho g_z \quad (16)$$

Debido principalmente a su habilidad intrínseca de tomar en cuenta las condiciones de frontera y afrontar las soluciones más complejas, la CFD utiliza principalmente el método de análisis por elementos finitos para la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes. El

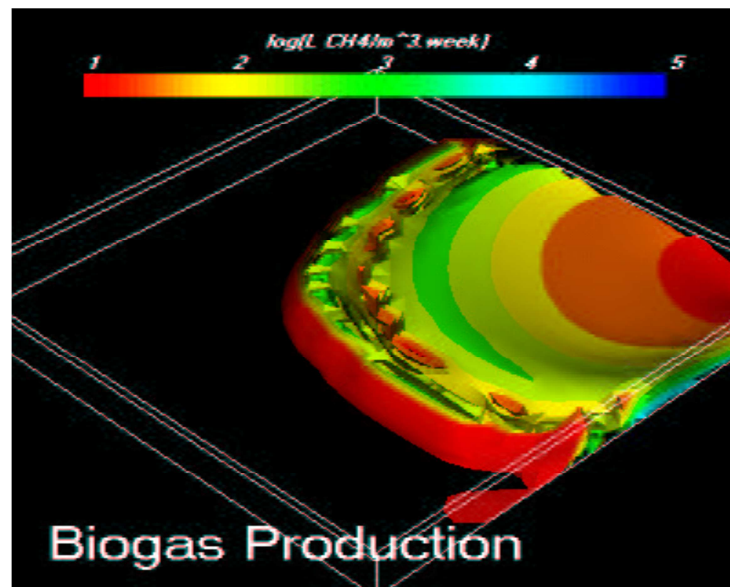
método se fundamenta en la discretización del modelo matemático por medio de nodos interrelacionados geométricamente por funciones de interpolación para consecuentemente, tomando en cuenta las condiciones iniciales y de frontera impuestas, formar un sistema de ecuaciones que son resueltas por medio de algún algoritmo iterativo (Zienkiewicz y Taylor, 2005).

Existen diferentes algoritmos de solución, sin embargo el más ampliamente usado es el método SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations, por sus siglas en inglés), el cual consiste principalmente en los siguientes puntos (Patankar, 1980):

1. Proponer un campo inicial de presión.
2. Utilizando la presión sugerida, se resuelven las ecuaciones de momento para valores de prueba de u , v y w .
3. Resolver la ecuación de corrección de presión, lo cual corrige la presión para crear el campo de velocidad que cumple con la ecuación de conservación de masa (continuidad).
4. Calcular el campo de presión mediante la adición de la corrección en la presión del paso 3, sugerido para el campo de presión del paso 1.
5. Calcular u , v y w a partir sus valores de prueba en el paso 2 y la corrección de la velocidad.
6. Tomar la presión del paso 4 como una nueva presión sugerida y regresar al paso 2, iterando hasta obtener la convergencia.

4.2. ESTUDIOS DE CFD APLICADOS EN LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA

Fleming (2002) desarrolló un modelo en 3D de un biodigestor tipo laguna cubierta (Figura 6) que incorpora los procesos de movimiento del fluido, sedimentación, mezclado de burbujas, arrastre de burbujas, advección, reacciones biológicas y transferencia de calor; el modelo fue validado usando información recolectada de los digestores a gran escala en Carolina del Norte.



**Figura 6 . Biogás producido en un digestor de laguna cubierta con simulación CFD
(Fuente: Fleming, 2002)**

Karim *et al.* (2005a) estudió el efecto del tipo de mezclado y tipos de desechos en el desempeño de la digestión anaeróbica bajo la misma potencia de mezclado y tiempo de retención hidráulica (Figura 7). Karim *et al.* (2005b) examinó el efecto del tipo de mezclado en los rendimientos de biogás producido en digestores anaeróbicos mediante CFD y su respectiva validación experimental.

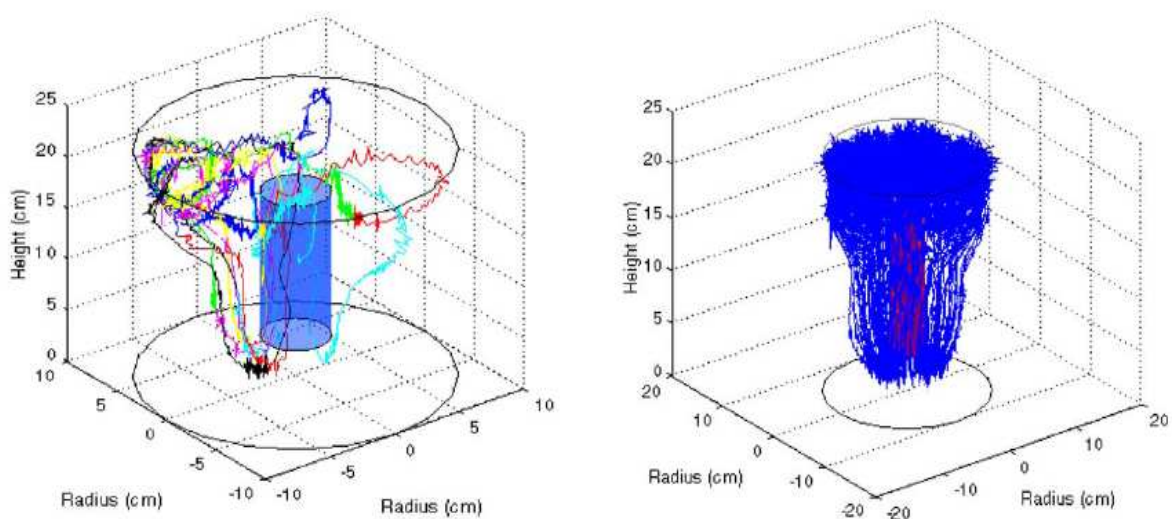


Figura 7. Efecto del mezclado y tiempos de retención hidráulica en un digestor anaeróbico (Fuente: Karim *et al.*, 2005a)

Vesvikar y Al-Dahhan (2005) desarrollaron simulaciones en CFD de un reactor provisto con agitación mediante recirculación de gas, las predicciones numéricas fueron comparadas con los resultados experimentales obtenidos de un modelo a escala operado con agua residual municipal con 5% de sólidos totales; en el trabajo consideraron como regiones muertas a aquellas con velocidades menores al 5% de la máxima velocidad. Para la validación del modelo fue utilizada la técnica CARPT y se compararon los perfiles de velocidad de las simulaciones con los datos experimentales del CARPT (Figura 8).

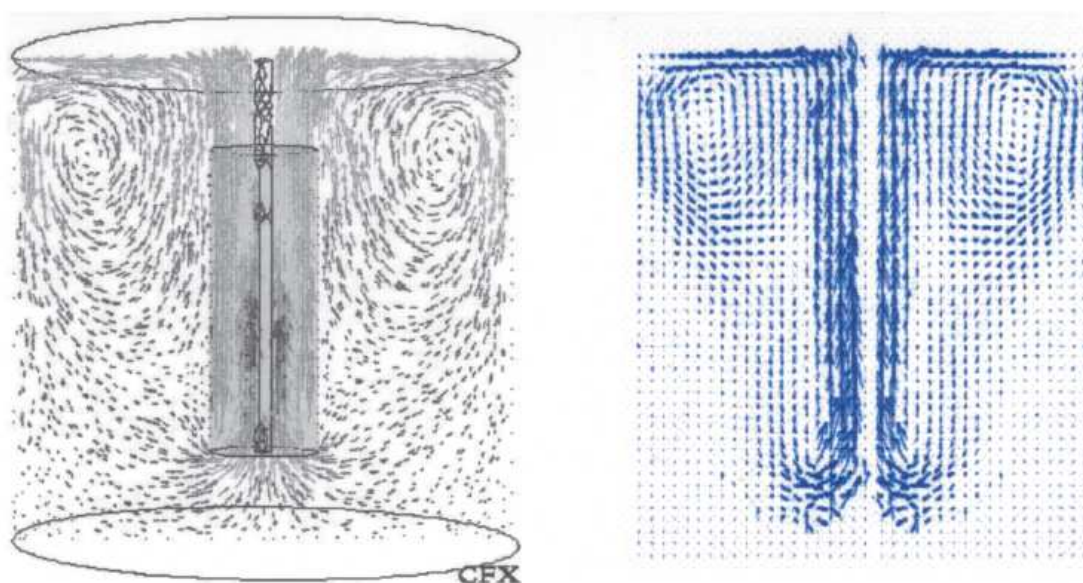


Figura 8. Simulación en CFD de un digester agitado mediante recirculación de gas con su validación mediante CARPT (Fuente: Vesvikar y Al-Dahhan, 2005).

Wu y Chen (2008) generaron un modelo en CFD del comportamiento hidrodinámico de un digester con agitación mecánica resaltando como principal característica el flujo no Newtoniano del fluido empleado, obteniendo de esta manera los consumos de potencia tanto numéricamente como experimentalmente (Figura 9).

Terashima *et.al.* (2009) desarrollaron un modelo en 3D de un digester agitado mecánicamente con un tubo de recirculación localizado en el centro; las propiedades reológicas de los desechos digeridos fueron incorporados a través de la determinación empírica de los parámetros de la ley de la potencia.

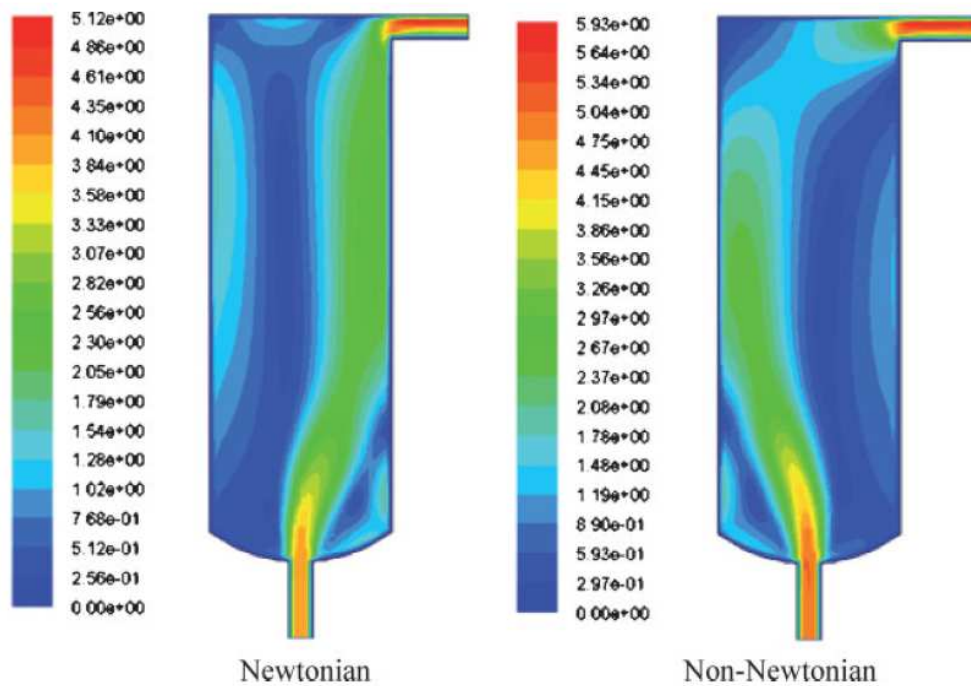


Figura 9. Modelo CFD de un digestor agitado con comportamiento newtoniano y no newtoniano (Fuente: Wu y Chen, 2008).

Meroney y Colorado (2009) simularon cuatro digestores de forma circular de tamaño industrial con tubos de recirculación de gas y determinaron la configuración que presentó el mejor mezclado de acuerdo a diferentes parámetros evaluados (Figura 10).

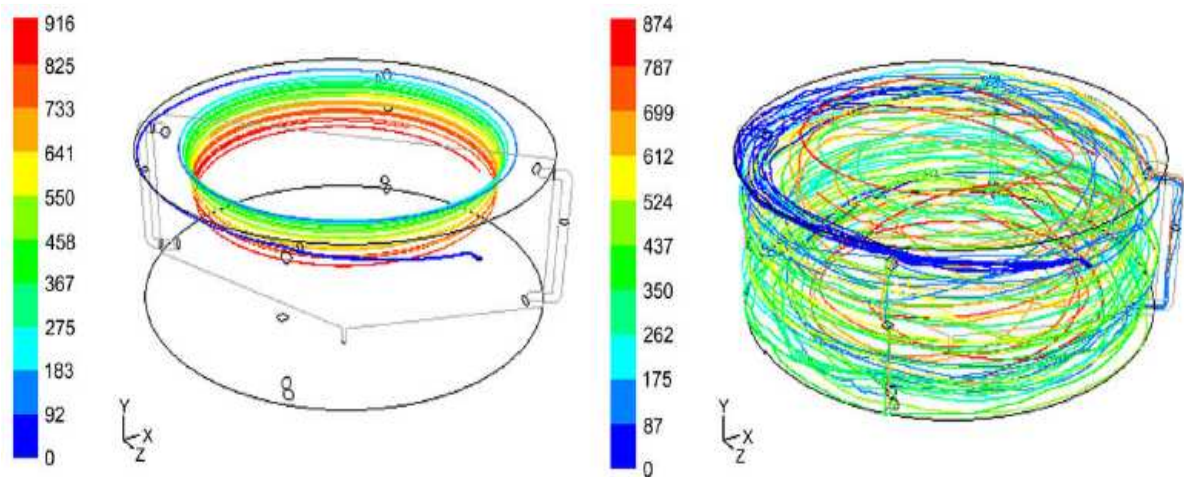


Figura 10. Modelo CFD del mezclado en un digestor anaeróbico industrial (Fuente: Meroney y Colorado, 2009).

Langner (2009) realizó el estudio reológico del fluido empleado en un biodigestor de canal abierto compuesto principalmente por estiércol de cerdo en diferentes concentraciones. Utilizó CFD para modelar el mezclado dentro de un biodigestor cilíndrico, resaltando como principal característica la viscosidad variable del fluido de trabajo, ajustándolo a la ley de la potencia (Figura 11).

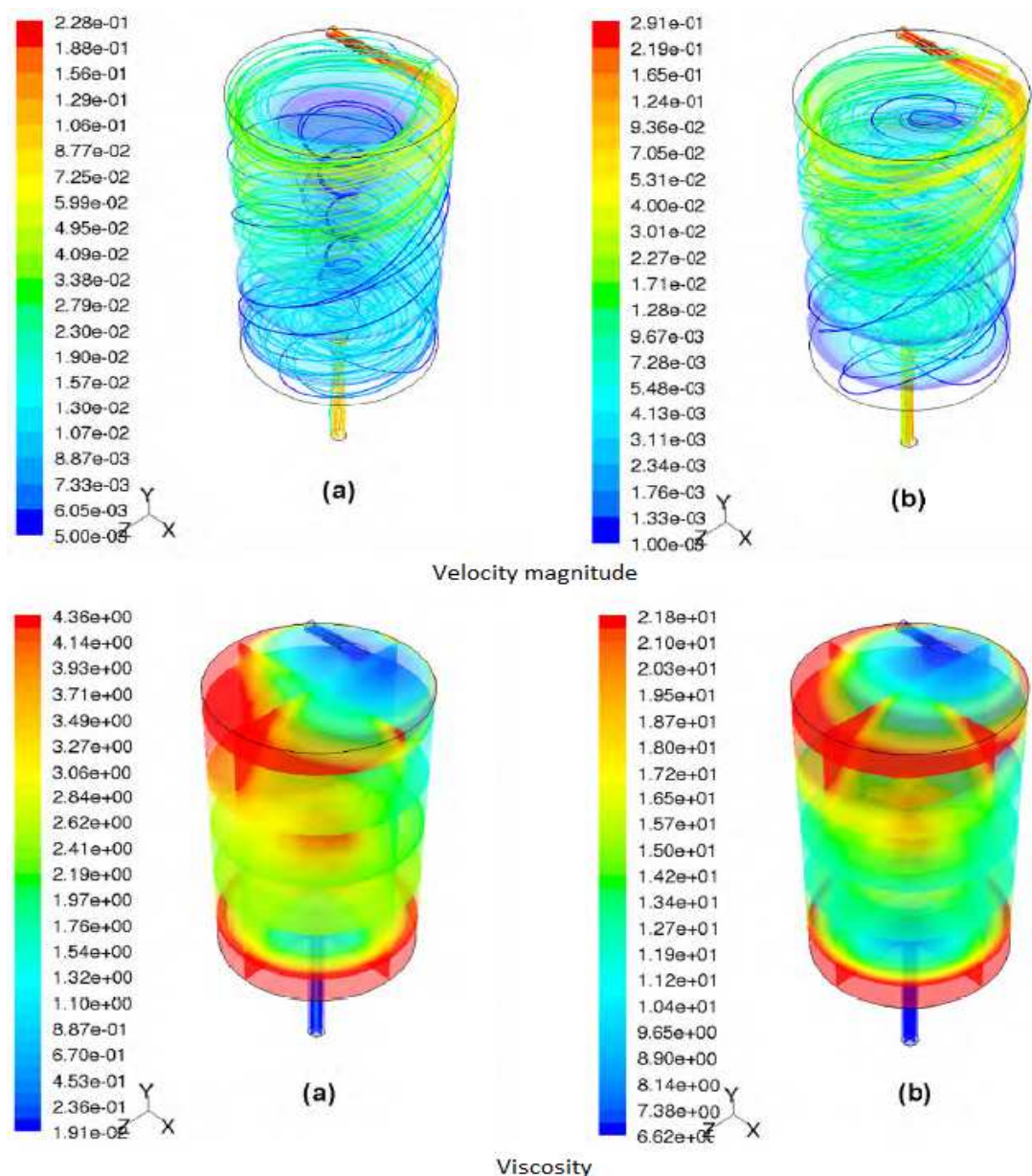


Figura 11. Modelo CFD de un digestor anaeróbico con viscosidad ajustada a la ley de la potencia (Fuente: Langner, 2009).

La investigación en el diseño de reactores usados para otros procesos, a menudo se aplica también para el diseño de digestores anaeróbicos. Por ejemplo, en la industria del papel se utilizan reactores de gran tamaño para el mezclado de fluidos no newtonianos, de manera análoga a un biodigestor anaeróbico completamente mezclado. Ford *et al.* (2006) utilizaron CFD para simular el comportamiento dinámico de pasta agitada. La pasta fue simulada como un Platico Bingham no newtoniano. Encontraron que el diseño del reactor estudiado estaba lejos del ideal debido al alto grado de canalización del sistema. Ford *et al.* (2007) continuó con este trabajo mediante el estudio del efecto de la velocidad del propulsor en el grado de canalización.

5. VELOCIMETRÍA DE IMÁGENES DE PARTÍCULAS (PIV)

La velocimetría de imágenes de partícula (PIV, por sus siglas en inglés), es una técnica instantánea, bi o tridimensional (dependiendo del equipo utilizado) y no invasiva que permite el mapeo vectorial de flujos en fluidos semi-transparentes (Buchhave, 1992).

Un equipo PIV utiliza un pulso láser que ilumina partículas reflejantes situadas en el flujo del fluido, mientras que una cámara de alta velocidad captura las imágenes de esas partículas durante su trayecto dentro del flujo, regularmente capturando pares de imágenes en una sucesión rápida en intervalos de tiempo controlados (Daigle *et al.*, 2013). Las imágenes son divididas en áreas pequeñas y rectangulares para su análisis, conocidas como áreas de interrogación. Para cada par de imágenes, las áreas de interrogación dentro de la primera imagen, son comparadas con su correspondiente área incógnita en la segunda imagen (DantecDynamics, 2006). El software identifica las partículas y calcula el tiempo en su posición dentro del área de interrogación, así, la velocidad de cada partícula es calculada mediante la Ec (17).

$$\bar{u} = u\hat{i} + v\hat{j} = \frac{\Delta x\hat{i} + \Delta y\hat{j}}{\Delta t} \quad (17)$$

Donde u y v son las componentes de la velocidad en las direcciones x y y , $\hat{i}$ y $\hat{j}$ son los vectores unitarios, Δx y Δy son los cambios en la posición x y y de la partícula y Δt es el tiempo entre imágenes.

Montante *et al.* (2013) investigaron la configuración hidrodinámica de un digestor anaeróbico agitado para producción de hidrógeno, mediante PIV y métodos de procesamiento digital de imágenes determinaron los campos de velocidad de la fase gaseosa y líquida dentro del digestor, además de la distribución de las burbujas y la formación de vórtices en las diferentes configuraciones de trabajo (Figura 12).

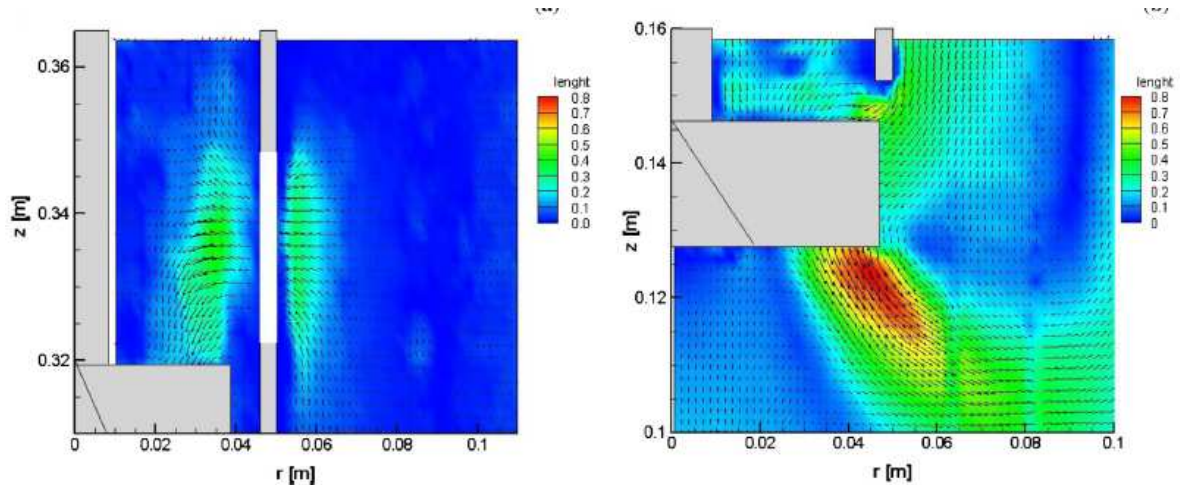


Figura 12. Campos de velocidad generados mediante PIV en un digestor anaeróbico para producción de hidrógeno (Fuente: Montante *et al.*, 2013).

Gabelle *et al.* (2013) utilizó los campos de velocidad generados mediante PIV para la determinación de las velocidades de cizalla en un tanque cilíndrico equipado con una turbina Rushton y Carbopol como fluido de trabajo.

Reddy *et al.* (2013) determinaron mediante PIV y simulación numérica directa, los campos de velocidad en un reactor de camas fluidizadas en el rango entre 51 y 759 de número de Reynolds.

Wu *et al.* (2012) investigaron los impactos de las condiciones hidrodinámicas en la digestión anaeróbica realizada en un digestor de circulación interna. Mediante PIV determinaron los campos de velocidad, las líneas de flujo y las velocidades de cizalla presentadas al interior del tanque (Figura 14).

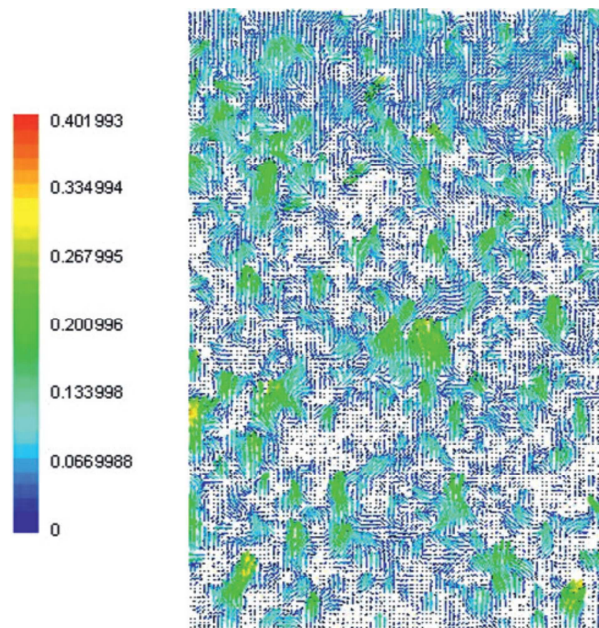


Figura 13. Campos vectoriales de velocidad axial en un reactor de camas fluidizadas (Fuente: Reddy *et al.*, 2013).

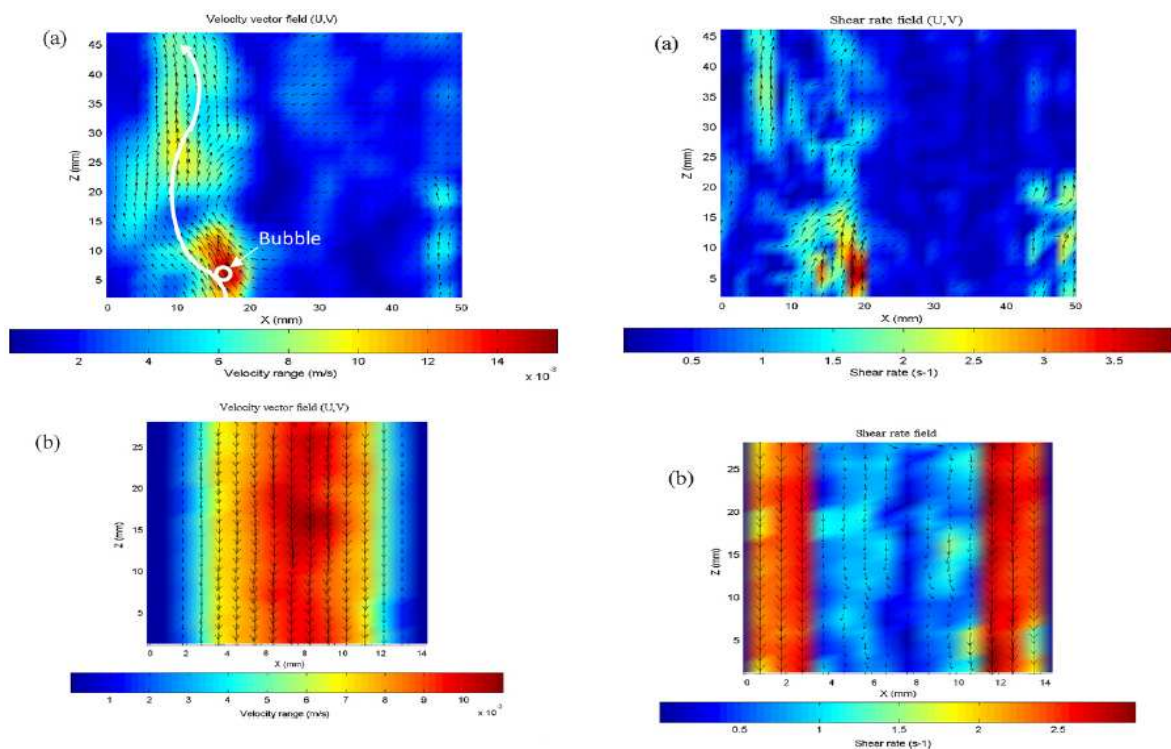


Figura 14. Mapas vectoriales de velocidad al interior de un digestor anaeróbico de circulación interna (Fuente: Wu *et al.*, 2012).

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

En la Figura 15 se presenta la estrategia metodológica seguida en este trabajo

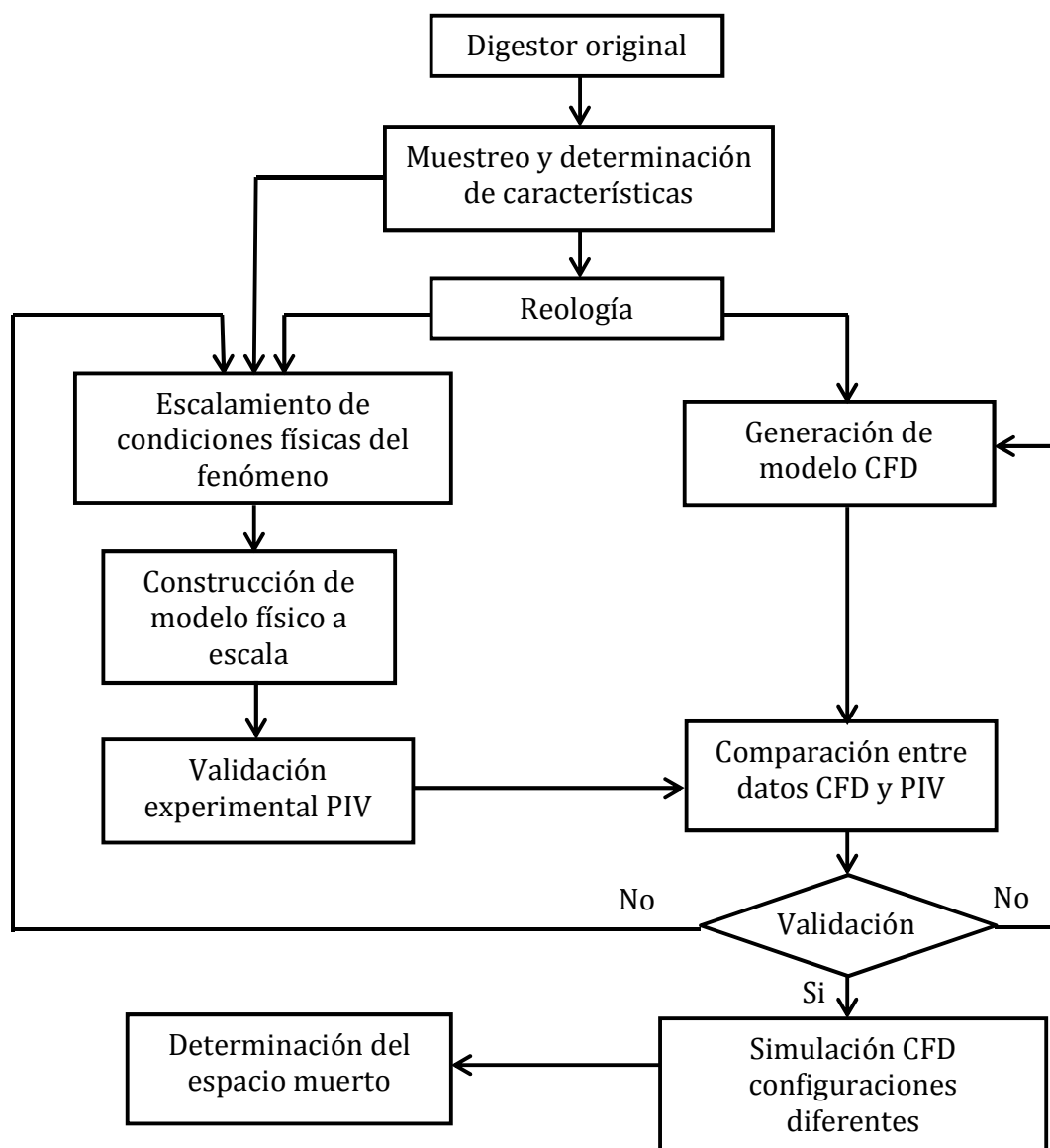


Figura 15. Estrategia metodológica.

1. CARACTERÍSTICAS DEL DIGESTOR ANAERÓBICO ORIGINAL

1.1. DIMENSIONES Y CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN

El presente trabajo se basó en un digestor anaeróbico de laguna cubierta con capacidad aproximada de 250,000 L, en el cual se realiza la digestión de una mezcla de estiércol bovino lechero y agua de lavado de la sala de ordeña bajo condiciones mesofílicas (25 °C promedio), con un 6 % de sólidos totales. En la Figura 16 se observan las medidas del reactor y sus diferentes proyecciones, las flecha verde indica las entrada del fluido y la flecha roja la salida del material del digestor. El diámetro de la tubería de entrada es de 0.15 m.

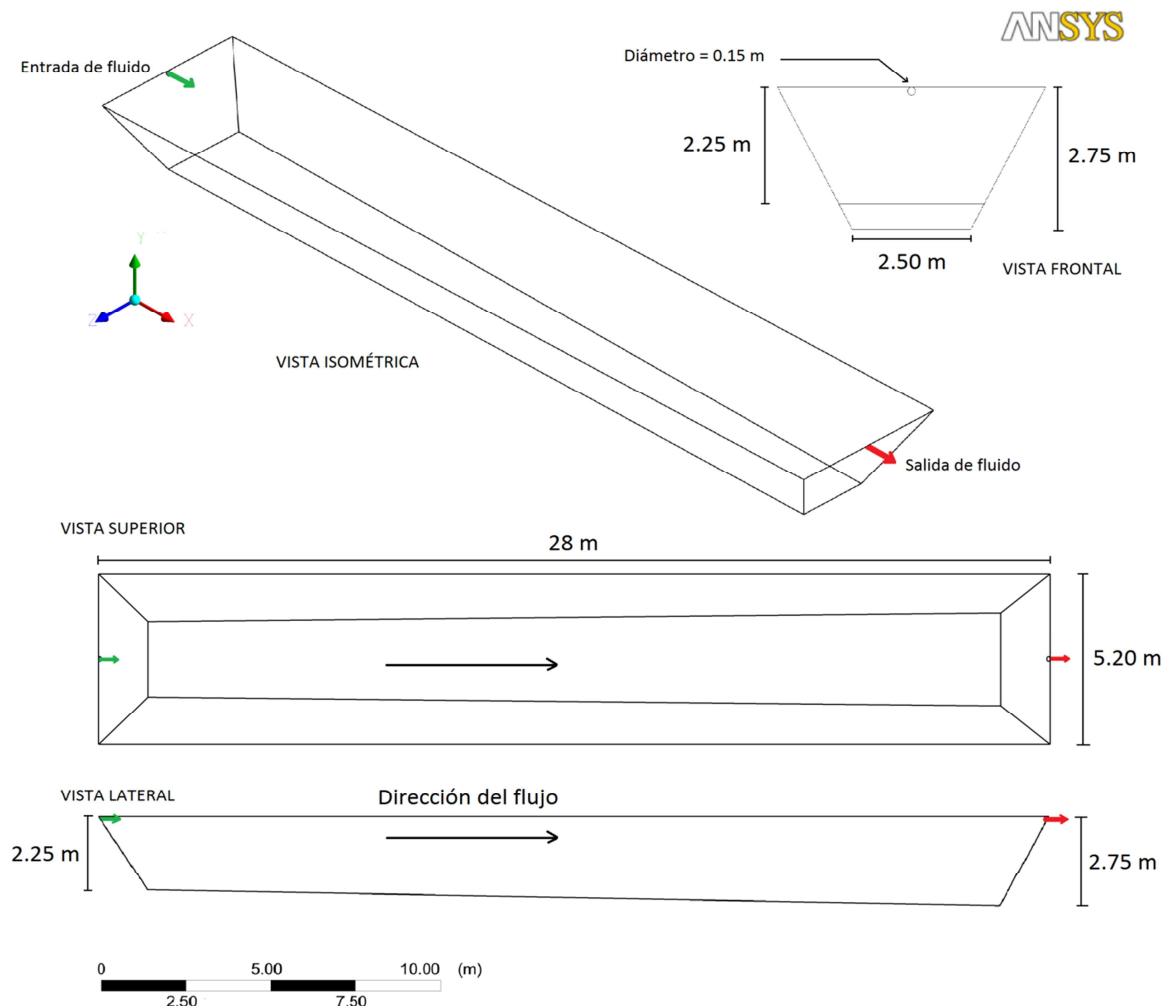


Figura 16. Características geométricas y dimensionales del digestor original

1.2. CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DEL FLUIDO DE TRABAJO DEL REACTOR ORIGINAL

Se tomaron 20 L de muestra provenientes del fluido de trabajo del digestor original. Se añadieron 3 g de azida de sodio (NaN_3) como conservador para evitar el desarrollo microbiano y por ende la modificación de las propiedades originales del fluido.

Para la obtención de las curvas de flujo, se empleó un reómetro ANTON PAAR® Modelo RHEOPLUS/32 V2.62. (Österreich, Austria), presentado en la Figura 17. Muestras de 3 mL fueron colocadas en una geometría plato-cono y se analizaron en el intervalo de velocidades de cizalla de entre 1×10^{-4} y $1 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ con un tiempo de análisis de 10 s para cada punto, se incrementó la velocidad de cizalla gradualmente en sentido ascendente y, posteriormente, en sentido descendente. La temperatura de medición se mantuvo constante a 25°C para simular las condiciones mesofílicas del digestor original. Las mediciones se realizaron por triplicado.



Figura 17. Reómetro empleado en la determinación de las curvas de flujo

2. SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO DEL DIGESTOR ORIGINAL

2.1. DESARROLLO DEL MODELO CFD

2.1.1. Ecuaciones generales del modelo de flujo y turbulencia

El modelo de flujo utilizado consiste en las ecuaciones de continuidad (Ec. 18) y Navier-Stokes para conservación de movimiento lineal (Eq. 19) en su forma vectorial en estado estacionario, flujo incompresible e isotérmico (Çengel y Cimbala, 2012).

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (18)$$

$$\rho[\nabla \cdot (\vec{v}\vec{v})] = -\nabla \cdot P + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \bar{F} \quad (19)$$

Donde $\bar{\tau}$ se encuentra definido por la Ec. (20).

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

Para los cálculos de turbulencia local, fue utilizado el modelo k- ω y fueron resueltas las ecuaciones de transporte para la energía cinética de turbulencia (k) y tasa específica de disipación (ω) (Ec. 21 y Ec. 22) (ANSYS, 2009).

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} k) = \nabla \cdot (\Gamma_k \nabla \cdot k) + G_k - Y_k + S_k \quad (21)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \omega) = \nabla \cdot (\Gamma_\omega \nabla \cdot \omega) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (22)$$

2.1.2. Supuestos

Para evaluar principalmente la parte hidrodinámica, se realizaron los siguientes supuestos:

1. El flujo y transferencia de calor se consideraron en estado estacionario.
2. Las paredes del reactor en contacto con el fluido fueron definidas como lisas. El efecto de la resistencia de la fase gaseosa no fue tomado en cuenta.
3. La densidad, conductividad térmica y capacidad calorífica se consideraron constantes.
4. No se consideraron los cambios químicos derivados de la actividad de los microorganismos.

5. Se despreciaron los efectos multifase tales como sedimentación de sólidos, formación de burbujas y flujo de biogás.

2.1.3. Modelo reológico

Se fijó al líquido de trabajo como un fluido no newtoniano. De acuerdo con ANSYS (2009), en este tipo de fluidos el esfuerzo cortante puede ser descrito en términos de la viscosidad no newtoniana η :

$$\bar{\tau} = \eta(\bar{D}) \bar{D} \quad (23)$$

Donde η es considerada como una función de la velocidad de cizalla $\dot{\gamma}$ y esta está relacionada con el segundo invariante del tensor de deformación $\bar{D}$ y es definida como (ANSYS, 2009):

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2} \bar{D} : \bar{D}} \quad (24)$$

El comportamiento reológico del líquido de trabajo se ajustó al modelo de Cross (Ec. 8) (Chhabra y Richardson, 2011):

2.1.4. Código computacional

Se utilizó el software comercial ANSYS Fluent® 13.0. Los mallados fueron realizados en el software Meshing (ANSYS 13.0). La construcción del modelo CFD puede ser descrita como sigue:

- Definición del método de solución para configuración 3D, en estado estacionario, implícito y basado en la presión. Para este efecto fue seleccionado el método SIMPLE descrito por Patankar (1980).
- Activación de los modelos de ecuación de la energía y viscosidad turbulenta $k - \omega$.
- Definición de las propiedades físicas del fluido de trabajo. Para incorporar el modelo reológico de Cross, se programó en lenguaje C estándar una función definida por el usuario ó UDF por sus siglas en inglés (User Defined Function).
- Definición de las condiciones de operación y activación de la gravedad en el modelo.

- Definición de las condiciones de frontera.
- Especificación de los controles de solución mediante el ajuste de los factores de relajación y selección de los esquemas de discretización.
- Se inicializaron los campos de flujo y se corrió el modelo numérico hasta su convergencia.

La malla constó de 961,456 elementos y 1'330,264 nodos. El volumen mínimo de celda fue de $2.8611 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ y el máximo de 0.57222 m^3 . Se realizó un refinamiento local en las regiones cercanas a las entradas de flujo donde se esperan los mayores gradientes de velocidad. El factor de crecimiento fue fijado en 1.10. Las características asociadas a la calidad de la malla se presentan en el histograma presentado en la Figura 18, donde se muestra que la mayoría de los elementos tienen calidad superior a 0.75.

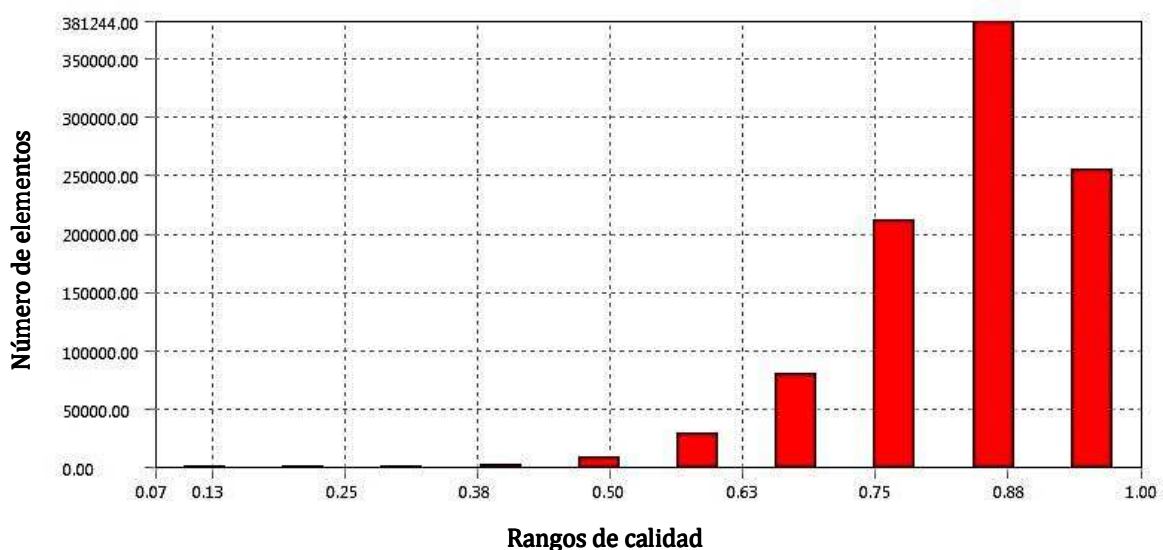


Figura 18. Histograma de calidad de malla

2.2. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL MODELO ORIGINAL

2.2.1. Modelo a escala

Para mayor confiabilidad en el escalado, se aplicaron las técnicas de adimensionalización de las ecuaciones de Navier Stokes y el teorema Pi de Buckingham para obtener los números adimensionales necesarios para el escalamiento del digestor original (Ruzicka, 2008). Adicionalmente, se utilizó el principio de similitud para encontrar la escala idónea para la experimentación y las condiciones de operación para cada una de las variables

involucradas en el modelo escalado. Ya encontradas las escalas y parámetros de escalamiento, se construyó un modelo en acrílico con el objetivo de permitir el paso de la luz láser utilizada en la validación mediante velocimetría de imágenes de partículas (PIV).

2.2.2. Fluido modelo

Las soluciones de goma xantana se comportan como un fluido no newtoniano que presentan propiedades similares a varios medios utilizados en la digestión anaeróbica (Low et al., 2012). Por este motivo, se utilizó una solución al 0.05 % de concentración para asemejar las condiciones del fluido original trasladado a la configuración escalada. Se determinaron las curvas de flujo de la solución de goma xantana mediante el mismo equipo y metodología de la reología del fluido de trabajo original, con la única diferencia de que la geometría empleada para el análisis fue de cilindros concéntricos en sustitución de plato-cono.

Para el escalamiento del fluido, se compararon las viscosidades adimensionales obtenidas mediante la ecuación (25), producto de la adimensionalización de la ecuación del modelo reológico de Cross.

$$\eta^* = \eta_{\infty}^* + \frac{\eta_{\infty}^* - \eta_0^*}{1 + K(\dot{\gamma})^n} \quad (25)$$

Donde:

$$\eta_{\infty}^* = \frac{\eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} \quad (26)$$

$$\eta_0^* = \frac{\eta_0}{\eta_0 - \eta_{\infty}} \quad (27)$$

2.2.3. Descripción del equipo PIV

Para validar el modelo CFD del reactor original, se utilizó velocimetría de imágenes de partículas. El equipo utilizado fue un PIV marca DANTEC DYNAMICS™ (Skovlunde, Denmark) modelo 2.20 18.0. En el Cuadro 1 se presentan las principales características de los dispositivos que conforman el equipo PIV.

Cuadro 1. Características de los componentes del equipo PIV utilizado

Dispositivo	Principales características
Equipo de cómputo Dell Precision T5400	Procesador Intel Xeon E5420 8 núcleos a 2.4 GHz, con tarjetas de adquisición y comunicación para equipo PIV de Dantec Dynamics.
Cámara Nikon FlowSense 2M/E	Cámara de alta resolución para equipo PIV con sensor de 1600x1200 pixeles (Fullframe)
Tarjeta de sincronización NI PCI-6602	Tarjeta de adquisición y sincronización de tiempos con el equipo PIV a través del Timer Box
Generador Láser Dual Power 65-15	Fuente de poder para la generación láser con rango de frecuencia de entre 0.01 y 15 Hz de repetición láser.
Tarjeta de adquisición de datos NI PCIe-1427	Tarjeta de adquisición de datos e imágenes de Equipo PIV
Software DynamicStudio 2.20	Software para análisis de datos adquiridos del equipo PIV. Versión 2.20 (2008)

Para la iluminación de las partículas se usó un sistema láser LITRON Nano S65-15 del tipo 4 Nd:YAG con cabeza dual. La frecuencia fundamental del láser es de 532 nm (Litron-Lasers-Inc, 2008). Un generador armónico es usado para producir un pulso de luz a 532 nm, con una potencia de salida de 65 mJ para dicha frecuencia. Las dos cabezas de láser se encuentran dentro de la unidad a lo largo del generador armónico, alineados con los espejos. Un lente se encuentra unido a la unidad para enfocar el haz de luz. Cada cabeza láser se encuentra unida con su propia fuente de poder mediante un conducto que contiene los cables eléctricos y los tubos de agua para su refrigeración. Las fuentes de poder utilizan un voltaje de 100 a 250 V AC, y son capaces de suministrar hasta 10 A. El láser cuenta con un controlador que dispara y regula la intensidad de los haces de luz.

En el sistema PIV se usó una cámara Nikon FlowSense 2ME que contiene un chip en formato 1600x1200 CCD que es controlado electrónicamente. Esto es importante para el sistema PIV debido a que permite la adquisición rápida de dos imágenes interpuestas entre sí.

La tarjeta de adquisición de datos NI PCIe-1427 permitió el procesamiento de los vectores generados. La tarjeta cuenta con tres sistemas principales, una unidad de correlación, que produce mapas vectoriales de manera rápida y eficiente; un buffer de entrada, el cual permite la lectura de las imágenes tomadas con la cámara; y una unidad de sincronización que permite la comunicación entre el sistema láser, la cámara y el software. Para el control del proceso PIV fue usado el software DynamicStudio™.

2.2.4. Configuración experimental del equipo PIV

Para suministrar el flujo volumétrico necesario, se empleó una bomba sumergible con capacidad de bombeo de $600 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, la cual se acopló a una válvula que regulaba el flujo de entrada al modelo en acrílico. Se agregaron partículas trazadoras conocidas como “semillas” con el objetivo de reflejar la luz emitida por el láser y la cámara pudiera captar su movimiento. Las partículas usadas como trazadores fueron cristales de poliamidas con un promedio de $50 \mu\text{m}$ de diámetro y densidad aproximada de $1030 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Se tomaron cien imágenes en configuración de doble exposición (double frame). El tiempo entre pulsos fue de $1 \times 10^{-2} \text{ s}$, la frecuencia de repetición del pulso láser enviado por el sincronizador fue de 2.5 Hz .

Se analizaron las imágenes obtenidas mediante el equipo PIV y se analizaron a través del Software DynamicStudio™. Para cada imagen se efectuó análisis de correlación cruzada, además de las técnicas de validación de picos y de la media móvil. Para la generación de los mapas vectoriales y las líneas de corriente se utilizaron los vectores obtenidos mediante el promedio del total de imágenes. Los datos generados de la experimentación se compararon de manera visual y a través de los perfiles de velocidad con los resultados obtenidos de la simulación CFD.

3. ALTERNATIVAS DE OPERACIÓN MEDIANTE CFD

Posterior a la validación, se procedió a realizar simulaciones CFD de cuatro diferentes configuraciones con el objetivo de mejorar el desempeño hidrodinámico del reactor original. En los modelos se simuló recirculación del material con la intención de provocar un disturbio y movimiento al interior del digestor de manera que se redujeran los espacios muertos. Las configuraciones analizadas se observan en la Figura 19 y los

valores en el Cuadro 2, las flechas en color verde indican la entrada principal de acuerdo a la configuración del digestor original, las flechas rojas indican la salida del material y las flechas azules indican las entradas de recirculación propuestas para los modelos CFD. Cabe destacar que la configuración A es la original del digestor anaeróbico que servirá como punto de referencia para las otras cuatro configuraciones.

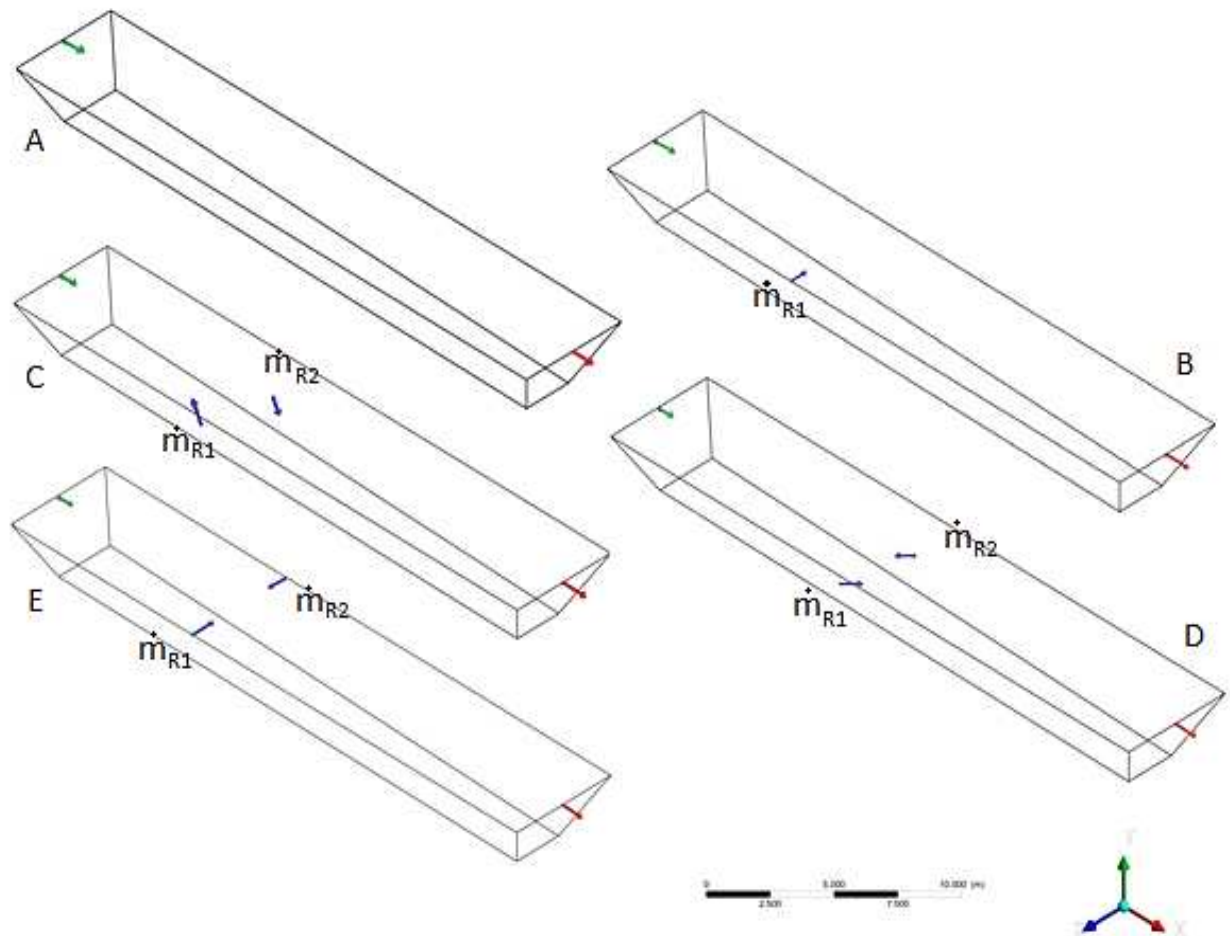


Figura 19. Configuraciones analizadas en CFD para mejoramiento del desempeño hidrodinámico.

Cuadro 2 . Valores de las configuraciones analizadas en CFD

	$\dot{m}$	$\dot{m}_{R1}$	$\dot{m}_{R2}$	$R1_{x,y,z}$	$R2_{x,y,z}$	$R1_{(i,j,k)}$	$R2_{(i,j,k)}$
A	6.0857	-	-	-	-	-	-
B	4.86855	2.4343	-	12,-0.05,2.6	-	0,0,-2.4343	-
C	4.86855	1.2138	1.2138	12,-0.75,2.6	12,-1.5,-2.6	0,0,-1.2138	0,0,1.2138
D	4.86855	1.2138	1.2138	14,-0.75,2.6	114,-1.5,-2.6	0.86,0,-0.86	-0.86,0,0.86
E	4.86855	1.2138	1.2138	12,-0.05,2.6	12,-0.05,-2.6	0,0,-1.2138	0,0,1.2138

$\dot{m}$ = flujo másico ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) $R1$ = Recirculación 1 $R2$ = Recirculación 2 x = posición en el eje x y = posición en el eje y z = posición en el eje z i = componente del vector en x j = componente del vector en y k = componente del vector en z

Para determinar los espacios muertos se utilizó como parámetro la viscosidad al interior del digestor. Debido a que la viscosidad es función de la velocidad de cizalla, y esta última es función de la velocidad de flujo, se definieron los espacios muertos de acuerdo a la viscosidad presentada en cada una de las celdas. Con la curva de flujo experimental obtenida mediante la reología, se calculó la pendiente de la tangente a la curva (Ec. 28) y mediante su representación logarítmica se obtuvo el punto de inflexión que representa el punto a partir del cual la viscosidad del material disminuye con tasas menores de velocidades de cizalla.

$$\frac{d\eta}{d\dot{\gamma}} = \frac{d}{d\dot{\gamma}} \left(\eta_{\infty} + \frac{\eta_{\infty} - \eta_0}{1 + K(\dot{\gamma})^n} \right) \quad (28)$$

Las regiones que presentaron una viscosidad mayor a la determinada se consideraron como regiones de espacio muerto. La configuración con el menor porcentaje de espacio muerto se consideró como la configuración con el mejor desempeño hidrodinámico.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DEL FLUIDO DE TRABAJO ORIGINAL

El comportamiento reológico de las tres repeticiones de la muestra del reactor original, es presentado en el Cuadro 3. Los datos muestran comportamiento no newtoniano debido a que la viscosidad varía en función de la velocidad de cizalla, al respecto, diferentes autores han reportado similares resultados para soluciones de estiércol de ganado (Achkari-Begdouri y Goodrich, 1992; El-Mashad et al., 2005). También queda de manifiesto que las curvas de flujo muestran muy alto grado de ajuste al modelo reológico de Cross ($R^2 = 0.989$), similar a lo reportado por Sybilski (1996) y Eshtiaghi et al. (2012).

Cuadro 3. Parámetros del modelo de Cross para las repeticiones de la reometría

	η_0 (Pa·s)	η_{inf} (Pa·s)	K (Pa·s ⁿ)	n (adim)	R^2 (adim)
Repetición 1	32.736	0.001053	421.3	1.062	0.982
Repetición 2	29.983	0.001065	510.6	1.153	0.995
Repetición 3	31.200	0.001050	466.1	1.108	0.992
Promedio	31.3064	0.001056	465.9	1.108	0.989

En las Figuras 20, 21 y 22, se presentan las reometrías del fluido de trabajo, mientras que en la 13 se presenta el resumen de la reometría. Se observa un plato inferior (η_{∞}) a altas velocidades de cizalla, donde el fluido tiende a comportarse como un fluido newtoniano con una viscosidad de 0.001056 Pa.s, valor muy cercano a la viscosidad del agua (0.001 Pa.s); el plato newtoniano superior (η_0) a velocidades de cizalla muy bajas corresponde a un valor de 31.3064 Pa.s. Entre ambos platos newtonianos se presenta un comportamiento acorde con el modelo de la ley de la potencia, modelo más ampliamente investigado y aceptado para soluciones de estiércol de diferentes tipos de ganado y que son empleados en la digestión anaeróbica (Achkari-Begdouri y Goodrich, 1992; Chen, 1986; Chen y Hashimoto, 1976; El-Mashad et al., 2005).

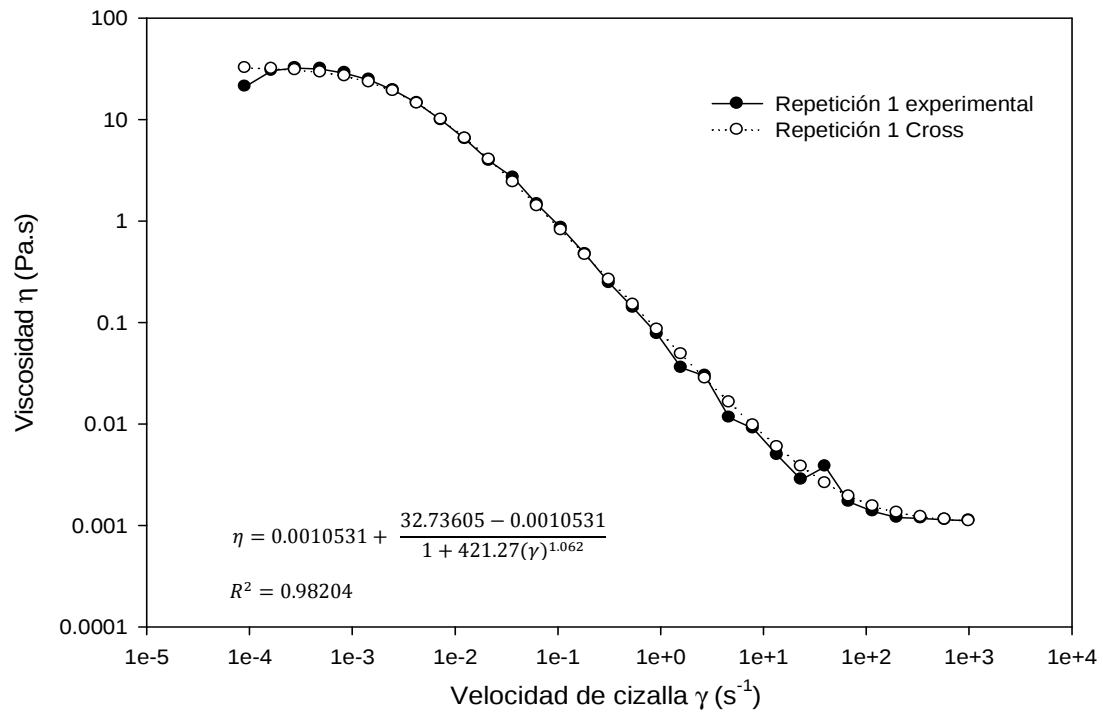


Figura 20. Curvas reológicas experimental y ajustada a Cross, Repetición 1

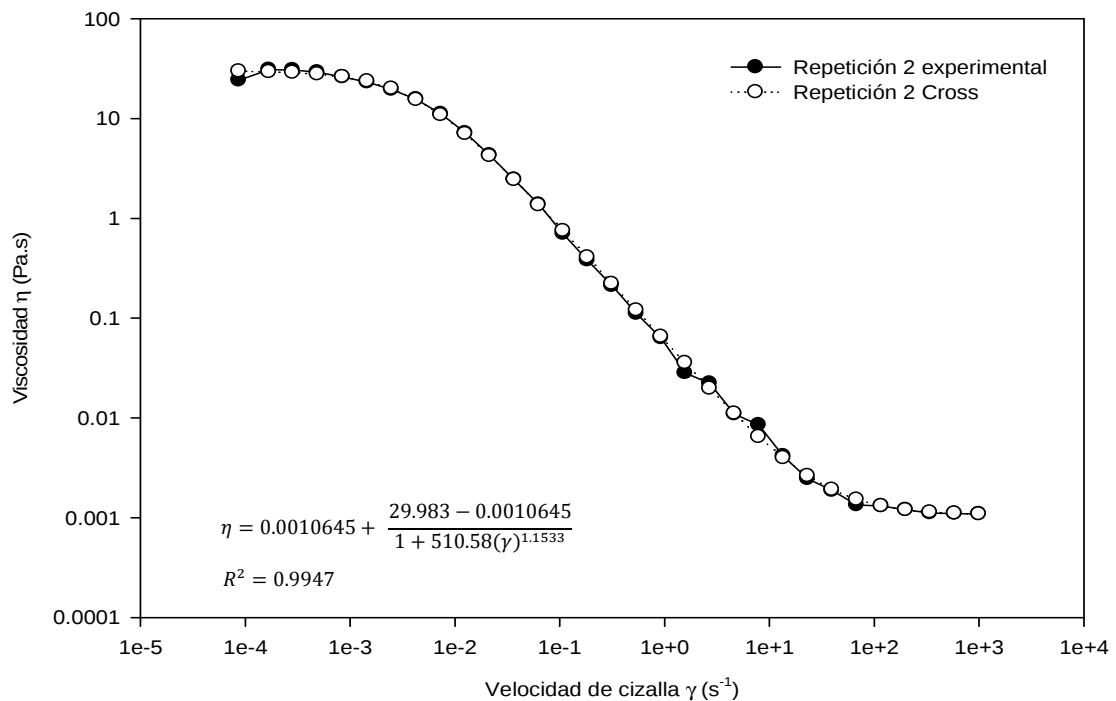


Figura 21 . Curvas reológicas experimental y ajustada a Cross, Repetición 2

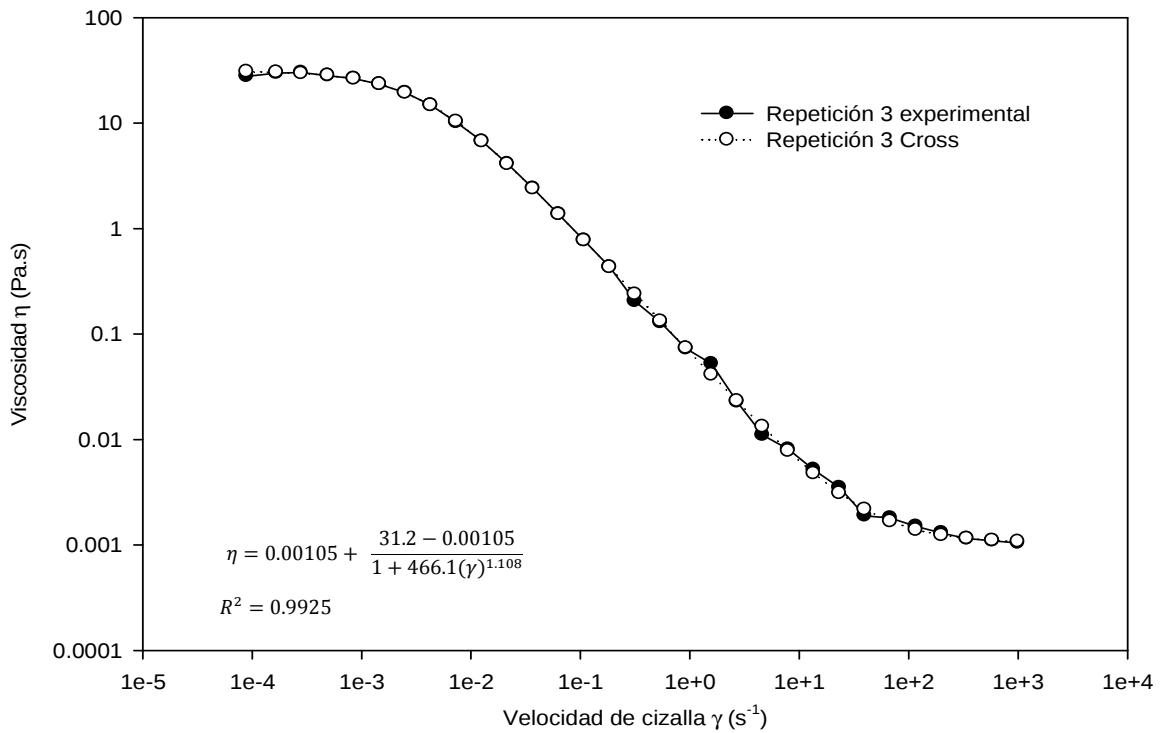


Figura 22. Curvas reológicas experimental y ajustada a Cross, Repetición 3

En los estudios de CFD en digestión anaeróbica, el modelo de la ley de la potencia ha sido ampliamente usado y se encuentra incorporado en el software computacional ANSYS Fluent (ANSYS, 2009). Los trabajos realizados por Terashima *et al.* (2009), Wu (2010), Wu y Chen (2011), Bridgeman (2012) y Yu *et al.* (2011), incorporan el modelo de la ley de la potencia para simular el comportamiento reológico del fluido de trabajo. La desventaja de aplicar el modelo es que a altas velocidades de cizalla la viscosidad tiende a cero y a bajas velocidades tiende a infinito. A través del modelo de Cross se soluciona este problema debido a que se establecen los límites a través de los platos newtonianos superior e inferior (η_0 y η_∞).

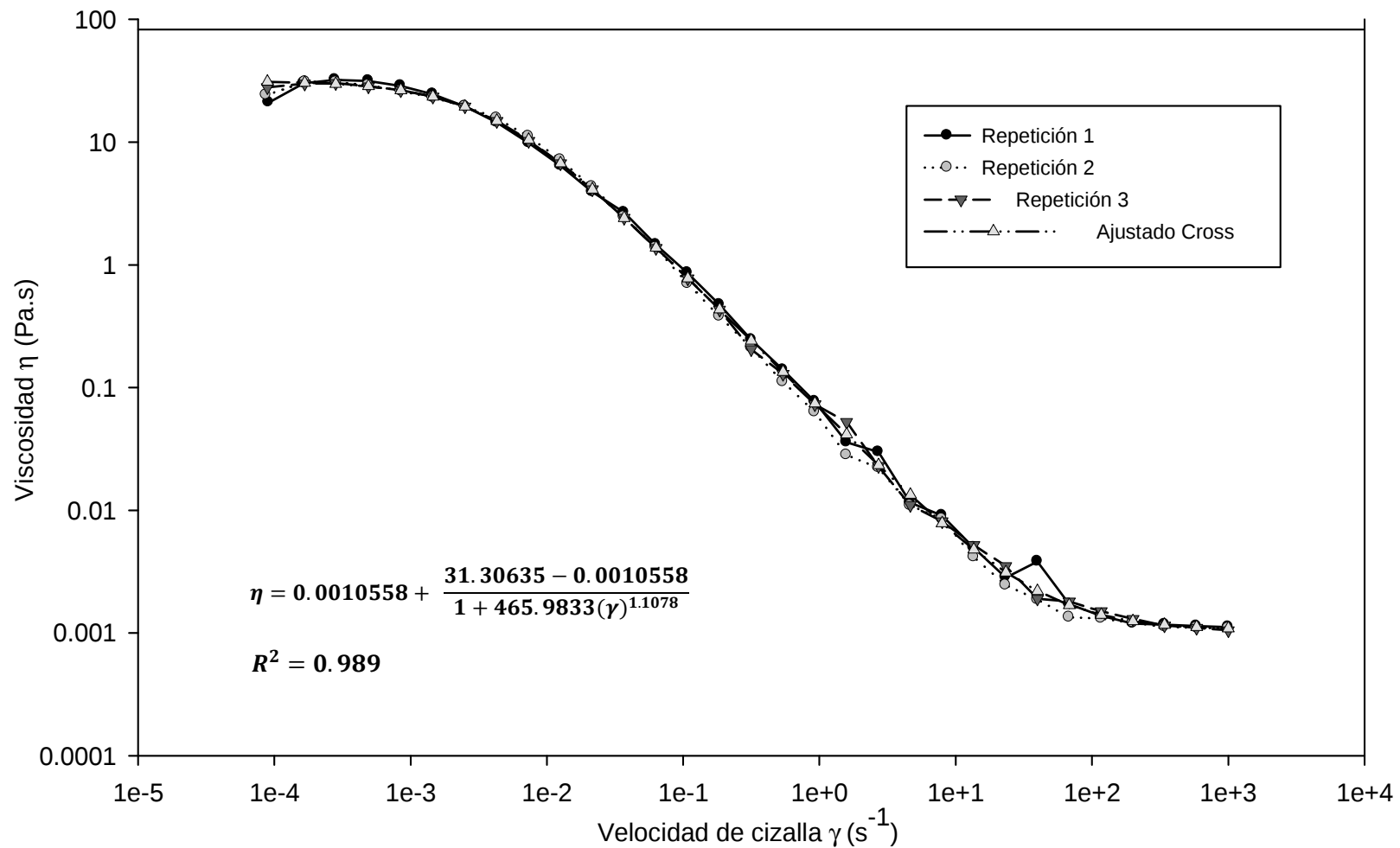


Figura 23. Resumen de las curvas de flujo del fluido de trabajo encontradas experimentalmente

2. SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO ORIGINAL

2.1. ESCALAMIENTO DEL REACTOR ORIGINAL

Las ecuaciones que describen el movimiento de un fluido son las ecuaciones de Navier-Stokes ya citadas anteriormente (Ec. 14, Ec. 15 y Ec. 16)

Para el escalamiento, fue necesario definir los parámetros y las dimensiones de escalamiento, para su obtención utilizaron dos metodologías con el propósito de asegurar la confiabilidad en los resultados: el teorema Pi de Buckingham y la adimensionalización de las ecuaciones gobernantes.

2.1.1. Teorema Pi de Buckingham

A través de las ecuaciones de Navier-Stokes se identificaron las variables físicas involucradas en el fenómeno (m): densidad (ρ), velocidad (v), viscosidad (μ), presión (P) y gravedad (g). Se descartó la presión como variable involucrada debido a que la diferencia de presión se consideró nula ya que se trató de un fluido incompresible. Se agregó como variable involucrada el diámetro de tubería (D) ya que influye directamente en el flujo volumétrico introducido. De esta manera, el fenómeno se consideró como una función de las cinco variables involucradas (Ec. 26).

$$f(v, \mu, \rho, D, g) = 0 \quad (26)$$

Se identificaron las dimensiones fundamentales involucradas y se expresaron las variables y parámetros en función de dichas dimensiones (n). Las dimensiones identificadas fueron $M = \text{masa}$, $L = \text{Longitud}$ y $T = \text{tiempo}$.

$$[v] = [L^1 T^{-1}] \quad (27)$$

$$[\mu] = [M^1 L^{-1} T^{-1}] \quad (28)$$

$$[\rho] = [M^1 L^{-3}] \quad (29)$$

$$[D] = [L^1] \quad (30)$$

$$[g] = [L^1 T^{-2}] \quad (31)$$

Se formó una matriz de coeficientes m (variables identificadas) x n (dimensiones fundamentales), a partir de la cual se generaron las ecuaciones (32), (33) y (34).

	a	b	c	d	e
	v	μ	ρ	D	g
M	0	1	1	0	0
L	1	-1	-3	1	1
T	-1	-1	0	0	-2

$$b + c = 0 \quad (32)$$

$$a - b - 3c + d + e = 0 \quad (33)$$

$$-a - b - 2e = 0 \quad (34)$$

Se eligieron μ y g como los parámetros repetitivos que aparecerán en cada número adimensional y se dio solución al sistema de ecuaciones generado con la matriz.

$$\text{Si } e = 1 \text{ y } b = -1$$

Entonces:

$$c = 1$$

$$a = 1$$

$$d = 2$$

$$\text{Si } e = 0 \text{ y } b = -1$$

Entonces:

$$c = 1$$

$$a = 1$$

$$d = 1$$

Se expresaron los números adimensionales en función de los coeficientes encontrados en la matriz.

$$\text{Para } \pi_1 = a^{-1}b^{-1}c^1d^2e^1$$

Si $a = v$, $b = \mu$, $c = \rho$, $d = D$ y $e = g$

Entonces:

$$\pi_1 = v^{-1} \mu^{-1} \rho^1 D^2 g^1$$

$$\pi_1 = \frac{\rho D^2 g}{v \mu} = \left(\frac{\rho v D}{\mu} \right) \left(\frac{D g}{v^2} \right) = \frac{Re}{Fr^2}$$

$$\text{Para } \pi_2 = a^1 b^{-1} c^1 d^1 e^0$$

Entonces:

$$\pi_2 = v^1 \mu^{-1} \rho^1 D^1 g^0$$

$$\pi_2 = \frac{v \rho D}{\mu} = Re$$

π_2 es el número de Reynolds, parámetro adimensional que relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas viscosas. π_1 está compuesto por el Reynolds y el número de Froude que relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas de la gravedad. Debido a que π_2 está en función de otro parámetro adimensional (π_1), para efectos prácticos se toma solo el Froude, independizando de esta manera los parámetros adimensionales que definirán el escalamiento.

2.1.2. Adimensionalización de las ecuaciones de Navier-Stokes

Para la generación de números adimensionales mediante este método, se utilizaron las ecuaciones (14), (15) y (16). A partir de las variables involucradas en las ecuaciones de Navier-Stokes (u, v, w, x, y, z, t) y los parámetros de referencia V (velocidad de referencia), P_0 (Presión de referencia), l (longitud de referencia) y τ (tiempo de referencia), se definieron un conjunto de variables adimensionales (Ecuaciones 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41 y 42)

$$u^* = \frac{u}{V} \tag{35}$$

$$v^* = \frac{v}{V} \quad (36)$$

$$w^* = \frac{w}{V} \quad (37)$$

$$P^* = \frac{P}{P_0} \quad (38)$$

$$x^* = \frac{x}{l} \quad (39)$$

$$y^* = \frac{y}{l} \quad (40)$$

$$z^* = \frac{z}{l} \quad (41)$$

$$t^* = \frac{t}{\tau} \quad (42)$$

Las ecuaciones de Navier-Stokes se reescribieron en términos de las variables adimensionales:

$$\left[\frac{\rho V}{\tau}\right] \frac{\partial u^*}{\partial t} + \left[\frac{\rho V^2}{l}\right] \left(u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} + w^* \frac{\partial u^*}{\partial z^*}\right) = \left[\frac{\mu V}{l^2}\right] \left(\frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial z^{*2}}\right) - \left[\frac{P_0}{l}\right] \frac{\partial P^*}{\partial x^*} \quad (43)$$

$$\left[\frac{\rho V}{\tau}\right] \frac{\partial v^*}{\partial t} + \left[\frac{\rho V^2}{l}\right] \left(u^* \frac{\partial v^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial v^*}{\partial y^*} + w^* \frac{\partial v^*}{\partial z^*}\right) = \left[\frac{\mu V}{l^2}\right] \left(\frac{\partial^2 v^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 v^*}{\partial y^{*2}} + \frac{\partial^2 v^*}{\partial z^{*2}}\right) - \left[\frac{P_0}{l}\right] \frac{\partial P^*}{\partial y^*} + \rho g \quad (44)$$

$$\left[\frac{\rho V}{\tau}\right] \frac{\partial w^*}{\partial t} + \left[\frac{\rho V^2}{l}\right] \left(u^* \frac{\partial w^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial w^*}{\partial y^*} + w^* \frac{\partial w^*}{\partial z^*}\right) = \left[\frac{\mu V}{l^2}\right] \left(\frac{\partial^2 w^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 w^*}{\partial y^{*2}} + \frac{\partial^2 w^*}{\partial z^{*2}}\right) - \left[\frac{P_0}{l}\right] \frac{\partial P^*}{\partial z^*} \quad (45)$$

Para que cualquiera de estos términos pudiera ser usado, se dividió entre el término $\rho V^2/l$, quedando finalmente:

$$\left[\frac{l}{\tau V}\right] \frac{\partial u^*}{\partial t} + \left(u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} + w^* \frac{\partial u^*}{\partial z^*}\right) = \left[\frac{\mu}{\rho V l}\right] \left(\frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial z^{*2}}\right) - \left[\frac{P_0}{\rho V^2}\right] \left(\frac{\partial P^*}{\partial x^*}\right) \quad (46)$$

$$\left[\frac{l}{\tau V}\right] \frac{\partial v^*}{\partial t} + \left(u^* \frac{\partial v^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial v^*}{\partial y^*} + w^* \frac{\partial v^*}{\partial z^*}\right) = \left[\frac{\mu}{\rho V l}\right] \left(\frac{\partial^2 v^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 v^*}{\partial y^{*2}} + \frac{\partial^2 v^*}{\partial z^{*2}}\right) - \left[\frac{P_0}{\rho V^2}\right] \left(\frac{\partial P^*}{\partial y^*}\right) + \left[\frac{g l}{V^2}\right] \quad (47)$$

$$\left[\frac{l}{\tau V} \right] \frac{\partial w^*}{\partial t} + \left(u^* \frac{\partial w^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial w^*}{\partial y^*} + w^* \frac{\partial w^*}{\partial z^*} \right) = \left[\frac{\mu}{\rho V l} \right] \left(\frac{\partial^2 w^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 w^*}{\partial y^{*2}} + \frac{\partial^2 w^*}{\partial z^{*2}} \right) - \left[\frac{P_0}{\rho V^2} \right] \frac{\partial P^*}{\partial z^*} \quad (48)$$

Los números entre corchetes son números adimensionales que representan la relación de fuerzas dominantes en el fenómeno. $l/\tau V$ es el número de Strouhal (St), $\mu/\rho V l$ es el inverso del número de Reynolds (Re). $P_0/\rho V^2$ es el número de Euler (Eu) y gl/V^2 es el inverso del cuadrado del número de Froude (Fr). El St relaciona el tiempo de flujo característico con el periodo de oscilación de dicho flujo, parámetro que hace referencia a flujos en estado no estacionario y debido a que en este trabajo se realizó bajo estado estacionario, el St no se tomó como parámetro de escalamiento. El Eu relaciona la diferencia de presión con la presión dinámica, por lo que en este trabajo no se tomó en cuenta como criterio de escalamiento debido a que se trata de un fluido incompresible donde no existen grandes cambios en su presión.

Comparando los resultados de la adimensionalización mediante el método del teorema Pi de Buckingham y la adimensionalización de las ecuaciones de Navier Stokes, se encontró que los parámetros para el escalamiento, ambos casos fueron los números de Reynolds y Froude.

En el Cuadro 4 se presentan los valores de los parámetros de escalamiento y las relaciones de similitud empleadas en el modelo escalado.

Cuadro 4. Valores de los parámetros de escalamiento y relaciones de similitud

	$\pi_1 = Re$	$\pi_2 = Fr$	l (m)	t (s)	μ (Pa·s)	ρ (kg·m ⁻³)	$\dot{m}$ (kg·s ⁻¹)	g (m·s ⁻²)
Original	74.43	0.284	28	1	0.7128	1027	6.08569	9.81
Escalado	76.17	0.289	0.56	0.14237	0.00195	1000	0.00035	9.81
Relación	0.9772	0.9827	50	7.0239	365.54	0.973709	16228.5	1

Los valores de Re y Fr para el modelo escalado no son exactamente iguales al digestor original, pero sí son valores muy cercanos que permiten una alta confiabilidad en la representación del fenómeno real.

2.2. CARACTERIZACIÓN DEL FLUIDO MODELO

La caracterización reológica de la solución de goma xantana al 0.05% (Figura 24) mostró aceptable ajuste al modelo de Cross ($R^2=0.911$).

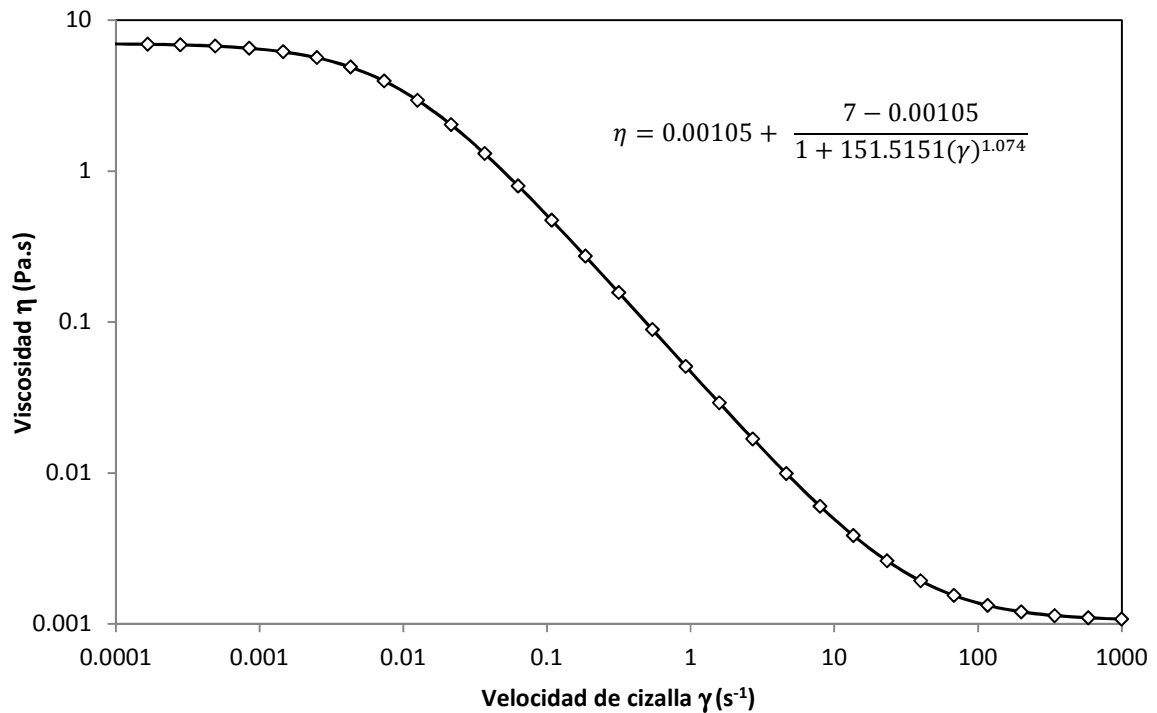


Figura 24. Comportamiento reológico de la goma xantana al 0.05 %

En la Figura 25 se comparan las viscosidades adimensionales del fluido de trabajo del digestor original y la solución de goma xantana al 0.05 %. Ambas son altamente coincidentes en la región Newtoniana superior y la región de la potencia, sin embargo para valores de alta velocidad de cizalla adimensional, los platos newtonianos inferiores difieren. Para que exista coincidencia total, la solución de goma xantana debería ser preparada con un líquido de menor viscosidad a la del agua. Sin embargo en términos prácticos es válida su utilización dado que ambos líquidos presentan el mismo modelo de comportamiento reológico, además de que son pocas las zonas con alta velocidad de cizalla.

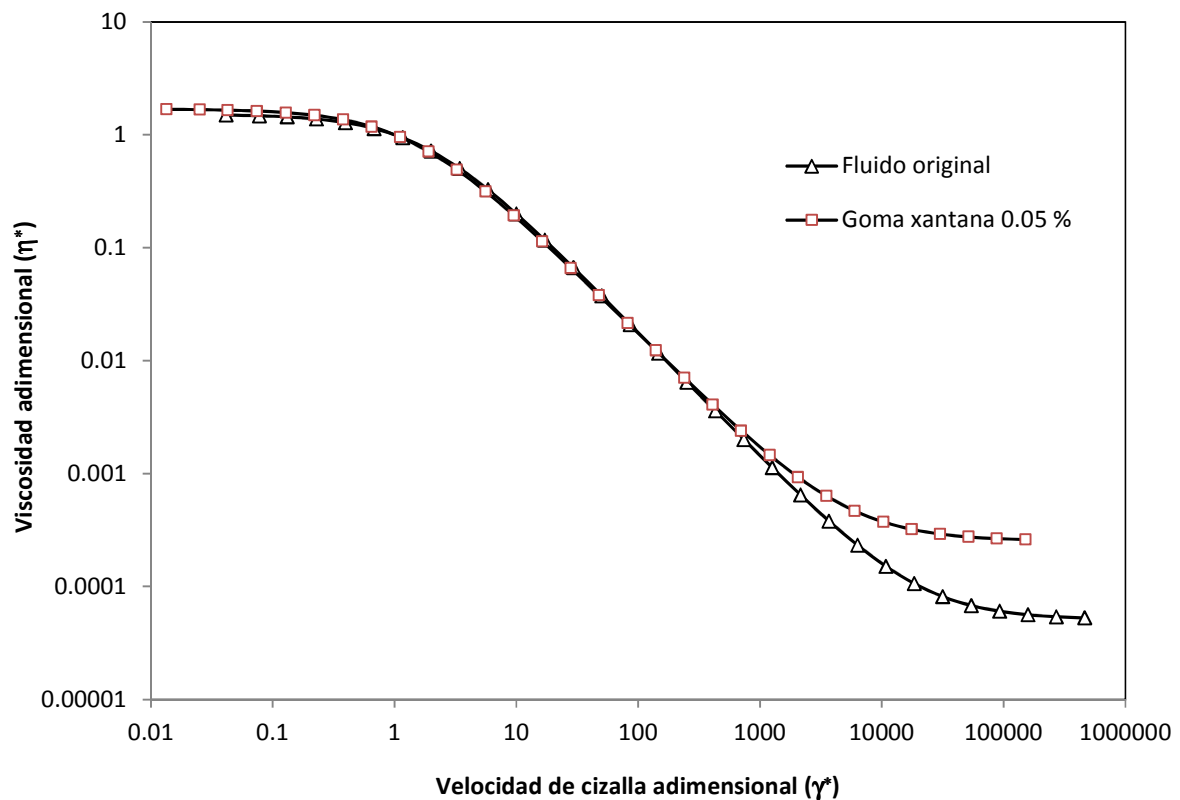


Figura 25 . Viscosidades adimensionales del fluido original y el fluido modelo (goma xantana 0.05 %)

2.3. VALIDACIÓN DEL MODELO CFD ORIGINAL

La validación del modelo CFD a través de la comparación de los datos de las simulaciones y los experimentales permite el posterior empleo de la herramienta numérica para recrear diferentes escenarios, configuraciones y geometrías del desempeño hidrodinámico en digestores anaeróbicos. En la Figura 26 se comparan visualmente los vectores de velocidad entre la simulación en CFD (a) y los datos del PIV (b). Las flechas rojas indican los vectores que presentan mayor velocidad y los de color azul los de menor velocidad.

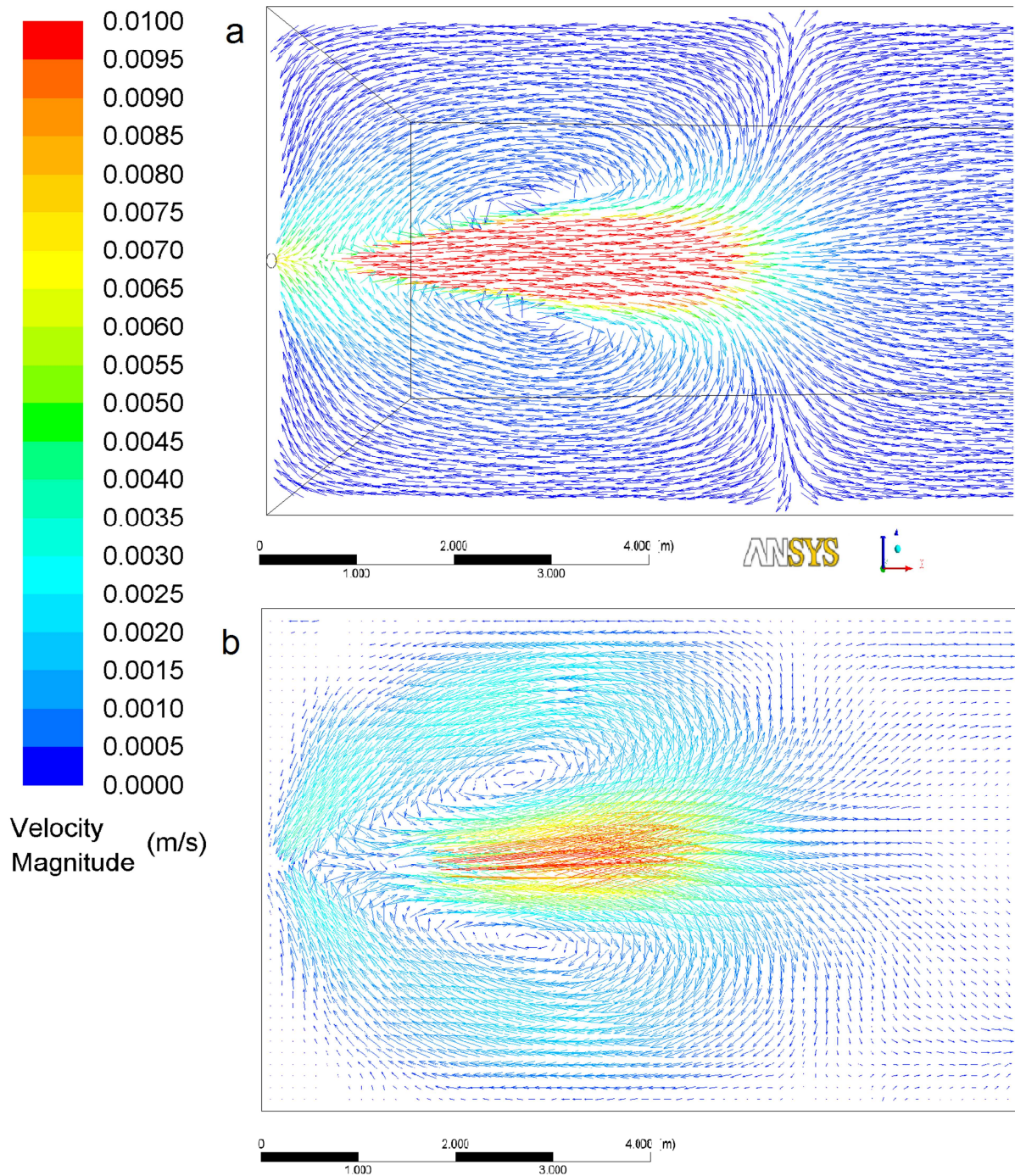


Figura 26 . Comparación entre vectores de velocidad CFD (a) y PIV (b)

La región central presenta las mayores magnitudes de velocidad (colores rojo y amarillo). También se observa la formación de dos vórtices y disminución de la velocidad en las regiones cercanas a las paredes.

Para proporcionar un punto de comparación cuantitativo, en la Figura 27 se presenta un gráfico tridimensional con las velocidades de flujo en x y el plano x, y a una profundidad de 0.6 cm en el modelo experimental (equivalente a 30 cm de profundidad en el digestor original).

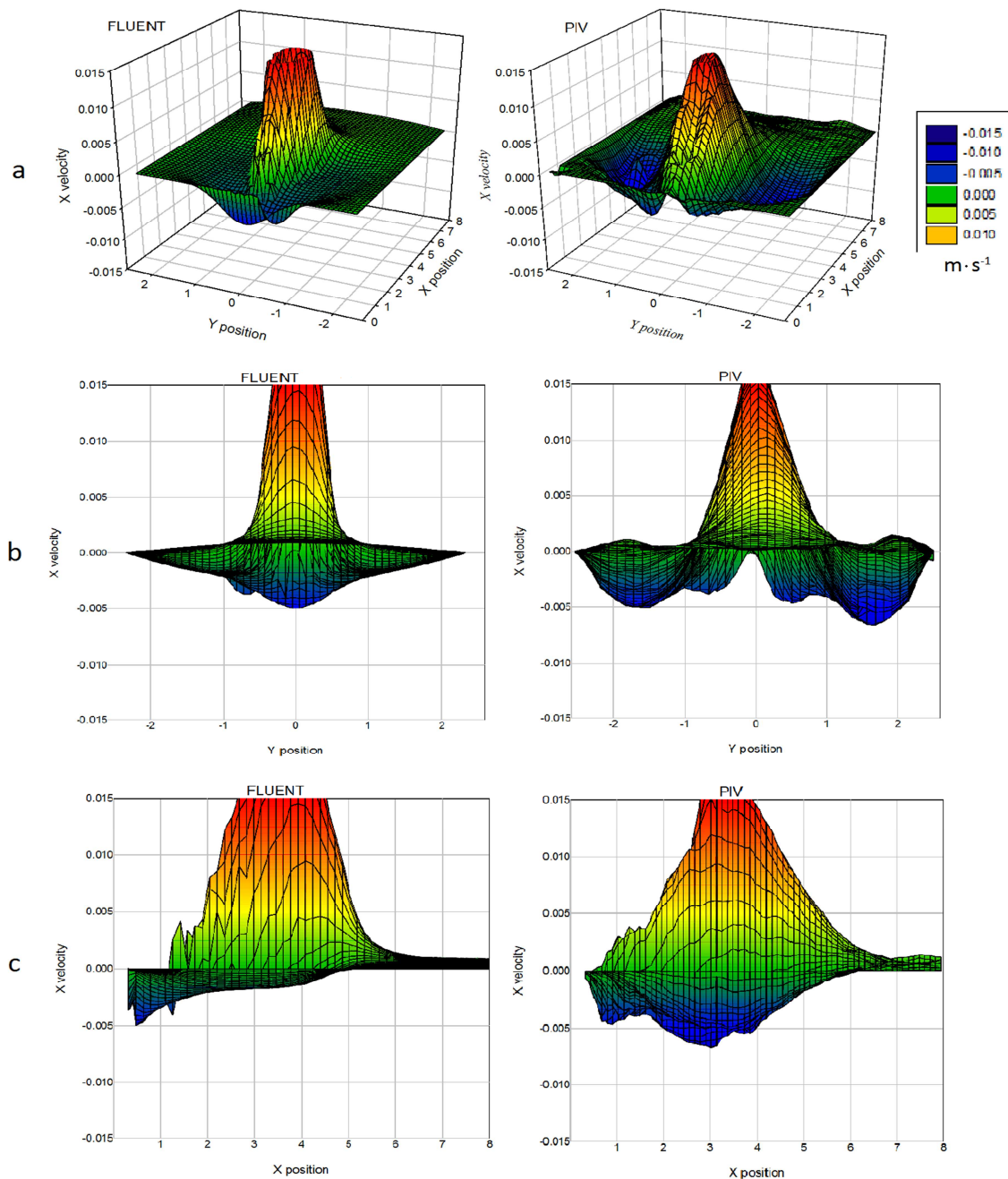


Figura 27 . Perfiles de velocidad en X y plano XY

Adicionalmente, en la Figura 28 se comparan visualmente las líneas de corriente entre las simulaciones CFD (a) y los datos generados por el PIV (b).

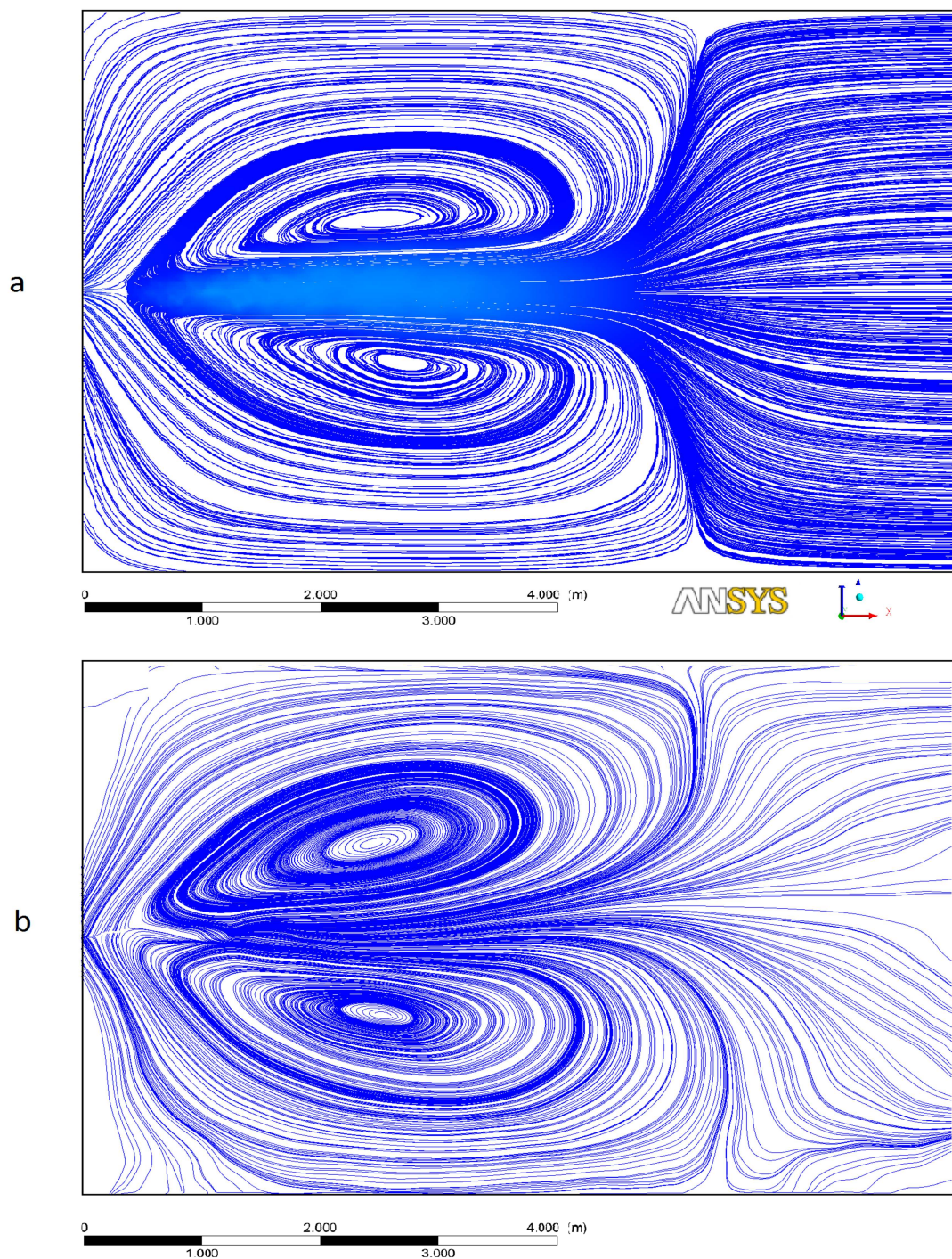


Figura 28. Comparación de las líneas de corriente entre las simulaciones CFD (a) y PIV (b)

Las Figuras 16, 17 y 18 muestran la similitud entre los perfiles de velocidad y en las líneas de corriente observados en los modelos CFD y los datos experimentales de PIV, de esta manera se puede decir que el modelo es correcto.

A pesar de que existen varios trabajos enfocados a la simulación hidrodinámica de los digestores anaeróbicos (Bridgeman, 2012; Meroney y Colorado, 2009; Wu y Chen, 2008; Wu y Chen, 2011; Yu *et al.*, 2011), pocos han validado experimentalmente los patrones de flujo. Destaca el trabajo de Vesvikar y Al-Dahhan (2005) que utilizó el método CARPT, la validación se hizo, al igual que en este trabajo, mediante una comparación cualitativa y visual de las líneas de corriente y los vectores de velocidad, además de una comparación cuantitativa de los perfiles de velocidad a lo largo de diferentes cortes en el digestor analizado. En este trabajo se hicieron los perfiles tridimensionales para evitar utilizar múltiples cortes del digestor.

Los trabajos restantes que han validado los modelos CFD, lo han hecho principalmente a través de una medida indirecta que se basa en la potencia consumida por los motores que impulsan los agitadores mecánicos en digestores completamente agitados, (Bridgeman, 2012; Terashima *et al.*, 2009; Wu y Chen, 2008; Yu *et al.*, 2011).

3. ALTERNATIVAS DE OPERACIÓN MEDIANTE CFD

Una vez validado el modelo, se realizaron adicionalmente cuatro modelos CFD con diferentes configuraciones de recirculación del fluido de trabajo con el objetivo de mejorar el desempeño hidrodinámico. Las Figuras 29 y 30 muestran los vectores de velocidad en las cinco configuraciones analizadas para la vistas lateral (Figura 29) y superior (Figura 30).

En las cinco simulaciones se observa la formación de dos vórtices producto de la velocidad de flujo a la entrada, alrededor de estos vórtices la velocidad del flujo es baja. Este tipo de vórtices también fueron reportados por Wu (2011) en el que investigó el flujo en un digestor anaeróbico de laguna cubierta donde se formó un vórtice en la parte central de la laguna. Los efectos reológicos del material ajustado al modelo de Cross quedan de manifiesto en las características de los flujos, reflejado principalmente en las

entradas, tanto en la principal como en las de recirculación, ya que las velocidades se incrementan debido a la disminución de la viscosidad del fluido de trabajo al ser sometido a mayores velocidades de cizalla, mientras que en las zonas alejadas de las regiones de entrada, la velocidad es considerablemente baja, este efecto se observa en las figuras donde los vectores azules son los de menor velocidad, mientras que los de color rojo presentan mayor velocidad de flujo.

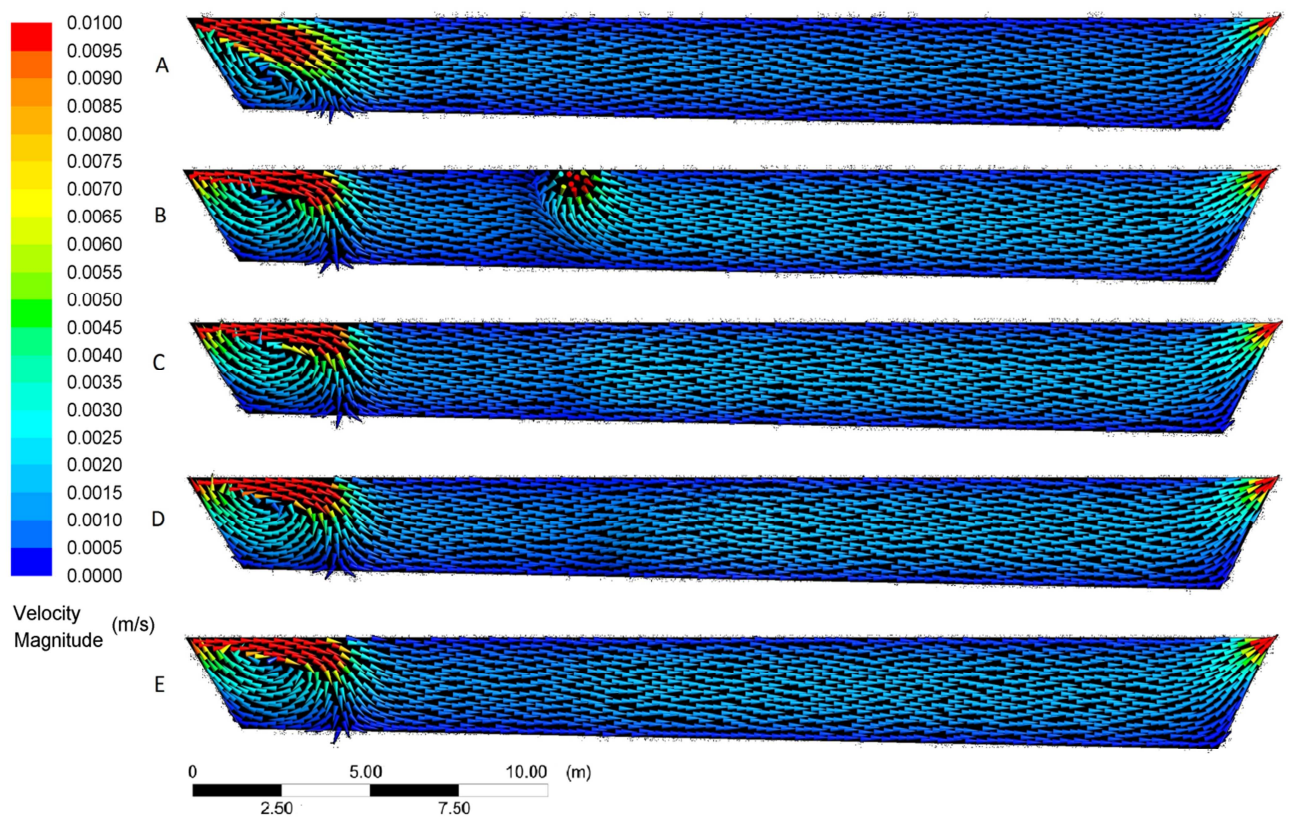


Figura 29. Vectores de velocidad en la vista lateral de las configuraciones analizadas.

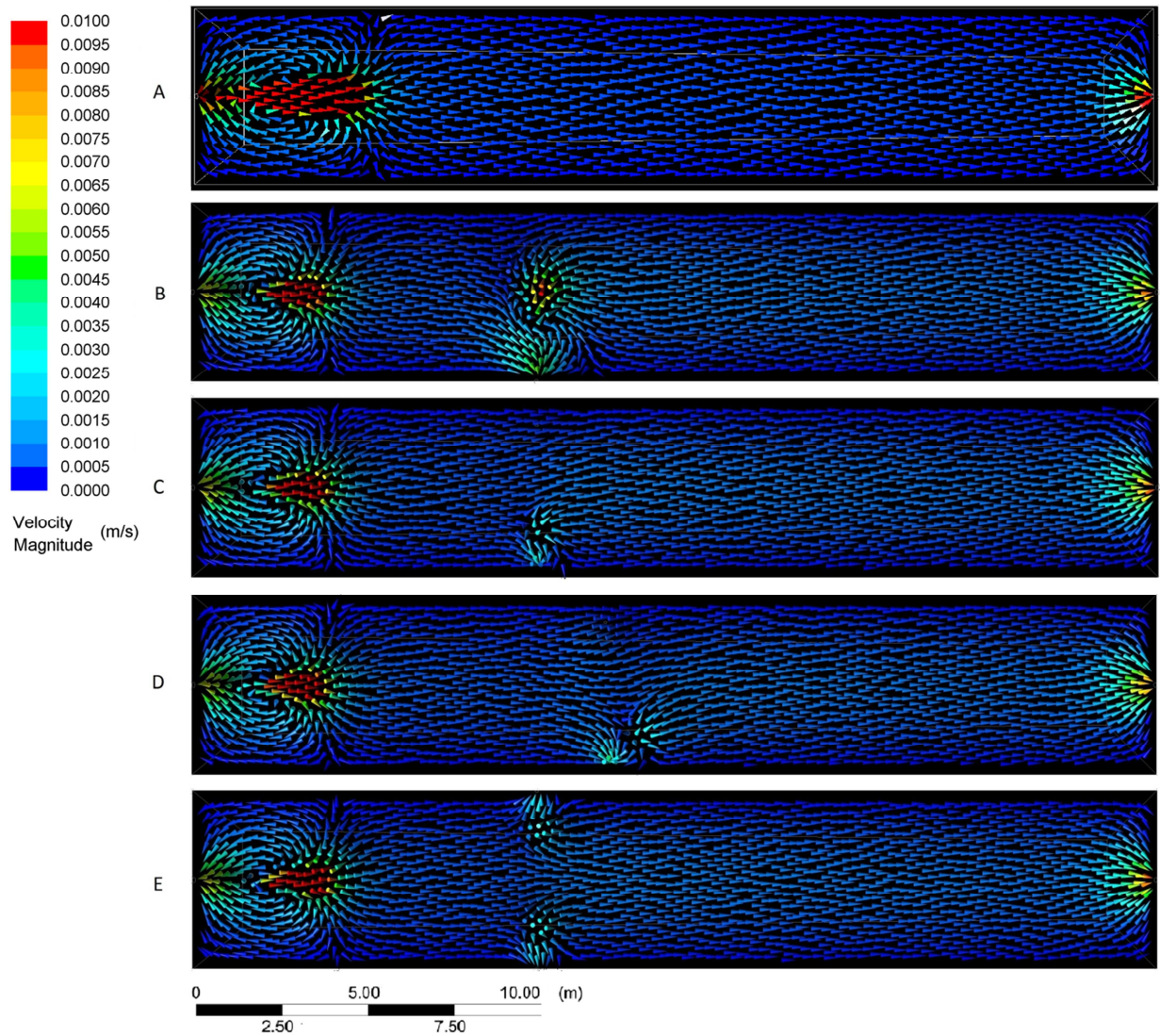


Figura 30 . Vectores de velocidad en la vista superior de las configuraciones analizadas

Las líneas de corriente determinan las trayectorias seguidas por el material al interior del digestor, la Figura 31 muestra las líneas de flujo para las cinco diferentes configuraciones analizadas en su vista superior.

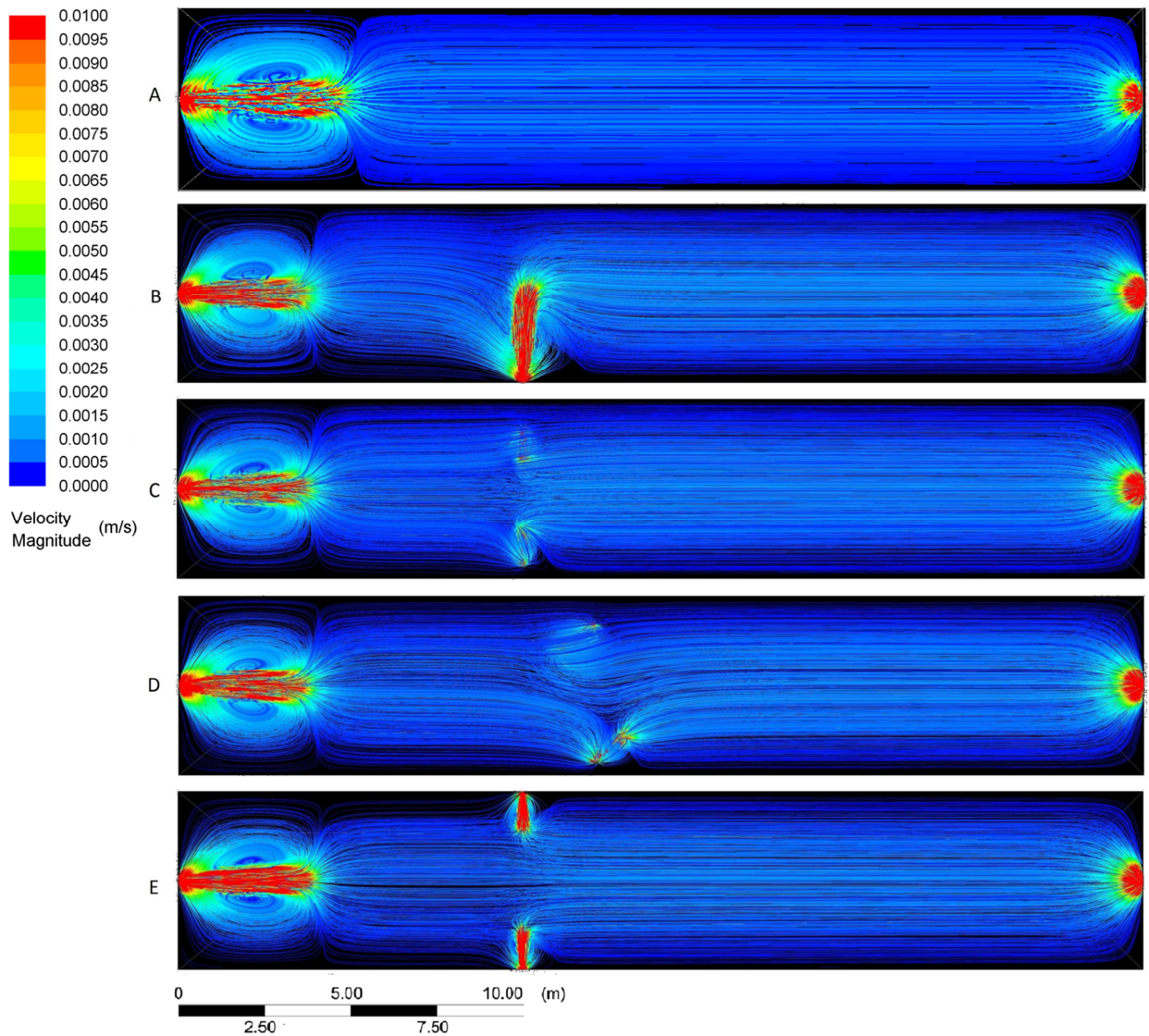


Figura 31. Líneas de corriente en la vista superior de las configuraciones analizadas.

En esta representación queda aún más clara la ubicación de los vórtices, cabe destacar que según las simulaciones, estos dos vórtices se encuentran conectados entre sí en la parte inferior a la superficie. De acuerdo con Bridgeman (2012), la formación de vórtices implica un disturbio hidrodinámico en el digestor, por lo que se le considera un indicador de mezclado interno. Para el caso de simulaciones en digestores anaeróbicos completamente mezclados, se han reportado la aparición de vórtices alrededor de las zonas de las hélices para agitadores mecánicos (Meroney y Colorado, 2009; Terashima *et*

al, 2009; Wu, 2010) y en las regiones cercanas a las salidas del material para digestores con recirculación de líquido o gas (Meroney y Colorado, 2009; Terashima *et al.*, 2009; Vesvikar y Al-Dahhan, 2005).

Para evaluar el desempeño hidrodinámico de los diferentes digestores se determinaron las regiones de espacio muerto con base en la viscosidad. En la Figura 32 se observa un punto de inflexión en la derivada de la viscosidad. Se definió como espacio muerto a las regiones en cada una de las configuraciones cuya viscosidad es mayor al punto posterior al punto de inflexión, valor que corresponde a 26.43 Pa.s. Esto es debido a que a partir de este punto al hacer grandes cambios en la velocidad de cizalla, la viscosidad presenta cambios pequeños.

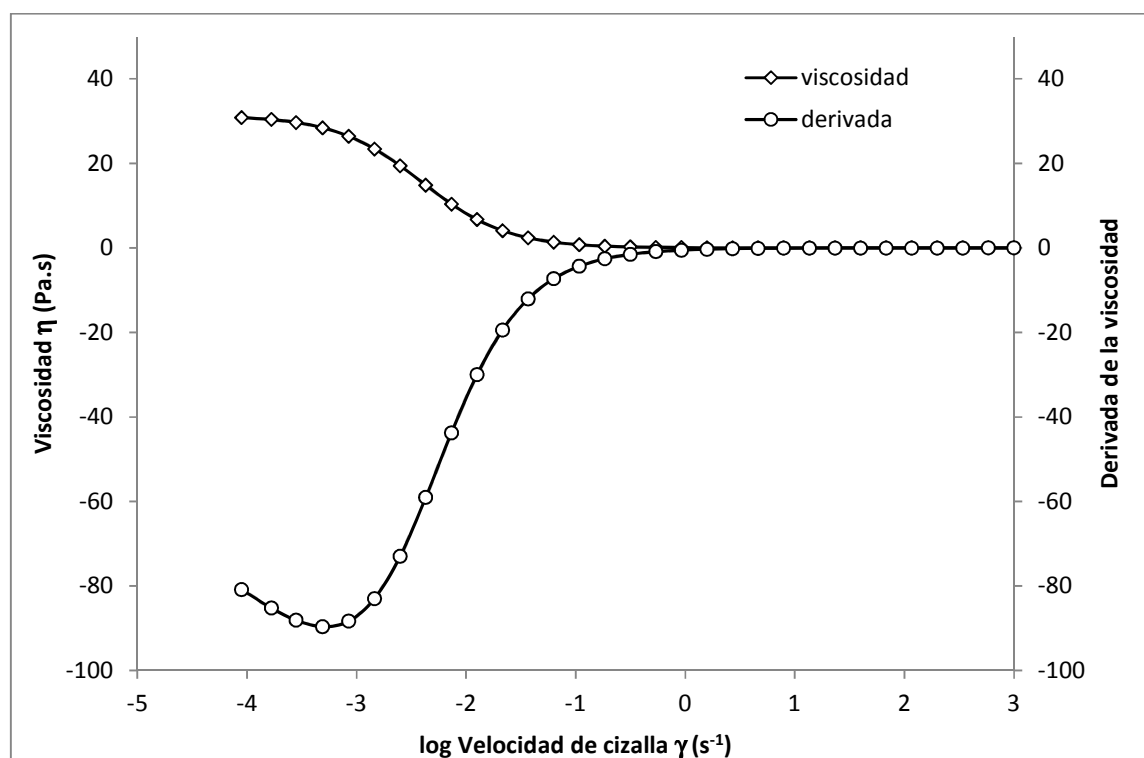


Figura 32. Viscosidad y derivada de la viscosidad

En la literatura se encuentran diferentes definiciones de espacio muerto y varía de acuerdo al autor. Vesvikar y Al-Dahhan (2005) definieron los espacios muertos como aquellas zonas donde la velocidad fue menor al 5 % de la velocidad máxima al interior del digestor. (Bridgeman, 2012) definió el volumen muerto como las regiones donde la

velocidad era menor al 5 % de la velocidad media en el interior del digestor. El concepto más ampliamente usado para definir los espacios muertos está relacionado con la distribución de los tiempos de residencia (RTD), las investigaciones hechas por Terashima *et al.* (2009), Wu y Chen (2011), y Langner (2009), definieron los espacios muertos de acuerdo a este último criterio.

La principal ventaja de utilizar la viscosidad como un parámetro del espacio muerto,, al igual que lo hace el criterio de la distribución de los tiempos de residencia, es que permite independizar los cálculos de las medidas de velocidad y por lo tanto, eliminar fuentes de error provenientes de los datos de recirculación (Levenspiel, 1999).

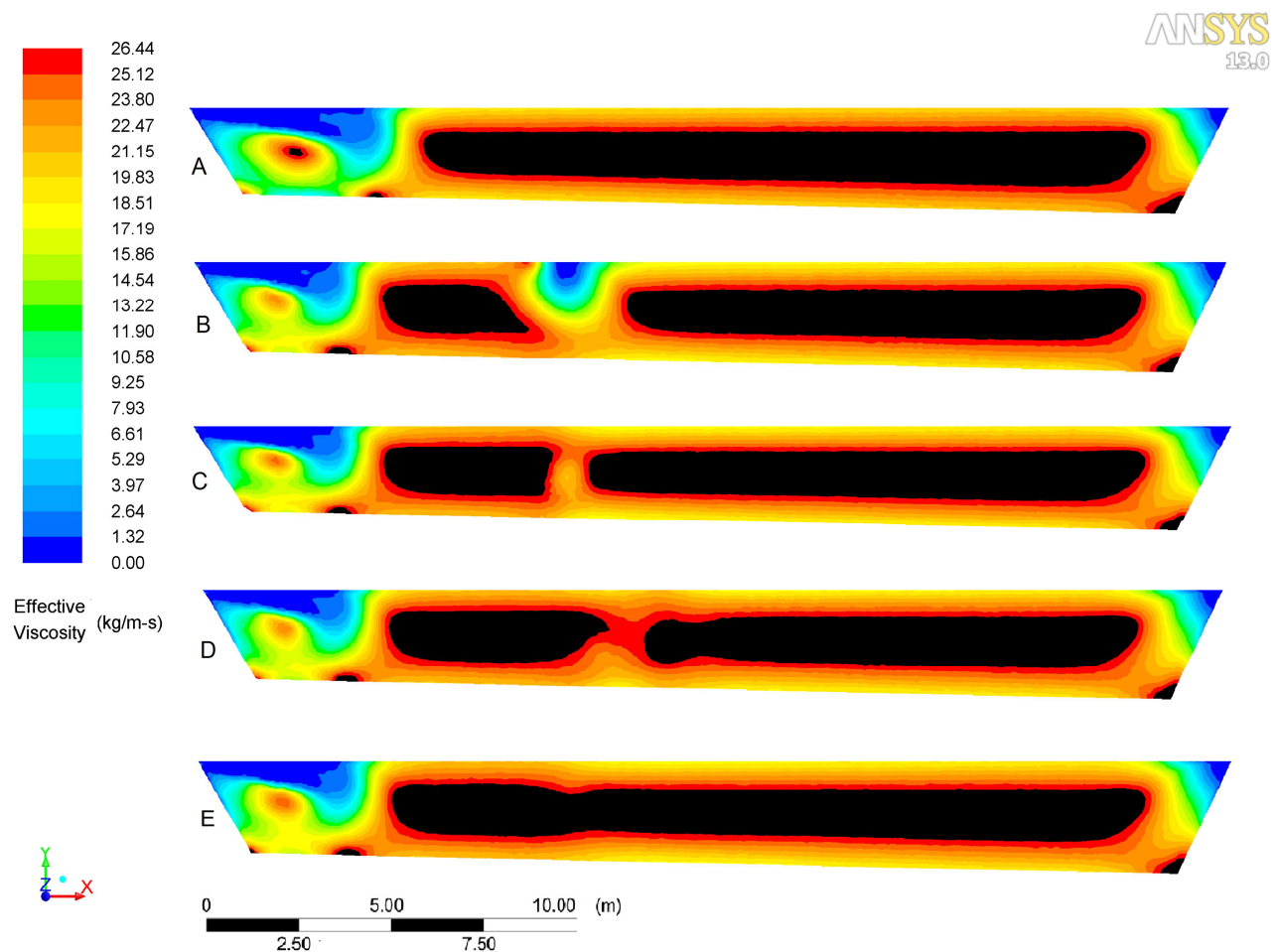


Figura 33. Vista lateral de los contornos de viscosidad

En las Figuras 33 (vista lateral) y 34 (vista superior), se presentan los contornos al interior del digestor de acuerdo a la viscosidad dinámica. Los contornos en color azul representan las regiones con menor viscosidad y los rojos las de mayor viscosidad, el color negro representa el espacio muerto (zonas con viscosidad mayor a 26.43 Pa.s).

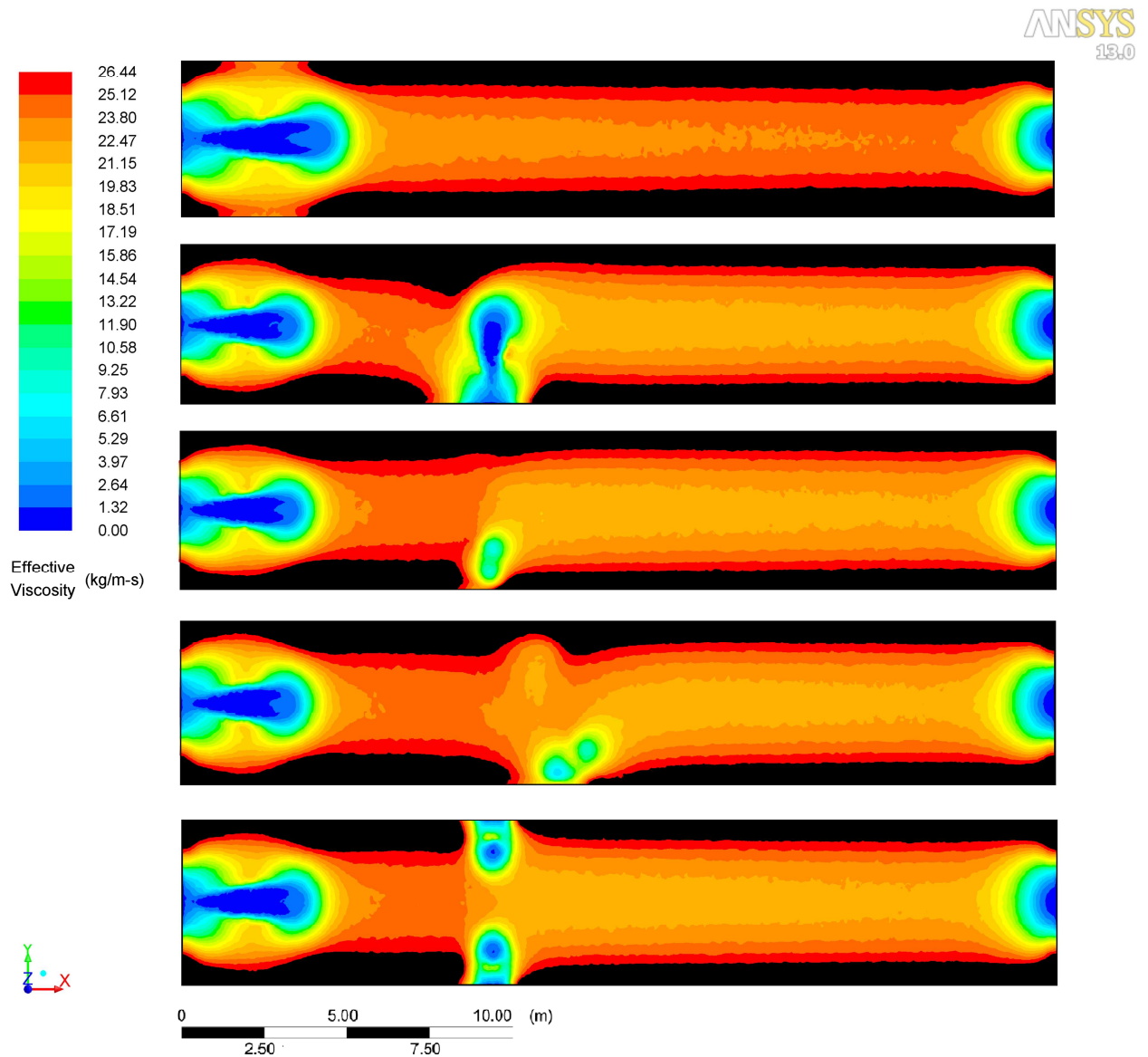


Figura 34 . Vista superior de los contornos de viscosidad

La viscosidad disminuye y presenta valores cercanos a la del agua en las regiones cercanas a las entradas y salidas de material debido a que estas regiones son las que presentan altas velocidades de cizalla.

Cuadro 5. Porcentaje de espacio muerto en las configuraciones analizadas

Espacio muerto por viscosidad	% Espacio muerto	% Reducción absoluta de espacio muerto	% Reducción respecto al original
A	32.65	-	-
B	26.38	6.27	19.21
C	28.30	4.35	13.32
D	28.18	4.47	13.69
E	28.51	4.14	12.67

En el Cuadro 5 se presentan los porcentajes de espacio muerto para cada una de las configuraciones analizadas, se puede observar que las cuatro configuraciones analizadas disminuyen las zonas muertas, sin embargo, la configuración B es la que produjo la mayor reducción en los espacios muertos en términos absolutos (26.38 %) y comparado con el digestor original (19.21 %).

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. CONCLUSIONES

Se generó un modelo CFD del desempeño hidrodinámico de un digestor aneróbico industrial de laguna cubierta con capacidad instalada de 250 m³. El flujo másico de entrada fue de 6.086 kg·s⁻¹ y el fluido de trabajo se ajustó adecuadamente al modelo reológico de Cross. El patrón de flujo observado consistió en velocidades relativamente altas y dos vórtices en la zona cercana al flujo, mientras que en la parte media y final se observaron velocidades bajas y con un ordenamiento paralelo a las paredes del digestor. En estas condiciones el espacio muerto fue de 32.65 %.

El análisis dimensional aplicado a la geometría del digestor industrial permitió definir las condiciones de reducción de escala. El escalamiento del sistema se definió mediante los números de Reynolds = 74.43 y Froude = 0.284, siendo 1:50 el factor de escala para la construcción del modelo en acrílico. Las características reológicas de la solución de goma xantana al 0.05 % mostraron adecuado ajuste al modelo de cross, por lo que se empleó como fluido modelo. Los perfiles de velocidad y líneas de corriente generados por velocimetría de imágenes de partícula en el modelo a escala tuvieron un comportamiento muy similar a los obtenidos mediante CFD.

Las cuatro configuraciones de recirculación analizadas mejoraron el desempeño hidrodinámico en el rango del 12.67 al 19.21 % respecto al porcentaje de espacios muertos del digestor original. La configuración con el mejor desempeño hidrodinámico fue a una distancia de 12 m y con un ángulo perpendicular respecto a la línea de entrada, y flujo másico de 4.868 kg·s⁻¹, la cual redujo el volumen de espacio muerto en 19.21 % con respecto al digestor original.

La metodología experimental y numérica presentada en este trabajo permitió proponer alternativas que reducen el volumen de espacios muertos, por lo que los modelos

planteados contribuyen a la mejora del desempeño hidrodinámico del digestor anaeróbico industrial de laguna cubierta.

2. RECOMENDACIONES

Estudiar el efecto de la cantidad de sólidos totales y la temperatura en el comportamiento reológico del fluido de trabajo de un digestor anaeróbico.

Incluir en los modelos CFD la sedimentación de sólidos y la transferencia de calor al interior del digestor anaeróbico.

Analizar diferentes tipos de fluidos en la selección del fluido modelo.

Determinar los espacios muertos mediante un estudio de distribución de los tiempos de residencia y comparar los resultados obtenidos del criterio de viscosidad para espacios muertos.

Realizar investigaciones de CFD, con su respectiva validación experimental, en diferentes tipos de digestores anaeróbicos

BIBLIOGRAFÍA

- Achkari-Begdouri, A., Goodrich, P.R. 1992. Rheological properties of Moroccan dairy cattle manure. *Bioresource Technology*, 40(2), 149-156.
- ANSYS, I. 2009. ANSYS Fluent. 12.0 Theory guide, United States.
- Appels, L., Baeyens, J., Degreè, J., Dewil, R. 2008. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6), 755-781.
- Astarita, G. 1997. Dimensional analysis, scaling, and orders of magnitude. *Chemical Engineering Science*, 52(24), 4681-4698.
- Barnes, H.A. 2000. A handbook of elementary rheology. University of Wales, Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics.
- Batstone, D.J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S.V., Pavlostathis, S.G., Rozzi, A., Sanders, W.T., Siegrist, H., Vavilin, V.A. 2002. IWA Task Group for Mathematical Modelling of Anaerobic Digestion Processes. IWA Publishing, London.
- Batstone, D.J., Keller, J., Newell, R.B., Newland, M. 2000. Modelling anaerobic degradation of complex wastewater. I: model development. *Bioresource Technology*, 75(1), 67-74.
- Batstone, D.J., Torrijos, M., Ruiz, C., Schmidt, J.E. 2004. Use of an anaerobic sequencing batch reactor for parameter estimation in modelling of anaerobic digestion. *Water Sci Technol*, 50(10), 295-303.
- Braun, D.D., Rosen, M.R. 2008. *Rheology Modifiers Handbook: Practical Use and Applilcation*. Elsevier Science.
- Bridgeman, J. 2012. Computational fluid dynamics modelling of sewage sludge mixing in an anaerobic digester. *Advances in Engineering Software*, 44(1), 54-62.
- Buchhave, P. 1992. Particle image velocimetry—status and trends. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 5(5), 586-604.
- Budynas, R.R.G., Nisbett, J.K., Shigley, J.E. 2011. *Shigley's Mechanical Engineering Design*, SI Version. McGraw-Hill Education.

- Bun, J.R.H. 2000. Fundamentos de Ingeniería de Procesos Agroalimentarios. Ediciones Mundi-Prensa.
- Çengel, Y.A., Cimbala, J.M. 2012. Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones. McGraw Hill.
- Collivignarelli, C., Bina, S. 1993. The hydrodynamic behaviour of an anaerobic digester for domestic sludge: comparative tests. *European Water Pollution Control*, 3(2), 9-12.
- Costello, D.J., Greenfield, P.F., Lee, P.L. 1991. Dynamic modelling of a single-stage high-rate anaerobic reactor—I. Model derivation. *Water Research*, 25(7), 847-858.
- Chen, Y.R. 1986. Rheological properties of sieved beef-cattle manure slurry: Rheological model and effects of temperature and solids concentration. *Agricultural Wastes*, 15(1), 17-33.
- Chen, Y.R., Hashimoto, A.G. 1976. Rheological properties of aerated poultry waste slurries. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 19(1), 128-133.
- Cheng, Y.-T., Cheng, C.-M. 2004. Scaling, dimensional analysis, and indentation measurements. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 44(4-5), 91-149.
- Chhabra, R.P., Richardson, J.F. 2011. *Non-Newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering Applications*. Elsevier Science.
- Daigle, A., Bérubé, F., Bergeron, N., Matte, P. 2013. A methodology based on Particle image velocimetry for river ice velocity measurement. *Cold Regions Science and Technology*, 89(0), 36-47.
- DantecDynamics. 2006. 2D PIV Reference Manual. *Second ed*, Skovlunde, Denmark.
- Donoso-Bravo, A., Mailier, J., Martin, C., Rodríguez, J., Aceves-Lara, C.A., Wouwer, A.V. 2011. Model selection, identification and validation in anaerobic digestion: A review. *Water Research*, 45(17), 5347-5364.
- Eastman, J.A., Ferguson, J.F. 1981. Solubilization of Particulate Organic Carbon during the Acid Phase of Anaerobic Digestion. *Water Pollution Control Federation Journal*, 53(3), 352-366.
- El-Mashad, H.M., van Loon, W.K.P., Zeeman, G., Bot, G.P.A. 2005. Rheological properties of dairy cattle manure. *Bioresource Technology*, 96(5), 531-535.

- Eshtiaghi, N., Yap, S.D., Markis, F., Baudez, J.-C., Slatter, P. 2012. Clear model fluids to emulate the rheological properties of thickened digested sludge. *Water Research*, 46(9), 3014-3022.
- Espinosa-Solares, T., Morales-Contreras, M., Robles-Martínez, F., García-Nazariega, M., Lobato-Calleros, C. 2008. Hydrodynamic Characterization of a Column-type Prototype Bioreactor. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 147(1-3), 133-142.
- Fleming, J.G. 2002. Novel simulation of anaerobic digestion using Computational Fluid Dynamics. in: *Mechanical Engineering, Vol. Doctor of Philosophy*, North Carolina State University. Raleigh, NC.
- Fountoulakis, M., Drillia, P., Pakou, C., Kampioti, A., Stamatelatou, K., Lyberatos, G. 2005. Analysis of nonylphenol and nonylphenol ethoxylates in sewage sludge by high performance liquid chromatography following microwave-assisted extraction. *Journal of Chromatography A*, 1089(1-2), 45-51.
- Gabelle, J.C., Morchain, J., Anne-Archard, D., Augier, F., Liné, A. 2013. Experimental determination of the shear rate in a stirred tank with a non-newtonian fluid: Carbopol. *AIChE Journal*, 59(6), 2251-2266.
- Grobicki, A., Stuckey, D.C. 1992. Hydrodynamic characteristics of the anaerobic baffled reactor. *Water Research*, 26(3), 371-378.
- Gubert, X.A., UPC, E. 2010. *Mecánica Del Medio Continuo en la Ingeniería*. Edicions de la UPC, S.L.
- Guibaud, G., Dollet, P., Tixier, N., Dagot, C., Baudu, M. 2004. Characterisation of the evolution of activated sludges using rheological measurements. *Process Biochemistry*, 39(11), 1803-1810.
- Herranz, A., García, A.H., Arenas, A., Gómez, A.A. 1989. *Análisis dimensional y sus aplicaciones: Fundamentos*. Vol. I. Universidad, Secretariado de Publicaciones.
- Hilkiah Igoni, A., Ayotamuno, M.J., Eze, C.L., Ogaji, S.O.T., Probert, S.D. 2008. Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste. *Applied Energy*, 85(6), 430-438.

- Hill, D.T. 1982. A comprehensive dynamic model for animal waste methanogenesis. *Transactions of the ASABE*, 35(5), 1374-1380.
- Hill, D.T., Barth, C.L. 1977. A dynamic model for simulation of animal waste digestion. *Water Pollution Control Federation Journal*, 49(10), 2129-2143.
- Himmelblau, D.M.A., Bischoff, K.B.A. 1992. *Análisis y Simulación de procesos*. Editorial Reverté, S.A.
- Joubert, W.A., Britz, T.J. 1987. The performance and mixing characteristics of an anaerobic hybrid reactor treating a synthetic fatty acid containing substrate. *Water SA*, 13(2), 63-68.
- Kalyuzhnyi, S.V. 1997. Batch anaerobic digestion of glucose and its mathematical modeling. II. Description, verification and application of model. *Bioresource Technology*, 59(2-3), 249-258.
- Kalyuzhnyi, S.V., Davlyatshina, M.A. 1997. Batch anaerobic digestion of glucose and its mathematical modeling. I. Kinetic investigations. *Bioresource Technology*, 59(1), 73-80.
- Kaparaçu, P., Buendia, I., Ellegaard, L., Angelidakia, I. 2008. Effects of mixing on methane production during thermophilic anaerobic digestion of manure: Lab-scale and pilot-scale studies. *Bioresource Technology*, 99(11), 4919-4928.
- Karim, K., Hoffmann, R., Klasson, T., Al-Dahhan, M.H. 2005a. Anaerobic digestion of animal waste: Waste strength versus impact of mixing. *Bioresource Technology*, 96(16), 1771-1781.
- Karim, K., Hoffmann, R., Thomas Klasson, K., Al-Dahhan, M.H. 2005b. Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mode of mixing. *Water Research*, 39(15), 3597-3606.
- Kline, S.J. 2011. *Similitude and Approximation Theory*. Springer London, Limited.
- Landry, H., Laguë, C., Roberge, M. 2006. Discrete element modeling of machine-manure interactions. *Comput. Electron. Agric.*, 52(1-2), 90-106.
- Landry, H., Laguë, C., Roberge, M. 2004. Physical and rheological properties of manure products. *Transactions of the ASABE*, 20(3), 277-288.
- Langner, J.M. 2009. INVESTIGATION OF NON-NEWTONIAN FLOW IN ANAEROBIC DIGESTERS. in: *Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, Vol. Master of Science, University of Manitoba. Winnipeg, Manitoba, Canadá*, pp. 374.

- Lauwers, J., Appels, L., Thompson, I.P., Degreè, J., Van Impe, J.F., Dewil, R. 2013. Mathematical modelling of anaerobic digestion of biomass and waste: Power and limitations. *Progress in Energy and Combustion Science*(0).
- Levenspiel, O. 1999. Chemical reaction engineering. Wiley.
- Litron-Lasers-Inc. 2008. Nano Series Operators Handbook Litron, Denmark.
- Low, S.C., Parthasarathy, R., Slatter, P., Eshtiaghi, N. 2012. Hydrodynamics Study of Sludge in Anaerobic Digesters. *Chemical Engineering Transactions*, 29, 1321-1326.
- Malkin, A.I.A., Malkin, A.Y., Isayev, A.I. 2006. Rheology: Concepts, Methods, And Applications. ChemTec Publishing.
- Meroney, R.N., Colorado, P.E. 2009. CFD simulation of mechanical draft tube mixing in anaerobic digester tanks. *Water Research*, 43(4), 1040-1050.
- Mezger, T.G. 2006. The Rheology Handbook: For Users of Rotational and Oscillatory Rheometers. Vincentz Network.
- Monroy, O., Famá, G., Meraz, M., Montoya, L., Macarie, H. 2000. Anaerobic digestion for wastewater treatment in Mexico: state of the technology. *Water Research*, 34(6), 1803-1816.
- Montante, G., Magelli, F., Paglianti, A. 2013. Fluid-dynamics characteristics of a vortex-ingesting stirred tank for biohydrogen production. *Chemical Engineering Research and Design*(0).
- Mori, M., Seyssiecq, I., Roche, N. 2006. Rheological measurements of sewage sludge for various solids concentrations and geometry. *Process Biochemistry*, 41(7), 1656-1662.
- Patankar, S.V. 1980. Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere Pub. Corp.
- Potter, M.C., Wiggert, D.C. 2002. Mecánica de fluidos. International Thomson Editores, S. A. de C. V.
- Reddy, R.K., Sathe, M.J., Joshi, J.B., Nandakumar, K., Evans, G.M. 2013. Recent developments in experimental (PIV) and numerical (DNS) investigation of solid-liquid fluidized beds. *Chemical Engineering Science*, **92**(0), 1-12.
- Rozen, A.M., Kostanyan, A.E. 2002. Scaling-up Effect in Chemical Engineering. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 36(4), 307-313.

- Ruzicka, M. 1996. The effect of hydrogen on acidogenic glucose cleavage. *Water Research*, 30(10), 2447-2451.
- Ruzicka, M.C. 2008. On dimensionless numbers. *Chemical Engineering Research and Design*, 86(8), 835-868.
- Siegrist, H., Vogt, D., Garcia-Heras, J.L., Gujer, W. 2002. Mathematical Model for Meso- and Thermophilic Anaerobic Sewage Sludge Digestion. *Environmental Science & Technology*, 36(5), 1113-1123.
- Slatter, P.T. 1997. The rheological characterisation of sludges. *Water Science and Technology*, 36(11), 9-18.
- Sozanski, M.M., Kempa, E.S., Grocholski, K., Bien, J. 1997. The rheological experiment in sludge properties research. *Water Science and Technology*, 36(11), 69-78.
- Speece, R.E. 1983. Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment. *Environmental Science & Technology*, 17(9), 416A-427A.
- Sybilski, D. 1996. Zero-Shear Viscosity of Bituminous Binder and Its Relation to Bituminous Mixture's Rutting Resistance. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1535(-1), 15-21.
- Terashima, M., Goel, R., Komatsu, K., Yasui, H., Takahashi, H., Li, Y.Y., Noike, T. 2009. CFD simulation of mixing in anaerobic digesters. *Bioresource Technology*, 100(7), 2228-2233.
- Valle-Guadarrama, S., Espinosa-Solares, T., López-Cruz, I., Domaschko, M. 2011. Modeling temperature variations in a pilot plant thermophilic anaerobic digester. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 34(4), 459-470.
- Vavilin, V.A., Vasiliev, V.B., Ponomarev, A.V., Rytow, S.V. 1994. Simulation model 'methane' as a tool for effective biogas production during anaerobic conversion of complex organic matter. *Bioresource Technology*, 48(1), 1-8.
- Vesvikar, M.S., Al-Dahhan, M. 2005. Flow pattern visualization in a mimic anaerobic digester using CFD. *Biotechnology and Bioengineering*, 89(6), 719-732.
- Wu, B. 2011. CFD investigation of turbulence models for mechanical agitation of non-Newtonian fluids in anaerobic digesters. *Water Research*, 45(5), 2082-2094.
- Wu, B. 2010. CFD simulation of mixing in egg-shaped anaerobic digesters. *Water Research*, 44(5), 1507-1519.

- Wu, B., Chen, S. 2008. CFD simulation of non-Newtonian fluid flow in anaerobic digesters. *Biotechnology and Bioengineering*, 99(3), 700-711.
- Wu, B., Chen, Z. 2011. An integrated physical and biological model for anaerobic lagoons. *Bioresource Technology*, 102(8), 5032-5038.
- Wu, J., Zhang, J.B., Jiang, Y., Cao, Z.P., Poncin, S., Li, H.Z. 2012. Impacts of hydrodynamic conditions on sludge digestion in internal circulation anaerobic digester. *Process Biochemistry*, **47**(11), 1627-1632.
- Yu, L., Ma, J., Chen, S. 2011. Numerical simulation of mechanical mixing in high solid anaerobic digester. *Bioresource Technology*, 102(2), 1012-1018.
- Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. 2005. *The Finite Element Method Set*. Elsevier Science.
- Zufferey, B. 2006. *Scale-down Approach: Chemical Process Optimisation Using Reaction Calorimetry for the Experimental Simulation of Industrial Reactors Dynamics*.