

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE AGRONOMÍA



**OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS MEDIANTE
SIMULACIÓN DE DINÁMICA DE FLUIDOS PARA EL TRATAMIENTO DE
RESIDUOS DE GANADO BOVINO**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN
INGENIERÍA EN BIOSISTEMAS**

PRESENTA:

ING. GUSTAVO HERNÁNDEZ PÉREZ

GENERAL ESCOBEDO, N.L.

OCTUBRE DE 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE AGRONOMÍA



**OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS MEDIANTE
SIMULACIÓN DE DINÁMICA DE FLUIDOS PARA EL TRATAMIENTO DE
RESIDUOS DE GANADO BOVINO**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN
INGENIERÍA EN BIOSISTEMAS**

PRESENTA:

ING. GUSTAVO HERNÁNDEZ PÉREZ

GENERAL ESCOBEDO, N.L.

OCTUBRE DE 2024

ESTA TESIS FUE REVISADA Y APROBADA POR EL COMITÉ PARTICULAR
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN
INGENIERÍA EN BIOSISTEMAS

COMITÉ PARTICULAR



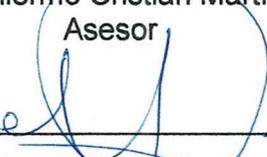
Dra. Nancy del Pilar Medina Herrera
Directora de Tesis



Dr. Romeo Rojas Molina
Co-Director



Dr. Guillermo Cristian Martínez
Asesor



Dra. Claudia Lizeth Robledo Jiménez
Asesora



Dra. Juanita Guadalupe Gutiérrez Soto
Subdirectora de Posgrado e Investigación

ESTA TESIS FUE APROBADA EN FORMATO, POR EL COMITÉ DE POSGRADO,
ATENDIENDO A EL ARTÍCULO 123, DEL REGLAMENTO GENERAL DEL
SISTEMA DE POSGRADO DE LA UANL.

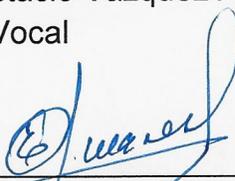
COMITÉ DE POSGRADO


Dra. Juanita Guadalupe Gutiérrez Soto
Presidenta


Dr. Celestino García Gómez
Secretario


Dra. Lidia Rosaura Salas Cruz
Vocal


Ph.D. Rigoberto Eustacio Vázquez Alvarado
Vocal


Ph.D. Emilio Olivares Sáenz
Vocal


Dra. Sughey Ramona Sinagawa García
Vocal


Dr. Guillermo Niño Medina
Vocal

DEDICATORIA

A Dios, por permitirme concluir mis estudios profesionales.

A mis padres por la vida y a mis hermanos Abelino y German por su apoyo tanto moral como económica durante mi desarrollo profesional.

A mi esposa Nohemí Estefani Espejo Carrillo y a mis hijas Helen Isabel Hernández Espejo e Inna Lynette Hernández Espejo, expreso mi sincero afecto a mi esposa por su enorme apoyo y palabras de aliento y no permitirme darme por vencido en los momentos difíciles que se presentaron en el periodo. A mis hijas que son mi motor e impulso para seguir superándome como persona, profesionalmente y de ser un ejemplo para ellas.

A la familia Hernández Jiménez y familia Espejo Carrillo por su aprecio, afecto, apoyo moral y económico de manera incondicional. Han sido y seguirán siendo mi ejemplo para seguir esforzándome en la vida, a ellos les atribuyo mis logros y gracias a la vida misma que me los mando en los momentos que los necesitaba.

Al Arq. María de la Luz Colin Hernández e Ing. Brenda Nayetxi Luna Jiménez, por su amabilidad y generosidad de proporcionar el equipo de cómputo durante el desarrollo de este proyecto.

Al MC. Domingo Méndez Álvarez agradezco su apoyo en compartirme su conocimiento científico y como amigo sus palabras de aliento.

A todos mis amigos y numerosas personas que me han apoyado durante mi trayectoria profesional.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Agradezco a la **Facultad de Agronomía** por haberme aceptado ser parte de ella y abierto las puertas para estudiar la maestría, así como también a su personal docente que brindaron su conocimiento y apoyo durante el periodo de estudios.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi asesora de tesis **Dra. Nancy del Pilar Medina Herrera** por haberme brindado la oportunidad de desarrollar este gran proyecto y de recurrir a su gran capacidad y habilidad en el conocimiento científico, así como también haberme tenido toda la paciencia para guiarme durante todo el desarrollo de la tesis y reconozco profundamente su gran sentido de responsabilidad. Así como también, **al comité de tesis**, por su compromiso y dedicación en la revisión del trabajo de tesis.

Agradezco a la **UAAAN** por ser mi fuente de empleo y brindar la oportunidad de continuar estudiando mi posgrado y poder cubrir las necesidades según se deriven en el periodo de estudio.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ABREVIATURAS.....	1
NOMENCLATURA	2
RESUMEN	4
ABSTRACT	5
INTRODUCCIÓN	6
HIPÓTESIS	9
OBJETIVOS	10
1.1 Objetivo General	10
1.1.1 Objetivos Específicos	10
REVISIÓN DE LITERATURA.....	11
2.1 Problemática Actual	11
2.2 Modelado de los bioprocesos	12
2.3 Retos en la simulación de los bioprocesos	12
2.4 Análisis hidrodinámico de biodigestores.....	13
2.5 Influencia de la mezcla en la eficiencia de los biodigestores	15
2.6 Esfuerzos en los fluidos.....	17
2.7 Herramientas de modelado y simulación.....	19
2.8 Control de soluciones y algoritmos CFD	20
2.8.1 El algoritmo <i>PIMPLE</i>	20
2.8.2 Número de Courant.....	22
2.8.3 Convergencia	24

2.8.4	Factor de relajación y estabilidad	25
2.8.5	Control residual	27
2.8.6	Tolerancias del solucionador	28
METODOLOGÍA.....		29
3.1	Modelado de CFD del sistema hidrodinámico.....	29
3.2	Diseño de geometría.....	30
3.3	Diseño del agitador	30
3.4	Mallado de las geometrías	31
3.5	Solucionador <i>OpenFOAM</i>	31
3.5.1	Modelo matemático del solucionador	32
3.5.2	Fluido de trabajo del biodigestor.....	33
3.5.3	Condiciones de frontera y valores iniciales	34
3.5.4	Control de tiempo	36
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		37
4.1	Geometría del biodigestor.....	37
4.2	Mallado de la geometría del biodigestor	39
4.3	Simulación hidrodinámica del biodigestor anaeróbico	41
4.3.1	Análisis hidrodinámico con diferentes densidades en geometría G1	41
4.3.2	Análisis hidrodinámico con diferentes densidades en geometría G2	43
4.3.3	Simulación con y sin agitación mecánica	45
4.3.4	Esfuerzos en el interior de la geometría con y sin agitación mecánica ...	48
4.3.5	Geometría con diferente elevación del agitador	58
4.3.6	Esfuerzos con diferente elevación del agitador.	60
4.3.7	Geometría G4 con diferente velocidad angular del agitador.	64
4.3.8	Los esfuerzos en diferentes velocidades angulares del agitador	66

4.3.9	Análisis hidrodinámico con diferentes densidades	67
4.3.10	Esfuerzos en mezclas de diferente densidad	70
	CONCLUSIONES.....	74
	RECOMENDACIONES	75
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
	ANEXOS	84
	Anexo 1. Configuración del algoritmo <i>PIMPLE</i> para su ejecución en modo <i>PISO</i>	84
	Anexo 2. Configuración del algoritmo <i>PIMPLE</i> para su ejecución en modo <i>PIMPLE</i> .87	
	Anexo 3. Configuración del tiempo en el archivo <i>controldict</i>	90
	Anexo 4. Método de Mallado para MRF en <i>OpenFOAM</i>	92

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
Cuadro 1. Dimensiones de las geometrías.....	30
Cuadro 2. Propiedades de la simulación G1 y G2.....	33
Cuadro 3. Propiedades de la mezcla para la simulación con G1 y G3.....	34
Cuadro 4. Diferente elevación del agitador.....	35
Cuadro 5. Simulaciones con diferentes revoluciones del agitador	35
Cuadro 6. Simulaciones con diferente densidad	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1. Volumen de control que muestra las fuerzas superficiales únicamente en el eje x.....	18
Figura 2. Diagrama del algoritmo <i>PIMPLE</i>	21
Figura 3. Criterio de convergencia de Courant.....	22
Figura 4. Análisis de número de Courant en una dimensión.....	23
Figura 5. Análisis de Co en una celda 3D.....	24
Figura 6. Discretización de la ecuación de cantidad de movimiento con N celdas...	25
Figura 7. Factor de relajación en una celda de la malla.....	25
Figura 8. Geometrías del biodigestor anaeróbico en 3D.....	37
Figura 9. Geometría del agitador.....	38
Figura 10. Geometrías del biodigestor anaeróbico con agitador en 3D.....	38
Figura 11. Mallado de la geometría del biodigestor anaeróbico en 3D.....	39
Figura 12. Mallado de la geometría del biodigestor anaeróbico con agitador en 3D.	40
Figura 13. Malla del agitador.....	40
Figura 14. Análisis de cambio de densidad en G1.....	42
Figura 15. Análisis de cambio de densidad en G2.....	44
Figura 16. Comparación geometría G1 y G3.....	46
Figura 17. Celdas con velocidad entre 0.8 y 1 m s^{-1} en el tiempo 150 s	47
Figura 18. Resultados de esfuerzos. Geometría G1 y Geometría G3.....	49
Figura 19. Esfuerzo en las aspas del agitador en 200s	50
Figura 20. Celdas con esfuerzo máximo en el tiempo para la geometría G1.....	50
Figura 21. Celdas con esfuerzos máximos en el tiempo para la geometría G3.....	51
Figura 22. Gráfica de esfuerzo máximo en el tiempo de G1 simulación 5.....	51

Figura 23. Gráfica de esfuerzo máximo en el tiempo en G3 simulación 6.....	52
Figura 24. Esfuerzos máximos en diferentes niveles de líquido.	53
Figura 25. Celdas con esfuerzos entre 0.01 a 0.04 m ² s ⁻²	54
Figura 26. Esfuerzos entre 0.001 y 0.005 m ² s ⁻² en el tiempo de G1 simulación 5..	55
Figura 27. Celdas con esfuerzos entre 0.001 y 0.005 m ² s ⁻² en 200s.	55
Figura 28. Celdas de G3 con esfuerzos entre 0.06 y 0.08 m ² s ⁻²	56
Figura 29. Celdas de G3 con esfuerzos entre 0.02 y 0.04 m ² s ⁻²	57
Figura 30. Resultados elevación del agitador.	59
Figura 31. Análisis de esfuerzos con diferentes elevaciones del agitador.....	61
Figura 32. Gráfica de esfuerzo máximo en el tiempo de G4 simulación 7.....	62
Figura 33. Gráfica de esfuerzo máximo en el tiempo en G3 simulación 6.....	62
Figura 34. Esfuerzos máximos en diferentes niveles de líquido. G4 simulación 7 y G3 simulación 6	63
Figura 35. Simulaciones con diferente velocidad angular	65
Figura 36. Magnitud de esfuerzos con agitador de 90 rpm a través del tiempo.	66
Figura 37. Magnitud de esfuerzos con agitador de 60 rpm a través del tiempo.	67
Figura 39. Esfuerzos en una mezcla con densidad de 970 kg m ⁻³	70
Figura 40. Nivel de líquido en el biodigestor, alcanza y sumerge el agitador.	71
Figura 42. Esfuerzos en una mezcla con densidad de 781.25 kg m ⁻³	72
Figura 43. Nivel de líquido en el biodigestor, sumerge el agitador y desborda el líquido.	73

ABREVIATURAS

1D	Una dimensión
3D	Tres dimensiones (x, y, z)
ABR	Reactor anaeróbico con deflectores
ADM1	Modelo de Digestión Anaeróbica No.1
AGCL	Ácidos grasos de cadena larga
AGVs	Ácidos grasos volátiles
CAD	Diseño asistido por computadora
CFD	Dinámica de fluidos computacionales
DA	Digestión anaerobia
EBA	Asociación europea de biogás
EDAR	Estación depuradora de aguas residuales
EDP	Ecuaciones diferenciales parciales
G	Geometrías del biodigestor
Lagrangiano	Seguimiento de partículas en un flujo de fluidos.
MVF	Método de volumen finito
PIMPLE	Algoritmo para resolver ecuaciones de Navier-Stokes de flujo transitorio y estable.
S	Simulaciones
ST	Sólidos totales
TRH	Tiempo de retención hidráulica
TRS	Tiempo de retención de sólidos
TWh	Teravatios-hora (unidad de energía)

NOMENCLATURA

A	Matriz de coeficientes
A	Matriz diagonal de A
A_f	Área superficial de la celda
b	Vector fuente
Co	Numero de Courant
du/dy	Razón de deformación o gradiente de velocidad
g	Aceleración gravitatoria
H	Matriz triangular superior e inferior de A
k	curvatura de la tensión superficial
m_a	Masa del agua
m_e	Masa del estiércol
\hat{n}_f	Vector normal a la cara
p	Presión
r	Residual representativa
r	Residual total
S	Término fuente
t	Tiempo
Δt	Paso de tiempo
u	Vector velocidad
U	Velocidad
U_f	Velocidad en una cara de la celda
U_t	Velocidad numérica
V_a	Volumen del agua
V_e	Volumen del estiércol
V_p	Volumen de la celda
Δx	Tamaño de la celda
∇	Gradiente o derivadas parciales en x, y, z
∂	Derivada parcial
Alfabeto griego	
α	Factor de relajación
γ	Coefficiente de tensión superficial
θ	Fracción de fase líquida
μ	Viscosidad dinámica
ν	Viscosidad cinemática
ρ	Densidad global en el solucionador
ρ_1	Densidad del líquido
ρ_2	Densidad del gas
σ	Esfuerzo normal
σ_s	Tensión superficial
σ_{xx}	Esfuerzo normal (superficie perpendicular al eje x de volumen de control diferencial) generada por una fuerza con dirección en el eje x

σ_{yx}	Esfuerzo cortante (superficie perpendicular al eje y de volumen de control diferencial) generada por una fuerza con dirección en el eje x
σ_{zx}	Esfuerzo cortante (superficie perpendicular al eje z de volumen de control diferencial) generada por una fuerza con dirección en el eje x
σ_{ij}	Tensor de esfuerzos (esfuerzos de presión y esfuerzos viscosos)
τ	Esfuerzo cortante
ϕ	Variable generaliza que representa cualquier campo
ϕ_{nuevo}	Valor nuevo
ϕ_{ant}	Valor anterior
ϕ_{calc}	Valor calculado

Subíndices

b	Número de fila
f	Superficie
i	iésima celda
ij	Componentes del tensor de esfuerzos
n	Número de columna
N	Número de ecuaciones o número de celdas de la malla
P	Representa una sola celda cualquiera
s	Que actúa en una superficie
t	Valor numérico o teórico
xx	Superficie perpendicular al eje x de volumen de control diferencial
yx	Superficie perpendicular al eje y de volumen de control diferencial
zx	Superficie perpendicular al eje z de volumen de control diferencial
1	Fase líquida
2	Fase gaseosa

RESUMEN

Los biodigestores son una solución eficaz para la generación de energía, contribuyendo significativamente a la reducción de la contaminación ambiental. Su implementación a gran escala es predominante en países desarrollados, especialmente en Europa y Asia. Sin embargo, en América, su adopción enfrenta desafíos sociales y económicos que dificultan su expansión, lo que hace esencial el desarrollo de diseños más eficientes para el tratamiento de desechos y la producción de energía.

La eficiencia de un biodigestor anaeróbico depende de la geometría y las variables hidrodinámicas, que afectan la mezcla de sustratos y la distribución de fluidos, influyendo directamente en la producción de biogás. En este estudio, la geometría del biodigestor fue evaluada mediante dinámica de fluidos computacionales (CFD, por sus siglas en inglés), utilizando el solucionador *interFoam* de *OpenFOAM*. Las simulaciones se realizaron en una estación de trabajo Dell 7920, con 36 núcleos en simulación paralela.

Se llevaron a cabo simulaciones transitorias para analizar patrones de flujo en geometrías con y sin agitación mecánica, asumiendo una mezcla de fluido newtoniano y considerando diversas densidades del líquido y las propiedades reales del biogás. Los resultados indicaron que una geometría con agitación mecánica y una elevación del agitador de 20 cm proporciona una mezcla más eficiente que una elevación de 10 cm, además de generar mayores velocidades que en geometrías sin agitación. La homogeneidad de la mezcla se optimizó, alcanzando velocidades máximas de 0.95 m s^{-1} a 60 rpm y 1.43 m s^{-1} a 90 rpm. En términos de esfuerzos, la geometría sin agitación registró 77.6 Pa, mientras que con agitación mecánica los esfuerzos alcanzaron 164.9 Pa en las aspas. Por lo tanto, se concluye que la geometría es una variable crítica que, junto con la elevación óptima del agitador, mejora la uniformidad de la mezcla y el rendimiento del biodigestor.

ABSTRACT

Biodigesters are an effective solution for energy generation, significantly contributing to the reduction of environmental pollution. Their large-scale implementation is predominant in developed countries, particularly in Europe and Asia. However, in the Americas, their adoption faces social and economic challenges that hinder expansion, making the development of more efficient designs for waste treatment and energy production essential.

The efficiency of an anaerobic biodigester depends on its geometry and hydrodynamic variables, which affect substrate mixing and fluid distribution, directly influencing biogas production. In this study, the geometry of the biodigester was evaluated through CFD simulations using the *interFoam* solver in *OpenFOAM*. The simulations were conducted on a Dell 7920 workstation with parallel processing across 36 cores.

Transient simulations were performed to analyze flow patterns in geometries with and without mechanical agitation, assuming a Newtonian fluid mixture and considering various liquid densities and the actual properties of biogas. The results indicated that geometry with mechanical agitation and an agitator elevation of 20 cm provided more efficient mixing than an elevation of 10 cm, while also generating higher velocities than in geometries without agitation. The homogeneity of the mixture was optimized, achieving maximum velocities of 0.95 m s^{-1} at 60 rpm and 1.43 m s^{-1} at 90 rpm. In terms of shear stress, the non-agitated geometry registered 77.6 Pa, whereas with mechanical agitation, the stresses reached 164.9 Pa on the blades. Therefore, it is concluded that geometry is a critical variable, and the optimal elevation of the agitator improves both the uniformity of the mixture and the performance of the biodigester.

INTRODUCCIÓN

Un biodigestor es un dispositivo cerrado y hermético en el que se lleva a cabo un proceso de biodigestión anaerobia, un mecanismo complejo facilitado por la actividad de un consorcio de bacterias. Este proceso convierte la materia orgánica en biogás y efluentes sólidos o líquidos, que, tras tratamientos específicos, pueden ser utilizados como fertilizantes en la agricultura. La digestión anaerobia (DA) se estructura en cuatro etapas fundamentales según el modelo de digestión anaerobia No. 1 (ADM1), considerado uno de los enfoques más avanzados en el campo: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

Durante la etapa de hidrólisis, la materia orgánica, compuesta por carbohidratos, lípidos y proteínas, se descompone en azúcares, ácidos grasos de cadena larga (AGCL) y aminoácidos mediante la acción de enzimas producidas por bacterias hidrolíticas. En la fase de acidogénesis, las bacterias acidogénicas metabolizan los productos generados en la hidrólisis para producir ácidos grasos volátiles (AGVs) e hidrógeno. La acetogénesis, tercera etapa del proceso implica la actividad de bacterias acetogénicas que generan hidrógeno y acetato, o una combinación de ambos. Finalmente, la metanogénesis se caracteriza por la participación de dos grupos de bacterias: las metanogénicas hidrogenotróficas, que consumen hidrógeno para producir metano, y las metanogénicas acetoclásticas, que utilizan acetato para la generación de metano.

La adecuada progresión de estas cuatro etapas de la DA depende críticamente de la disponibilidad de nutrientes específicos para las bacterias involucradas en cada fase. La falta de estos nutrientes comprometería la eficiencia del proceso. En biodigestores continuos de gran escala, el tiempo de retención hidráulica (TRH) es generalmente de un mínimo de 15 días, lo que significa que los productos de la hidrólisis pueden tardar en distribuirse completamente en ciertas zonas del digestor. Asimismo, durante la acidogénesis, los AGV generados deben distribuirse uniformemente para evitar la acidificación local y garantizar su disponibilidad para las bacterias que actúan en las fases subsecuentes.

La importancia de mantener una mezcla homogénea en el biodigestor no solo reside en la distribución adecuada de los nutrientes, sino también en la prevención de fenómenos adversos, como la formación de capas superficiales o espumas. La uniformidad de la mezcla puede asegurarse mediante un diseño geométrico apropiado del biodigestor, la recirculación de líquidos o gases, y la agitación mecánica. No obstante, la efectividad de los métodos de agitación puede variar según la geometría del sistema, lo que hace necesario realizar análisis teóricos detallados antes de implementar soluciones específicas, evitando así errores que podrían resultar costosos.

Un posible inconveniente asociado a los mecanismos de agitación es la generación de esfuerzos inducidos por la adición de fuerzas externas, lo que provoca resistencia al flujo del fluido. Los consorcios bacterianos presentes en la mezcla deben soportar estos esfuerzos, que pueden ser normales o cortantes. La capacidad de las bacterias para soportar dichos esfuerzos depende de su tipo, por lo que es crucial determinar la intensidad de la agitación, la relación de mezcla entre estiércol y agua, y la densidad del fluido, con el fin de optimizar la eficiencia del biodigestor.

El análisis teórico de estos dispositivos se realiza mediante CFD, una técnica que permite resolver ecuaciones diferenciales parciales (EDP) para modelar las variables que influyen en el funcionamiento del biodigestor. Los modelos matemáticos empleados en CFD permiten predecir el efecto de las variables hidrodinámicas y visualizar el flujo dentro del biodigestor. Para obtener los perfiles de velocidad, se resuelve la ecuación de Navier-Stokes, también conocida como la ecuación de cantidad de movimiento, que describe el comportamiento de una mezcla de fluidos dentro de un volumen de control. El número de ecuaciones a resolver depende de las variables consideradas en el funcionamiento del biodigestor.

Las ventajas del CFD incluyen la capacidad de visualizar el comportamiento de las variables operativas del biodigestor y realizar un gran número de simulaciones sin necesidad de experimentos costosos y prolongados antes de la construcción de un biodigestor. Sin embargo, también presenta desventajas, entre las que destacan el alto costo computacional y la necesidad de poseer un conocimiento profundo de los flujos, modelos matemáticos, modelos de turbulencia y lenguajes de programación. Una

configuración incorrecta de los solucionadores puede prolongar las simulaciones, aumentando así los costos computacionales.

HIPÓTESIS

La geometría y las variables hidrodinámicas influyen significativamente en la eficiencia de un biodigestor anaeróbico, afectando la mezcla de sustratos, la distribución de fluidos, y los esfuerzos a los que se somete a los microorganismos involucrados, lo que a su vez determina la eficacia de la producción de biogás.

OBJETIVOS

1.1 Objetivo General

Diseñar un biodigestor anaeróbico mediante la simulación de dinámica de fluidos computacional con el fin de optimizar las variables hidrodinámicas involucradas en el proceso de tratamiento de desechos provenientes de ganado bovino.

1.1.1 Objetivos Específicos

1. Construir geometrías y configuraciones del biodigestor para la modelación y simulación de dinámica de fluidos.
2. Generar el mallado de las geometrías, considerando el tiempo de cómputo adecuado para la confiabilidad de los datos.
3. Configurar los parámetros del algoritmo *PIMPLE* en el solucionador *interFoam* de *OpenFOAM*, específicamente el número de Courant, el corrector de presión y el corrector externo.
4. Realizar análisis hidrodinámico con las líneas de corriente, perfiles de velocidad y magnitud de esfuerzos en las diferentes geometrías.
5. Diseñar un biodigestor a partir de los análisis hidrodinámicos.

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Problemática Actual

La producción de bioenergía mediante la DA ha sido evaluada como una de las tecnologías más eficientes energéticamente y beneficiosas para el medio ambiente. A nivel mundial, la implementación de biodigestores a escala industrial es más frecuente en países desarrollados, particularmente en Europa. Según Weiland (2010) Alemania es el mayor productor de biogás a nivel mundial, debido al fuerte desarrollo de la agricultura y la implementación de plantas de biogás en granjas. De acuerdo con la Asociación Europea de Biogás (EBA, por sus siglas en inglés), la producción combinada de biogás y biometano en 2021 alcanzó los 196 TWh de energía (EBA, 2023).

En 2018, se instalaron más de 38 000 biodigestores domésticos en 17 países distribuidos entre Asia, África y América Latina. Asia contribuyó con la mayoría de los digestores instalados (más de 27 000 unidades), especialmente en Nepal, Vietnam, Bangladesh e Indonesia. En África, se instalaron más de 10 000 digestores, concentrándose la mayoría de las unidades en Etiopía, Kenia, Zambia y Burkina Faso. En contraste, los números en América Latina son significativamente menores (WBA, 2019).

En México, entre 2005 y 2010, se instalaron 720 biodigestores en el sector pecuario, acompañados de generadores de electricidad para autoconsumo. Sin embargo, con la finalización de los bonos de carbono en 2012, la construcción de nuevos biodigestores disminuyó drásticamente. En la actualidad, la mayoría de estos biodigestores se encuentran fuera de servicio. A pesar de que existe un potencial significativo para la producción de biogás en diversos sectores, la falta de subsidios ha impedido la explotación y promoción de esta tecnología (Gutiérrez, 2018).

2.2 Modelado de los bioprocesos

Los modelos fenomenológicos y explicativos son herramientas idóneas para comprender la naturaleza de los bioprocesos, ya que se fundamentan en las leyes y principios fundamentales de la química, física y biología. Estos modelos aplican ecuaciones de conservación y contienen información detallada sobre cada uno de los elementos presentes en el sistema (Ortega *et al.*, 2017). Debido a la complejidad de la DA, el modelado puede abordarse desde diversos enfoques, cada uno de ellos diseñado para analizar los procesos según el objetivo específico de la investigación. Las simulaciones existentes de efluentes suelen centrarse en los procesos de advección y dispersión, aunque los procesos reactivos también influyen significativamente en la dilución de contaminantes. La comprensión y optimización de estos bioprocesos ha sido el foco principal de varios estudios, y el enfoque de modelado mecanicista, tanto para simular la cinética del proceso como la dinámica de fluidos, se ha aplicado extensamente para alcanzar estos objetivos (Sadino-Riquelme *et al.*, 2023). Por consiguiente, en esta área de investigación se sugiere fortalecer aún más el estudio de las reacciones de los contaminantes, con el fin de mejorar la precisión de las simulaciones numéricas (Mohammadian *et al.*, 2023).

2.3 Retos en la simulación de los bioprocesos

La integración de las cinéticas bioquímicas en las ecuaciones hidrodinámicas de un biodigestor anaeróbico representa una convergencia entre la ingeniería metabólica y la ingeniería de bioprocesos, conformando así un enfoque multidisciplinario. Si bien ambos campos se fundamentan en principios similares, existen diferencias significativas debido a la complejidad inherente de los microorganismos, los cuales requieren fuentes de nitrógeno y carbono para el crecimiento celular y la producción de metabolitos, respectivamente.

La reacción compleja de la mezcla en un biodigestor altera la hidrodinámica del sistema. Al considerar las especies químicas involucradas, el fluido resultante se comporta como un fluido no newtoniano, lo que ofrece una aproximación más precisa y realista del proceso. Sin embargo, actualmente falta una metodología estructurada

que permita la simulación completa de un biodigestor, considerando la interacción entre el entorno y los microorganismos (Ortega *et al.*, 2017). Las ecuaciones formuladas para describir el comportamiento de los procesos biológicos son, en su mayoría, relaciones empíricas (Wang *et al.*, 2022).

2.4 Análisis hidrodinámico de biodigestores.

El análisis mediante CFD reduce la necesidad de realizar un gran número de experimentos físicos. En CFD, es posible manejar tanto flujos laminares como turbulentos. Dentro del estudio de la turbulencia, existen diversos modelos; sin embargo, es importante destacar que ninguno de ellos es universal, por lo que la elección del modelo varía según el campo de investigación.

Para un fluido newtoniano incompresible en flujo estacionario y laminar, el movimiento del fluido se describe mediante las ecuaciones de continuidad (conservación de la masa) y la ecuación de Navier-Stokes (balance de cantidad de movimiento), representadas respectivamente por las ecuaciones (1) y (2).

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) - \nabla \cdot (\nu \nabla \mathbf{u}) = -\nabla p \quad (2)$$

La aplicación de EDP permite modelar con precisión el flujo de fluidos, fundamentándose en las leyes de conservación asociadas a los fenómenos de transporte. Este enfoque de modelado ha sido ampliamente utilizado para analizar diversas variables de interés en la dinámica de fluidos, específicamente en los procesos de DA de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR). Entre estas variables se incluyen el efecto de los sistemas de mezcla, las condiciones de operación, las propiedades del fluido en los tiempos de mezcla, la aparición de zonas muertas y el consumo de energía.

En particular, CFD ha sido empleada para estudiar la mezcla en digestores anaeróbicos, dada la complejidad que el comportamiento no newtoniano del sustrato

introduce en la producción de biogás (Sadino *et al.*, 2018). A pesar de la importancia de la interacción entre la cinética y la dinámica de fluidos en la caracterización de los sistemas de tratamiento biológico, la integración de estos modelos sigue siendo limitada. El acoplamiento de modelos CFD con reacciones bioquímicas presenta desafíos debido a las limitaciones del enfoque euleriano, comúnmente utilizado para modelar estos sistemas. Se sugiere que el enfoque lagrangiano podría superar las dificultades numéricas y el alto costo computacional asociados con los modelos acoplados (Dabiri *et al.*, 2023).

La CFD se reconoce como una herramienta robusta para la simulación del flujo de fluidos mediante el método de volumen finito (MVF). No obstante, la resolución de los balances de cantidad de movimiento y las ecuaciones de continuidad en cada elemento de la geometría discretizada puede convertirse en una tarea computacionalmente costosa (Tajsoleiman *et al.*, 2019). Li *et al.* (2022) analizaron la hidrodinámica de varios digestores anaeróbicos con diferentes configuraciones geométricas, hallando que las propiedades reológicas de la mezcla eran no newtonianas, y que el índice de consistencia aumentaba con el incremento de los sólidos totales (ST) de la mezcla. Además, observaron que la agitación, realizada mediante gas con boquillas orientadas a 45° respecto a la tangente de la pared del biodigestor, resultaba efectiva.

Blanco *et al.* (2020) llevaron a cabo un análisis hidrodinámico de un reactor anaeróbico con deflectores (ABR, por sus siglas en inglés) utilizando *OpenFOAM*. Configuraron las geometrías con y sin deflector, observando que el campo de velocidad era aproximadamente 10 veces menor en la configuración sin deflector. En un estudio de Sarathai *et al.* (2010) evaluó la viabilidad de utilizar un ABR como sistema de tratamiento de aguas residuales *in situ*, encontrando que el reactor tendía a comportarse como completamente mezclado a medida que aumentaban los factores de flujo.

La mayoría de los estudios sobre biodigestores utilizando CFD se centran en la agitación mecánica, con pocos enfoques alternativos en la literatura. Qi *et al.* (2013) investigaron un ABR donde la agitación se debía exclusivamente a la liberación de gas almacenado, mientras que Leonzio (2018) exploró la recirculación de líquido como

mecanismo de agitación, encontrando que este método era efectivo cuando el líquido ingresaba tangente a las paredes del biodigestor.

2.5 Influencia de la mezcla en la eficiencia de los biodigestores

El proceso y la eficiencia de la DA están determinados por diversos factores, entre los que se incluyen la geometría del reactor, la configuración de la alimentación, la carga diaria, el pH, la temperatura, el potencial redox, el TRH, el tiempo de retención de sólidos (TRS) y la mezcla dentro del biodigestor (Kress *et al.*, 2018; Meroney, 2009; Nandi *et al.*, 2017; Terashima *et al.*, 2009). El contenido de un biodigestor puede ser mezclado mediante diversos métodos, como la recirculación de fluidos, la agitación mecánica o combinaciones de estos, con el fin de mantener una mezcla homogénea y asegurar una distribución uniforme de nutrientes para las bacterias (Wiedemann *et al.*, 2017; Wu, 2014).

La ausencia de una agitación adecuada puede llevar a que las partículas ligeras floten, impidiendo el ascenso del biogás, mientras que las partículas pesadas y los grumos densos se precipitan en el fondo del biodigestor (Tian *et al.*, 2015). Esta estratificación, ya sea por sedimentación o flotación, reduce el volumen activo del digestor, provoca problemas mecánicos en las bombas e impulsores, obstruye la liberación de biogás desde la fase líquida y puede llevar a la formación de espuma, escoria y costras (Wiedemann *et al.*, 2017). De hecho, una mezcla inadecuada se considera un factor crucial en el fallo de los biodigestores (Karim *et al.*, 2004; Mendoza *et al.*, 2011; Wu, 2010a).

Por otro lado, Vavilin y Angelidaki (2005) demostraron que una mezcla desigual puede generar zonas de iniciación donde los metanógenos crecen y prosperan, permitiendo posteriormente que se extiendan al resto del digestor. Esta hipótesis ha sido confirmada por estudios posteriores (Lindmark *et al.*, 2014b; Zhang *et al.* 2016). Sin embargo, los problemas relacionados con la mezcla adecuada e inadecuada en DA continúan siendo objeto de debate, especialmente en cuanto a la viabilidad económica de lograr una homogeneidad completa en términos de eficiencia energética (Kress *et al.*, 2018; Nandi *et al.*, 2017). Las desventajas de los biodigestores de tanque agitado incluyen un alto costo de inversión, así como los costos operativos y de mantenimiento

asociados al equipo de mezcla. Se estima que la demanda energética para la mezcla en biodigestores a gran escala varía entre el 8 % y el 58 % de la demanda total de energía (Kowalczyk *et al.*, 2013; Kress *et al.*, 2018; Lemmer *et al.*, 2013). Estas variaciones en la eficiencia energética se deben al tipo de sustrato, al contenido de ST, a las geometrías de los tanques, a los tipos de mezcla y a sus orientaciones, así como al modo de operación de la mezcla (Wiedemann *et al.*, 2017; Wu, 2012).

La rentabilidad de la DA puede mejorar si se maximiza la producción de energía por unidad de sustrato tratado, minimizando simultáneamente los costos operativos y de capital (Kaparaju & Rintala, 2008; Kress *et al.*, 2018). Una alternativa al proceso de mezclado continuo es la mezcla intermitente, que reduce la demanda energética y genera un ambiente más favorable para los microorganismos (Gómez *et al.*, 2006; Lindmark *et al.*, 2014a; Rico *et al.*, 2011). Es importante señalar que el mezclado debe coincidir con la alimentación para distribuir los nutrientes y luego realizar una mezcla ocasional (Wiedemann *et al.*, 2017).

Una intensidad de mezcla excesiva puede generar remolinos y dañar las células. Hoffmann *et al.* (2008) afirman que, a 1500 rpm, se destruye el consorcio microbiano, limitando la relación sintrófica y reportando la ausencia de bacterias metanogénicas después de un período de mezclado a esta intensidad. La integración de deflectores también aumenta la tasa de corte dentro de los biodigestores (Khanchezar *et al.*, 2019). Wu (2010b) encontró que la mezcla es más eficiente en biodigestores con forma de huevo que en geometrías cilíndricas, y que existe una posición óptima para los agitadores en geometrías específicas. Trad *et al.* (2016) compararon tres métodos de mezcla y los resultados indicaron que la mezcla por recirculación de gases es menos efectiva que la recirculación con bomba, y aún menos que la mezcla mecánica, la cual presenta un nivel de cizallamiento más bajo. No obstante, la mezcla mecánica mostró una mejor homogeneidad en menor tiempo y una adecuada transferencia de masa, especialmente con fluidos no newtonianos, por lo que debería preferirse para un diseño optimizado, como lo sugiere (Wu, 2010a).

De Jesus *et al.* (2017) evaluaron la transferencia de masa hidrodinámica y el rendimiento energético en cuatro biorreactores: columna de burbujas, *airlift*, tubo concéntrico agitado por aire y tanque agitado mecánicamente, utilizando fluidos

viscosos newtonianos y no newtonianos. Encontraron que el menor consumo energético se obtuvo en los biorreactores de columna de burbujeo y *airlift*. Sin embargo, la mezcla mecánica proporcionó una mejor homogeneidad del contenido del biodigestor. Meroney & Sheker (2014) señalan que la agitación mecánica es la opción más adecuada para fluidos newtonianos y no newtonianos de alta viscosidad.

El estudio de Karim *et al.* (2004) demostró que una baja velocidad superficial del gas en la entrada (0.4, 0.8, 1.2 m s⁻¹) provoca estancamiento en el fondo y cerca de las paredes, mientras que la zona superior cerca del tubo de aspiración se encontraba bien mezclada debido a la ruptura de las burbujas. A medida que aumentaba la velocidad superficial del gas, disminuía el porcentaje de zonas muertas. Shen *et al.* (2013) determinaron la intensidad de mezclado óptima para maximizar la producción de biogás a partir de paja de arroz en un biodigestor con 65 kg m⁻³ de ST. Encontraron que una velocidad de mezclado de 80 rpm incrementaba la producción acumulada de biogás en un 23.6 %. Este estudio respalda la idea de que existe una intensidad de mezcla óptima para la producción de biogás en cada configuración de biodigestor.

2.6 Esfuerzos en los fluidos.

En un fluido en movimiento, se pueden identificar dos tipos principales de esfuerzos: el esfuerzo normal (σ), que es generado por la componente normal de una fuerza que actúa sobre una superficie, y el esfuerzo cortante (τ), que se produce debido a la componente tangencial de una fuerza aplicada sobre una superficie. Aunque la representación simbólica varía al utilizar el tensor de esfuerzos (σ_{ij}), es común utilizar únicamente el símbolo σ , acompañado de subíndices ij para representar las nueve componentes del tensor. En la Figura 1 se muestran las fuerzas en el eje x, donde σ_{xx} representa el esfuerzo normal, mientras que, σ_{yx} y σ_{zx} corresponden a los esfuerzos cortantes.

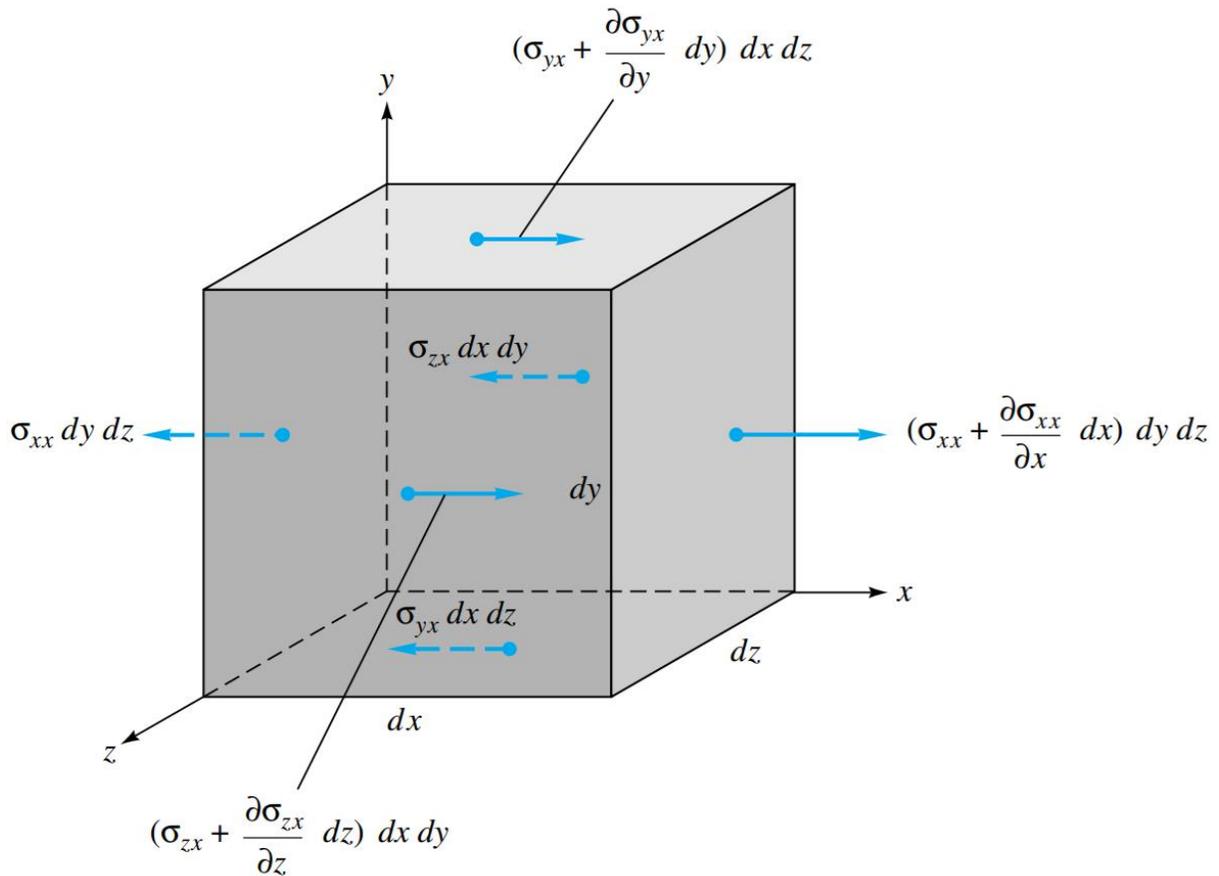


Figura 1. Volumen de control que muestra las fuerzas superficiales únicamente en el eje x (adaptada de White, 2001).

Es importante destacar que las paredes de un recipiente no ejercen esfuerzos cortantes. En consecuencia, en un fluido en reposo, el esfuerzo cortante es nulo, a menos que actúe una fuerza externa, en cuyo caso la situación cambia (Cimbala y Cengel, 2001). Cabe señalar que un fluido, bajo la influencia de un esfuerzo cortante, nunca deja de deformarse, sin importar cuán pequeño sea dicho esfuerzo. La ecuación (3) se utiliza para calcular el esfuerzo cortante en una dimensión (en la dirección x) y se refiere a la acción de una fuerza actuando sobre una de las superficies del volumen de control.

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (3)$$

Donde μ es la viscosidad dinámica, du/dy es la razón de deformación o gradiente de velocidad.

Según lo expuesto, los esfuerzos pueden ser beneficiosos o perjudiciales en contextos biológicos, dependiendo de la naturaleza del problema a resolver. Por ejemplo, Polgár *et al.* (2022) aplicaron estrés mecánico en reactores de cavitación hidrodinámica para reducir colonias bacterianas de *Legionella pneumophila*, logrando una eficiencia de eliminación del 99.98%.

En contraste, en biodigestores de digestión anaeróbica (DA) con agitación mecánica, es crucial controlar la intensidad de la agitación, ya que un incremento en la intensidad puede ser desfavorable debido al aumento de los esfuerzos. En un estudio de Lebranchu *et al.* (2017) a través de simulaciones con CFD, evaluaron el impacto del esfuerzo cortante en la producción de biogás y encontró que, independientemente de la geometría del agitador, un aumento en las revoluciones por minuto (rpm) incrementa la magnitud de los esfuerzos, lo que resulta en una disminución de la producción de metano.

Por otro lado, Verma *et al.* (2019) reportaron, en el contexto de la producción de microalgas para biocombustibles, que las microalgas pueden tolerar esfuerzos cortantes de 1.97 Pa (a 75 rpm) hasta 3.96 Pa (a 150 rpm). Estos hallazgos permitieron definir las condiciones de agitación óptimas para el crecimiento de microalgas.

2.7 Herramientas de modelado y simulación.

La tecnología actual permite la simulación de bioprocesos complejos, facilitando la obtención de diseños optimizados en términos de geometría y configuración, lo que a su vez minimiza los costos de instalación y mantenimiento. En el ámbito de la simulación hidrodinámica, existen varios paquetes de CFD. Entre los más destacados se encuentran *ANSYS Fluent* y *COMSOL Multiphysics*, ambos de licencia comercial, y *OpenFOAM*, que es de código abierto.

Cada uno de estos programas ofrece diversas funcionalidades y capacidades que pueden ser más adecuadas según el tipo de simulación requerida. *OpenFOAM*, en particular, permite a los usuarios acceder al código fuente y modificarlo conforme a sus necesidades específicas, ofreciendo una gran flexibilidad y capacidad para abordar problemas complejos. Sin embargo, su uso requiere habilidades avanzadas en programación y una comprensión profunda de los principios fundamentales de la CFD.

2.8 Control de soluciones y algoritmos CFD

2.8.1 El algoritmo *PIMPLE*

El algoritmo *PIMPLE* combina los algoritmos *PISO* y *SIMPLE*, como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 2. El algoritmo *PISO* se utiliza principalmente en simulaciones transitorias, mientras que *SIMPLE* se aplica a simulaciones estacionarias. Ambos algoritmos acoplan la ecuación de presión con la ecuación de cantidad de movimiento, diferenciándose en los ciclos iterativos y en el uso del factor de relajación. Al configurar los parámetros de corrección de presión (*ncorrectors*) y los correctores externos o ciclos iterativos (*noutercorrectors*) en uno, el algoritmo opera en modo *PISO*. Además, es necesario declarar un número de *Courant* menor que uno ($Co < 1$) y establecer el control residual en cada campo y en las ecuaciones para asegurar la convergencia de la solución (Greenshields, 2022).

Una simulación de estado estable con *PIMPLE* se configura con el número de *Courant* con un valor mucho mayor a uno ($Co \gg 1$), y el factor de relajación entre cero y uno ($0 \leq \alpha \leq 1$) con la finalidad de obtener una diagonal dominante en la ecuación matricial. Para flujos estacionarios los correctores de presión y los bucles se configuran con valores de 1 a 3 y de 50 a 1000, respectivamente (Holzmann, 2021).

El algoritmo *PIMPLE* es uno de los más utilizados cuando se tiene una simulación transitoria y la ventaja es que se puede utilizar números de *Courant* mayores a 1 ($Co \gg 1$), por ende, el paso del tiempo aumenta y el costo computacional disminuye. Las configuraciones del algoritmo en *OpenFOAM* se declaran en el diccionario *fvSolution* (ver Anexo 1). La configuración adecuada del *PIMPLE* es importante para garantizar la convergencia, de lo contrario, puede que diverja en los primeros pasos de tiempo o después de haber transcurrido mucho tiempo la simulación (Greenshields y Weller, 2022).

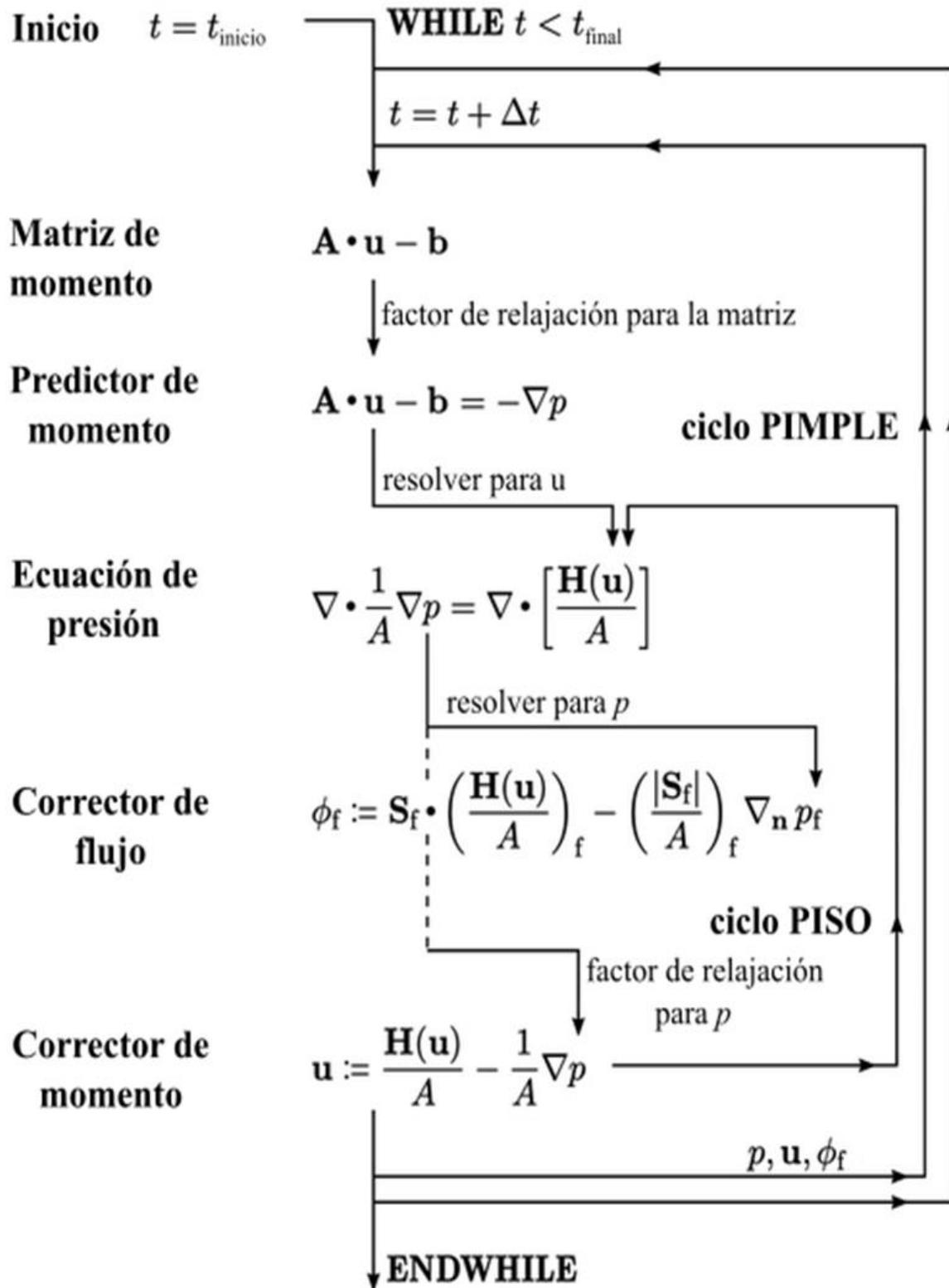


Figura 2. Diagrama del algoritmo PIMPLE (adaptada de Greenshields y Weller, 2022).

2.8.2 Número de Courant

Los pasos de tiempo en una simulación transitoria están limitados por el número de Courant (Co), es un criterio de convergencia, donde la velocidad física (U) no tiene que ser mayor a la velocidad numérica (U_t). Es decir, el flujo no tiene que avanzar más de una celda durante un paso de tiempo, como se muestra en la Figura 3. Si Co es mayor que uno, significa que el flujo se desplaza más de una celda en cada paso de tiempo, conduciendo a una solución errónea y divergente. Para lograr una solución convergente, Co generalmente es menor o igual a uno. En un flujo transitorio se deben calcular los pasos de tiempo cuidadosamente, ya que podría resultar valores grandes y perder información dentro del dominio computacional, de lo contrario, también puede ser valores muy pequeños, lo que llevaría a simulaciones largas y costosas (Sharma *et al.*, 2019). Los esquemas de tiempo implícito y semi-implícitos permiten el uso del número de Courant mayor a uno; sin embargo, no debe excederse en grandes áreas del dominio computacional, ya que esto puede generar resultados incorrectos. La velocidad numérica se obtiene a partir de la ecuación (4).

$$U_t = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (4)$$

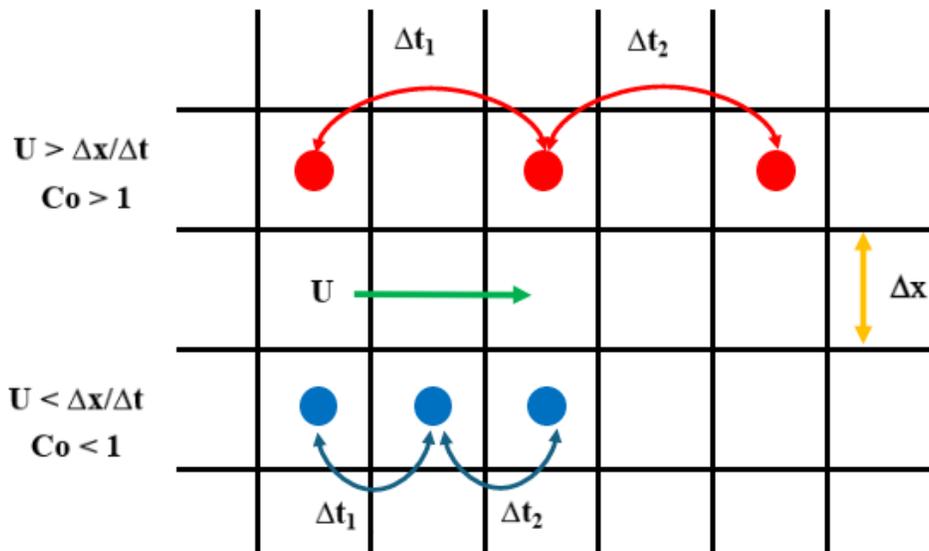


Figura 3. Criterio de convergencia de Courant.

La Figura 4 muestra un análisis del número de Courant en una dimensión (1D), calculado utilizando la ecuación (5)

$$Co = \frac{U\Delta t}{\Delta x} \quad (5)$$

Donde U indica la velocidad del flujo, Δt es un paso de tiempo representativo de la simulación y Δx el tamaño de la celda.

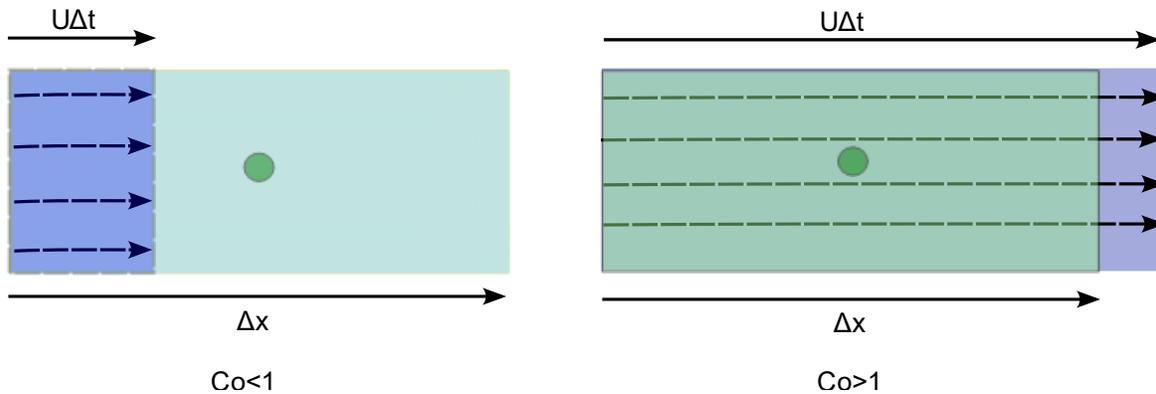


Figura 4. Análisis de número de Courant en una dimensión (adaptada de Wimshurst, 2020).

La ecuación (6) permite obtener el análisis del número de Courant en tres dimensiones (3D), considerando la velocidad como la suma de las velocidades ortogonales ($\sum_f |U_f \cdot \hat{n}_f|$) a las caras de una celda de la malla, tal como se ilustra en la Figura 5a.

$$Co = \frac{1}{2} * \Delta t * \frac{\sum_f |U_f \cdot \hat{n}_f| A_f}{V_p} \quad (6)$$

La longitud de la celda Δx se calcula como la relación entre su volumen V_p y el área superficial total A_f , utilizando las ecuaciones (7) y (8). Figura 5b ilustra gráficamente el cálculo de la superficie de una celda según la dirección del flujo. El factor constante $\frac{1}{2}$ se incluye para considerar los flujos en direcciones opuestas a través de las caras de la celda en una determinada dirección.

$$\Delta x = \frac{V_p}{A_f} \quad (7)$$

$$A_f = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_N \quad (8)$$

Dado que el número de Courant depende del tamaño de la celda, resulta crucial mantener una alta calidad en la malla.

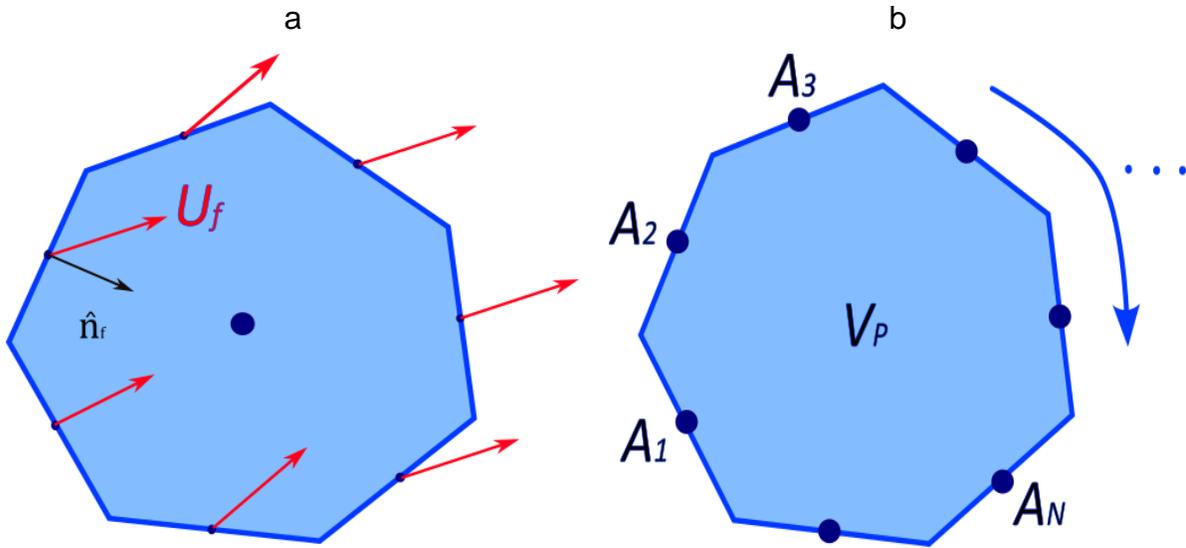


Figura 5. Análisis de Co en una celda 3D (adaptada de Wimshurst, 2020).

2.8.3 Convergencia

En el método de volúmenes finitos, la resolución de la ecuación matricial se lleva a cabo mediante métodos iterativos, los cuales se prefieren por su superior eficiencia en comparación con los métodos directos. Estos últimos implican un costo aproximadamente tres veces mayor que los iterativos. El dominio computacional, compuesto por N celdas, genera una matriz con N ecuaciones, correspondiendo una ecuación a cada celda, como se ilustra en la Figura 6. Cada ecuación incluye coeficientes nulos debido a que cada celda interactúa únicamente con dos celdas adyacentes.

Las condiciones iniciales declaradas se aplican en la solución de la primera ecuación para obtener un nuevo valor de una de las variables, el cual se sustituye en la siguiente ecuación, y así sucesivamente hasta resolver todas las ecuaciones, completando así la primera iteración. Este proceso se repite en sucesivas iteraciones hasta que se alcanza la convergencia. La convergencia se garantiza cuando la diagonal de la matriz es dominante. En simulaciones transitorias, la dominancia diagonal está asegurada por el criterio de convergencia (número de Courant). En simulaciones estacionarias, la ausencia de la derivada temporal elimina la dominancia diagonal, por lo que es necesario aplicar un factor de relajación (Greenshields y Weller, 2022).

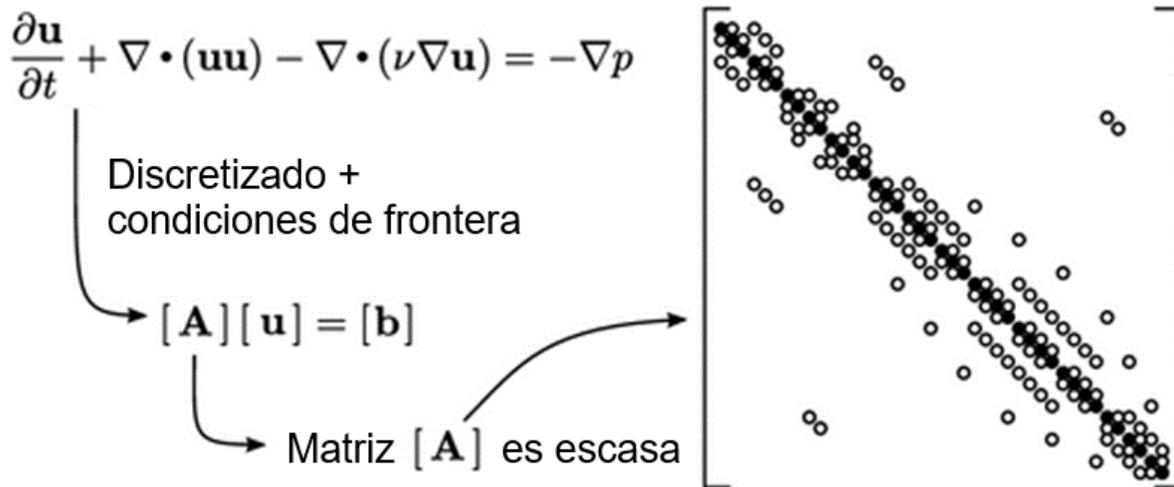


Figura 6. Discretización de la ecuación de cantidad de movimiento con N celdas (adaptada de Greenshields y Weller, 2022).

2.8.4 Factor de relajación y estabilidad

El factor de relajación es un método general que mejora la convergencia de la solución al limitar la magnitud de los cambios de una variable durante un paso de solución. Cuando la diferencia en la solución entre dos iteraciones es significativa, la simulación puede volverse inestable. Para estabilizar la solución, se emplea un factor de relajación ($0 \leq \alpha \leq 1$). A medida que el valor de α disminuye, la simulación se vuelve más estable, pero se requiere un mayor tiempo para alcanzar la convergencia, lo que incrementa el costo computacional (Moukalled *et al.*, 2015). La Figura 7 muestra una relajación explícita aplicada a los campos; en el recuadro se presenta un valor de $\alpha = 1/2$ como ejemplo ilustrativo para demostrar la influencia del factor de relajación.

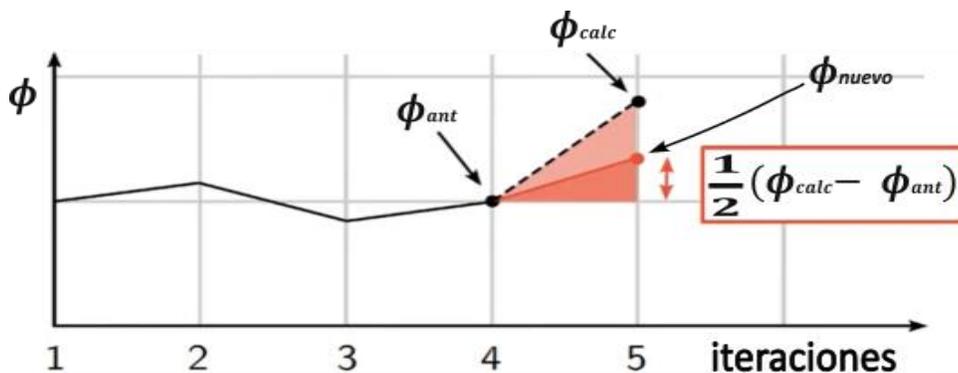


Figura 7. Factor de relajación en una celda de la malla (adaptada de Wimshurst, 2022).

El valor registrado en el nuevo paso de tiempo es determinado por la ecuación (9), donde ϕ representa una variable generalizada que puede corresponder a cualquier campo.

$$\phi_{nuevo} = \phi_{ant} + \alpha(\phi_{calc} - \phi_{ant}) \quad (9)$$

Cuando la ecuación matricial de los campos presenta inestabilidad, la aplicación de una relajación explícita puede resultar inadecuada. En tal situación, es preferible utilizar una relajación implícita, que consiste en aplicar un factor de relajación directamente a las ecuaciones. A continuación, se presentan la ecuación (10) para una celda P de la malla, en la que A representa los coeficientes de la matriz, y los subíndices n y b identifican la columna y la fila, respectivamente. S_p denota la fuente de la variable en la celda.

$$A_P \phi_P + \sum_{nb} A_{nb} \phi_{nb} = S_p \quad (10)$$

Al despejar la variable a calcular, se obtiene la siguiente ecuación.

$$\phi_P = \frac{1}{A_P} \left(- \sum_{nb} A_{nb} \phi_{nb} + S_p \right) \quad (11)$$

La ecuación (11), correspondiente a la variable calculada, se reescribe y adopta la siguiente forma, ecuación (12).

$$\phi_{calc} = \frac{1}{A_P} \left(- \sum_{nb} A_{nb} \phi_{nb} + S_p \right) \quad (12)$$

Al sustituir la ecuación (12) en la ecuación (9), se obtiene la ecuación (13) que determina el nuevo valor.

$$\phi_{nuevo} = \phi_{ant} + \alpha \left(\frac{1}{A_P} \left(- \sum_{nb} A_{nb} \phi_{nb} + S_p \right) - \phi_{ant} \right) \quad (13)$$

Al simplificar y reordenar los términos, se obtiene la ecuación (14), que representa la forma general para la relajación implícita.

$$\frac{A_P}{\alpha} \phi_P + \sum_{nb} A_{nb} \phi_{nb} = S_p + \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right) A_P \phi_{ant} \quad (14)$$

Los cálculos para un dominio computacional sin aplicar el factor de relajación se realizan utilizando la ecuación (15), que representa la forma matricial original. La ecuación (16) presenta la forma matricial relajada.

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & \dots & A_{1N} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & \dots & A_{2N} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & \dots & A_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{N1} & A_{N2} & A_{N3} & \dots & A_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \vdots \\ \phi_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ \vdots \\ S_N \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{A_{11}}{\alpha} & A_{12} & A_{13} & \dots & A_{1N} \\ A_{21} & \frac{A_{22}}{\alpha} & A_{23} & \dots & A_{2N} \\ A_{31} & A_{32} & \frac{A_{33}}{\alpha} & \dots & A_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{N1} & A_{N2} & A_{N3} & \dots & \frac{A_{NN}}{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \vdots \\ \phi_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 + \left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right) A_{11} \phi_{ant,1} \\ S_2 + \left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right) A_{22} \phi_{ant,2} \\ S_3 + \left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right) A_{33} \phi_{ant,3} \\ \vdots \\ S_N + \left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right) A_{NN} \phi_{ant,N} \end{bmatrix} \quad (16)$$

La relajación implícita mejora la estabilidad al aumentar la dominancia diagonal, lo que implica que el término diagonal de la ecuación de una celda debe ser significativamente mayor que la suma de los términos fuera de él (Versteeg y Malalasekera, 2007).

2.8.5 Control residual

Las soluciones sucesivas reducen los residuos en cada ecuación; cuanto menor sea el residuo, mayor será la precisión de la solución. En la práctica, no es posible calcular el error exacto en la solución debido a la ausencia de una solución exacta conocida. El residual proporciona una medida de la precisión de la solución. Se calcula un residual en cada celda de la malla. La ecuación (17) muestra un ejemplo del cálculo de una variable ϕ con un término fuente S en una malla de N celdas. La residual obtenida en cada iteración se representa como r en la ecuación (18), y se calcula según la norma elegida para los cálculos (Greenshields y Weller, 2022).

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & \dots & A_{1N} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & \dots & A_{2N} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & \dots & A_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{N1} & A_{N2} & A_{N3} & \dots & A_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \vdots \\ \phi_N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ \vdots \\ S_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ \vdots \\ r_N \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$r = \frac{\|\mathbf{r}\|_1}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N |r_i| \quad (18)$$

2.8.6 Tolerancias del solucionador

De acuerdo con el manual de usuario de *OpenFOAM* (2021), el solucionador se detiene al cumplirse cualquiera de las siguientes condiciones de tolerancia (ver Anexo 1):

1. El residuo desciende por debajo de la tolerancia establecida para el solucionador (tolerancia).
2. La relación entre el valor actual y los residuos iniciales disminuye por debajo de la tolerancia relativa del solucionador (relTol).
3. El número de iteraciones supera el máximo permitido (maxIter).

METODOLOGÍA

Se diseñaron dos geometrías iniciales, G1 y G2, que comparten las mismas dimensiones, salvo por la altura de la entrada influente: 10 cm para G1 y 30 cm para G2 desde el fondo del biodigestor. En ambas geometrías, se evaluó el efecto de las densidades de 781.25 kg m^{-3} y 877.19 kg m^{-3} . Los análisis de perfiles de velocidad y líneas de corriente demostraron que la geometría G1 ofrece una mayor eficiencia en el mezclado.

En la segunda etapa del proyecto de investigación, se modificó la geometría G1 añadiendo un agitador, generando así las geometrías G3 y G4. Estas nuevas geometrías mantuvieron las mismas dimensiones que G1, con la única diferencia en la altura del agitador: 20 cm para G3 y 10 cm para G4 desde el fondo del biodigestor. Se compararon perfiles de velocidad, líneas de corriente y magnitudes de esfuerzos (normales y cortantes) en cada análisis. El primer análisis en esta etapa evaluó el efecto de la agitación mecánica comparando G1 con G4. Posteriormente, se examinó el efecto de la elevación del agitador comparando G3 y G4. Finalmente, en G4 se analizó el efecto de la intensidad de la agitación (60 y 90 rpm) y el efecto de las densidades de 781.25 kg m^{-3} y 970 kg m^{-3} .

3.1 Modelado de CFD del sistema hidrodinámico

Para modelar la hidrodinámica, se requiere especificar la geometría del biodigestor, así como las entradas, salidas, condiciones iniciales y de frontera, mientras se resuelven las ecuaciones discretizadas de continuidad y cantidad de movimiento. En particular, el código utilizado para resolver estas ecuaciones emplea MVF, basado en la discretización de las ecuaciones diferenciales que rigen el sistema. Este enfoque permite evaluar las eficiencias de mezcla para diferentes configuraciones de biodigestor antes de su construcción, lo que ayuda a evitar altos costos de instalación y mantenimiento.

3.2 Diseño de geometría

Para el diseño de las geometrías, se utilizó el *Software SALOME*, versión 9.10.0, que proporciona un entorno de diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés). Se diseñaron dos configuraciones de biodigestor anaeróbico denominadas Geometría 1 (G1) y Geometría 2 (G2). Ambas geometrías presentan dimensiones idénticas y sólo difieren en la ubicación de la entrada del influente, como se detalla en el Cuadro 1. Sin un sistema de mezcla mecánica, la configuración de la entrada y salida busca lograr un movimiento continuo y homogéneo del fluido. Cada geometría incluye una entrada para el influente y dos salidas: una para el efluente y otra para el biogás.

Cuadro 1. Dimensiones de las geometrías.

Geometría del biodigestor anaeróbico	G1	G2
Diámetro menor plano xy	0.56 m	0.56 m
Diámetro mayor plano xy	0.60 m	0.60 m
Altura	0.87 m	0.87 m
Forma elíptica plano xz		
Diámetro de entrada y salidas	0.0508 m	0.0508 m
Volumen (aprox.)	0.230 m ³	0.230 m ³
Altura de la entrada	0.10 m	0.30 m
Altura de la salida	0.60 m	0.60 m

3.3 Diseño del agitador

Para el diseño del agitador, se utilizó SolidWorks 2022, un *Software CAD* especializado en el modelado mecánico en 2D y 3D, seleccionado por su capacidad para dibujar geometrías complejas, como la forma helicoidal de las aspas. El agitador se diseñó con un diámetro de 30 cm y una altura de 8 cm; para fines prácticos y para reducir los costos computacionales en la simulación, se omitió el eje del agitador. Tras analizar la ubicación de la entrada en las geometrías G1 y G2, se seleccionó la geometría que mostró los mejores resultados hidrodinámicos. Se procedió a ensamblar el agitador en esta geometría, dando lugar a las configuraciones de Geometría 3 (G3), con el

agitador situado a 10 cm de altura, y Geometría 4 (G4), con el agitador a 20 cm de altura, medidas desde el fondo del biodigestor hasta la cara inferior del agitador.

3.4 Mallado de las geometrías

El mallado se realizó utilizando la herramienta *Mesh* de SALOME, con el objetivo de optimizar la densidad de la malla y evitar gastos computacionales adicionales e innecesarios. Un mayor tamaño y complejidad de la geometría requieren una mayor densidad de malla y aumentan el tiempo de simulación. El dominio computacional de las geometrías se discretizó mediante el MVF con elementos tetraédricos. En las geometrías G1 y G2, la malla se diseñó con mayor finura en la entrada y las salidas, mientras que se empleó una malla menos fina en las áreas alejadas de estas regiones. En las geometrías G3 y G4, también se utilizó una malla fina en la región del agitador. Tras la generación de la malla, se exportó un archivo en formato UNV al directorio del proyecto, el cual se convirtió a un formato compatible con *OpenFOAM* siguiendo las instrucciones de la guía de usuario (*OpenFOAM*, 2021). Para las geometrías G1 y G2, se aplicó el algoritmo *NETGEN* con un tamaño mínimo de elementos de 0.02 y un tamaño máximo de 0.05. En G3 y G4, se usaron los mismos valores, salvo en la región del agitador, donde el tamaño mínimo de los elementos se ajustó a 0.001 y el tamaño máximo a 0.02. Además, se utilizó el mallado de marco de referencia múltiple (MRF, por sus siglas en inglés) para G3 y G4.

3.5 Solucionador *OpenFOAM*

Para la simulación hidrodinámica del biodigestor, se empleó el *Software OpenFOAM* v8, utilizando el solucionador *InterFoam*. Este solucionador se aplica a flujos multifásicos de dos fluidos incompresibles e inmiscibles isotérmicos mediante el método de volumen de fluido con un enfoque de captura de interfaz basado en la fracción de fase (*OpenFOAM*, 2021). *InterFoam* utiliza el algoritmo *PIMPLE*, lo que permite que el solucionador opere en modo de flujo estacionario o transitorio; para las simulaciones, se configuró en modo transitorio.

3.5.1 Modelo matemático del solucionador

En el análisis del biodigestor, el modelo matemático considera fluidos incompresibles, lo que implica que la densidad se mantiene constante tanto espacial como temporalmente. En consecuencia, la ecuación de continuidad se simplifica y se expresa como se muestra en la ecuación (19).

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (19)$$

La ecuación (20) corresponde a la ecuación de cantidad de movimiento.

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij}) + \rho g_i + \sigma_{si} \quad (20)$$

Donde u representa la velocidad, g la aceleración gravitatoria, p la presión, τ el esfuerzo cortante, y σ_s la tensión superficial.

La tensión superficial (σ_s) se determina mediante la ecuación (21).

$$\sigma_s = \gamma k \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \quad (21)$$

La densidad global se calcula utilizando la ecuación (22).

$$\rho = \theta \rho_1 + (1 - \theta) \rho_2 \quad (22)$$

El valor de θ varía entre 0 y 1, ya que representa la fracción de agua en el dominio computacional, donde ρ_1 es la densidad de la fase líquida y ρ_2 es la densidad de la fase gaseosa. Según Heyns y Oxtoby (2014) la curvatura de la tensión superficial se aproxima mediante la ecuación (23).

$$k = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\frac{\partial \theta}{\partial x_i}}{\left| \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right|} \right) \quad (23)$$

En la interfaz líquido-gas, la ecuación (24) se utiliza para la conservación de los componentes de la mezcla.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial (\theta u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (24)$$

3.5.2 Fluido de trabajo del biodigestor

De acuerdo con el solucionador seleccionado, se definieron el agua y el aire como fluidos de trabajo, aproximando sus densidades a las de una mezcla de estiércol-agua y biogás, respectivamente. La densidad del estiércol vacuno es 640 kg m^{-3} (Barbazán *et al.*, 2011) y la del biogás es 1.2 kg m^{-3} (Deublein & Steinhauser, 2011). Considerando una densidad del agua de 1000 kg m^{-3} y una relación de mezcla estiércol-agua de 1:1 (FAO, 2011), se calculó la densidad de la mezcla usando la ecuación (25), obteniendo un valor de 781.25 kg m^{-3} . Para biodigestores de flujo continuo, se recomienda una relación de mezcla de 1:3 de estiércol-agua, con una densidad de 877.19 kg m^{-3} , para evitar la formación de natas en la superficie y prevenir el atasco por exceso de materia sólida (Martí, 2008). Además, se incluyen las propiedades de otra mezcla basada en datos experimentales, con una densidad de 970 kg m^{-3} , viscosidad cinemática de $4.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ y tensión superficial de 0.06 N m^{-1} . Para las dos primeras densidades, se utilizó la viscosidad cinemática y la tensión superficial del agua, cuyos valores se detallan en el Cuadro 2.

Densidad de una mezcla

$$\rho_1 = \frac{m_e + m_a}{V_e + V_a} \quad (25)$$

Donde:

m_e = masa del estiércol

V_e = volumen del estiércol

m_a = masa del agua

V_a = volumen del agua

Cuadro 2. Propiedades de la simulación G1 y G2.

Geometría	Simulación	variables		
		ρ_1 (kg m^{-3})	ν ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$)	σ_s (N m^{-1})
G1	S1	781.25	1×10^{-6}	0.07
G1	S2	877.19	1×10^{-6}	0.07
G2	S3	781.25	1×10^{-6}	0.07
G2	S4	877.19	1×10^{-6}	0.07

3.5.3 Condiciones de frontera y valores iniciales

Las condiciones de frontera e iniciales son consistentes en todas las simulaciones. La velocidad en las paredes se establece en cero mediante la condición de no deslizamiento. En la entrada y salida del efluente, la velocidad tiene un valor fijo de 0.5 m s^{-1} , perpendicular a la pared lateral del biodigestor. Cabe señalar que esta magnitud no se ajusta al volumen del biodigestor. Las propiedades de la mezcla líquida para las primeras cuatro simulaciones se detallan en el Cuadro 2, mientras que las propiedades de la fase gaseosa permanecen constantes en todas las simulaciones. La simulación 1 y la simulación 2 corresponden a la geometría G1, y la simulación 3 y la simulación 4 corresponden a la geometría G2.

Se realizaron simulaciones con G1 y G3 para analizar el comportamiento hidrodinámico en una geometría con y sin agitación mecánica. Se compararon los perfiles de velocidad y la magnitud de los esfuerzos. Las propiedades de la mezcla se presentan en el

Cuadro 3.

Cuadro 3. Propiedades de la mezcla para la simulación con G1 y G3.

Geometría	Simulación	Variables				
		$\rho_1(\text{kg m}^{-3})$	$v(\text{m}^2 \text{s}^{-1})$	$\sigma_s (\text{N m}^{-1})$	rpm	Altura de agitador (cm)
G1	S5	970	4.8×10^{-4}	0.06	No	No
G3	S6	970	4.8×10^{-4}	0.06	60	10

En una geometría con agitación, la mezcla se desplaza a mayores velocidades. Sin embargo, es crucial conocer la ubicación del agitador para garantizar una distribución uniforme de la mezcla y la magnitud de la velocidad. Se propuso la simulación con G3 y G4, manteniendo las mismas propiedades de la mezcla (ver Cuadro 4) en ambas simulaciones, con la única diferencia en la elevación del agitador.

Cuadro 4. Diferente elevación del agitador.

Geometría	Simulación	Variables				
		$\rho_1(\text{kg m}^{-3})$	$v(\text{m}^2 \text{s}^{-1})$	$\sigma_s (\text{N m}^{-1})$	rpm	Altura de agitador (cm)
G3	S6	970	4.8×10^{-4}	0.06	60	10
G4	S7	970	4.8×10^{-4}	0.06	60	20

Otro factor que puede influir en las variables hidrodinámicas y la magnitud de los esfuerzos en un biodigestor con agitación mecánica es la velocidad de revoluciones del agitador. Este factor puede tener un efecto positivo en la velocidad o un efecto negativo en los esfuerzos. Por lo tanto, se propusieron dos simulaciones adicionales con la geometría G4, cuyas configuraciones se detallan en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Simulaciones con diferentes revoluciones del agitador.

Geometría	Simulación	Variables				
		$\rho_1(\text{kg m}^{-3})$	$v(\text{m}^2 \text{s}^{-1})$	$\sigma_s (\text{N m}^{-1})$	rpm	Altura de agitador (cm)
G4	S8	781.25	1×10^{-6}	0.07	90	20
G4	S9	781.25	1×10^{-6}	0.07	60	20

Para evaluar el efecto de la densidad en la velocidad y en los esfuerzos, se compararon las simulaciones 7 y 9 (ver Cuadro 6).

Cuadro 6. Simulaciones con diferente densidad.

Geometría	Simulación	Variables				
		$\rho_1(\text{kg m}^{-3})$	$v(\text{m}^2 \text{s}^{-1})$	$\sigma_s (\text{N m}^{-1})$	rpm	Altura de agitador (cm)
G4	S7	970	4.8×10^{-4}	0.06	60	20
G4	S9	781.25	1×10^{-6}	0.07	60	20

3.5.4 Control de tiempo

Todas las simulaciones se realizaron bajo condiciones transitorias y de flujo laminar. En las simulaciones 1 a 4, el algoritmo *PIMPLE* se ejecutó en modo PISO, configurado con tres correcciones para la presión y un corrector externo para la velocidad. El cálculo iterativo se consideró convergente cuando todos los residuos alcanzaron las tolerancias especificadas en el archivo fvSolution (ver Anexo 1). Las simulaciones se configuraron para 300 s de funcionamiento, con un paso de tiempo de 0.01 s y un registro de datos cada 0.05 s. Es importante destacar que el paso de tiempo se ajusta automáticamente según la configuración de maxCo (ver Anexo 3). Para estas simulaciones, se utilizó un CPU con procesador Intel Core i7, operando en un solo núcleo.

En las simulaciones 5 a 9, el algoritmo *PIMPLE* se configuró en modo transitorio, funcionando como *PIMPLE* con una corrección para la presión y tres correcciones para la velocidad (ver Anexo 2). Se aumentó el valor de maxCo a tres debido a la complejidad de las geometrías G3 y G4 y la simulación con MRF. Estas simulaciones requirieron el uso de una Torre de Precisión Dell 7920, ejecutando simulaciones paralelas con 36 núcleos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Geometría del biodigestor

La Figura 8 presenta las dos geometrías desarrolladas utilizando la herramienta *Geometry* del programa SALOME. La geometría G1 tiene la forma de un barril, como se muestra en la Figura 8 a. Esta geometría cuenta con una única entrada para el influente, una salida para el biogás y otra para el efluente. La geometría G2 posee las mismas formas y dimensiones que G1, pero con una ubicación diferente para la entrada del influente; en G1, la entrada se sitúa a 10 cm del fondo del biodigestor, mientras que en G2 se encuentra a 30 cm del fondo, como se observa en la Figura 8 b.

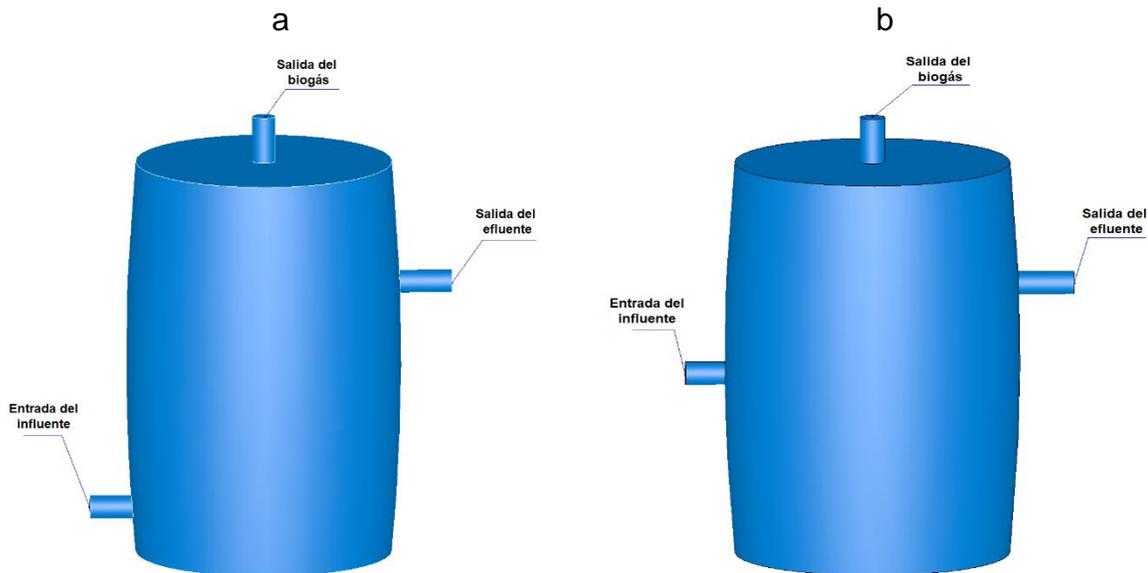


Figura 8. Geometrías del biodigestor anaeróbico en 3D. a) Geometría G1 y b) Geometría G2.

Tras procesar los resultados de las simulaciones 1 a 4, G1 mostró un mejor desempeño en el mezclado, según los perfiles de velocidad y las líneas de corriente presentadas en la Figura 14. Por lo tanto, se seleccionó G1 para incorporar el agitador (Figura 9), cuyo diseño se realizó en *SolidWorks 2022* debido a su capacidad para modelar geometrías complejas, como las aspas helicoidales del agitador. El agitador y G1 se ensamblaron en la herramienta *Geometry* de SALOME 9.10.0 para obtener

las nuevas geometrías G3 (Figura 10a) y G4 (Figura 10b). A continuación, se procedió al mallado de estas geometrías.

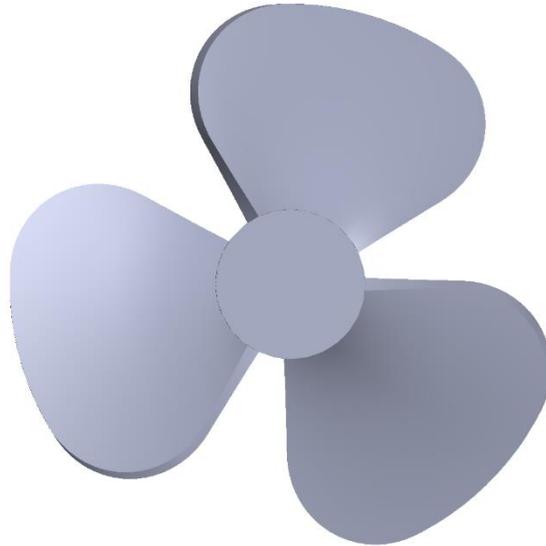


Figura 9. Geometría del agitador.

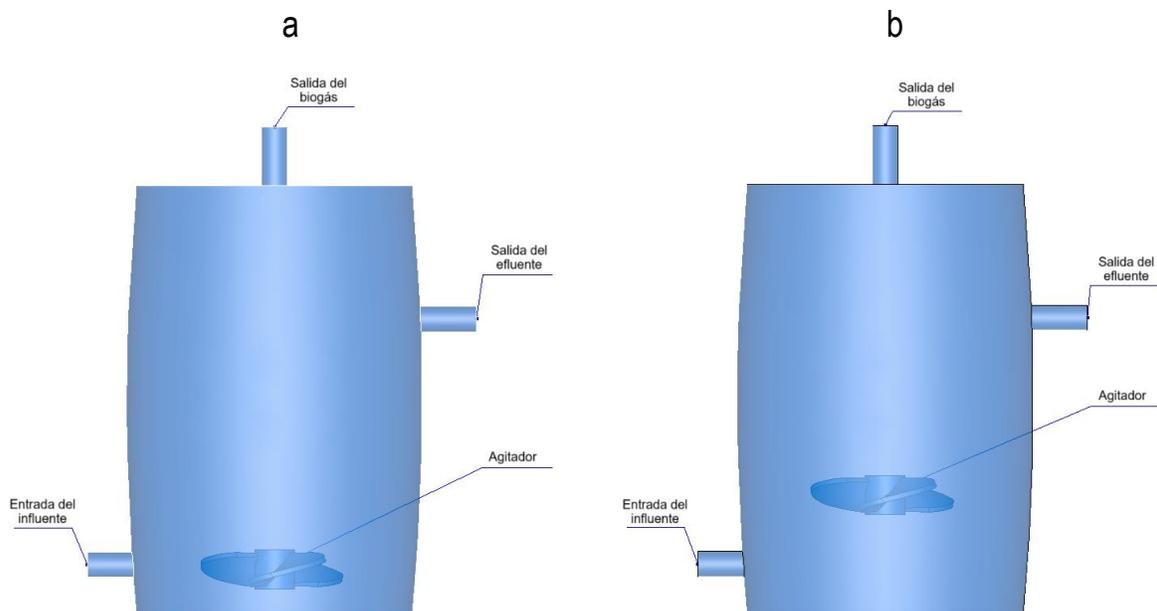


Figura 10. Geometrías del biodigestor anaeróbico con agitador en 3D. a) Geometría G3 y b) Geometría G4.

4.2 Mallado de la geometría del biodigestor

La Figura 11 muestra el dominio computacional para las geometrías G1 y G2. Los dominios computacionales de G1 (Figura 11a) y G2 (Figura 11b) se discretizaron en 9897 y 9660 elementos de malla tetraédricos, respectivamente. Los tamaños máximo y mínimo de los elementos son 0.05 m y 0.002 m, respectivamente, ambos considerados como tamaño fino. El proceso de mallado para G1 y G2 requirió 2 s, utilizando una PC Dell con procesador Intel Core i7 de un solo núcleo. Se evaluaron distintas configuraciones de mallado para seleccionar la que requirió menos recursos computacionales. Aunque un mallado más fino mejora la precisión de las aproximaciones, también incrementa el tiempo de simulación.

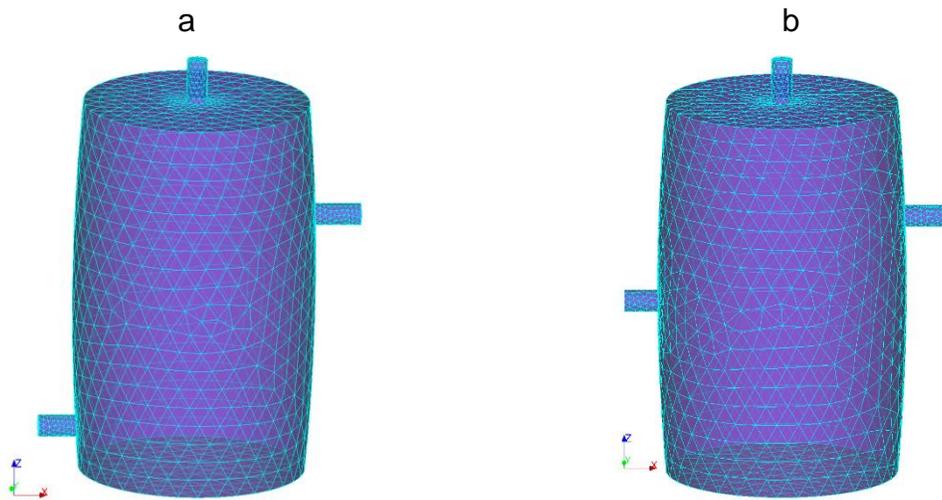


Figura 11. Mallado de la geometría del biodigestor anaeróbico en 3D. a) Geometría G1 y b) Geometría G2.

El mallado de la geometría G3 se realizó en dos etapas separadas: una malla para el agitador y otra para el biodigestor. El mallado del agitador tomó 22 s y produjo 145 420 elementos tetraédricos, mientras que el mallado del biodigestor requirió 5 s para obtener 19 343 elementos tetraédricos. En *OpenFOAM*, las dos mallas se combinaron utilizando el procedimiento descrito en el Anexo 4, resultando en un total de 164 763 elementos tetraédricos (Figura 12a). Para la geometría G4, el mallado del agitador tomó 15 s y generó 145 574 elementos tetraédricos, y el mallado del biodigestor duró 4 s con 22 874 elementos tetraédricos. La combinación de estas mallas, siguiendo el

mismo procedimiento que en G3, dio un total de 168 448 elementos tetraédricos (Figura 12b). El mayor número de elementos en el agitador se debe a los volúmenes más pequeños, requiriendo una malla más fina para las geometrías complejas (Figura 13).

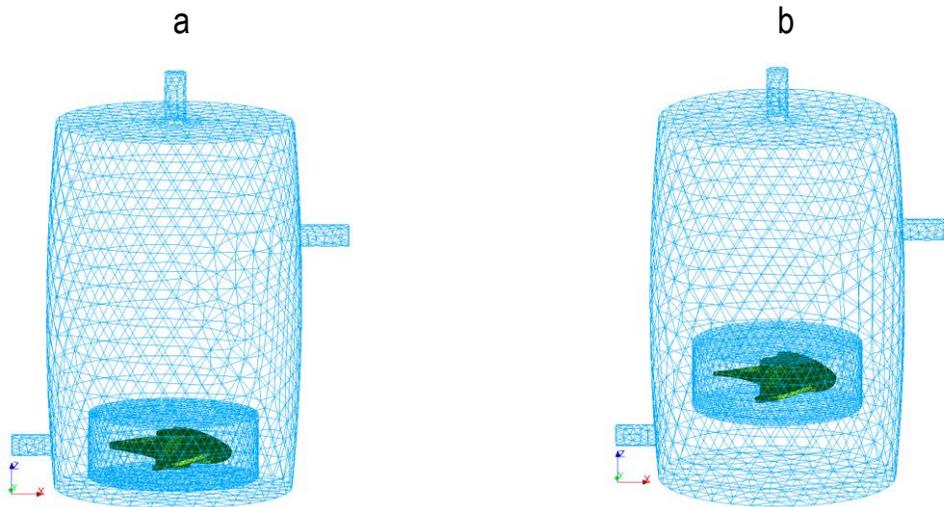


Figura 12. Mallado de la geometría del biodigestor anaeróbico con agitador en 3D. a) Geometría G3 y b) Geometría G4.

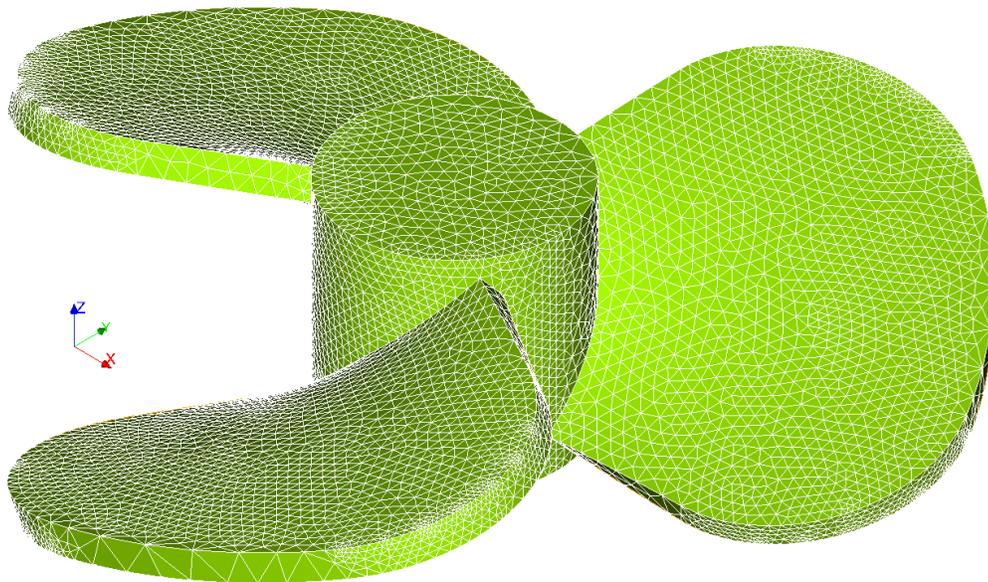


Figura 13. Malla del agitador.

4.3 Simulación hidrodinámica del biodigestor anaeróbico

4.3.1 Análisis hidrodinámico con diferentes densidades en geometría G1

En el análisis hidrodinámico de biodigestores, la velocidad es una de las variables más representativas, ya que facilita la comprensión de los patrones de flujo en el fluido. Los resultados de las 9 simulaciones se presentan para el mismo instante temporal (200 s), momento en el que el sistema se estabiliza, se llena completamente y alcanza un flujo continuo. La Figura 14 muestra los resultados correspondientes a la S1, con una densidad de mezcla de 781.25 kg m^{-3} , y a la S2, con una densidad de 877.19 kg m^{-3} . En la Figura 14a, las líneas de corriente ilustran el movimiento y la distribución de la mezcla dentro del biodigestor. Desde las vistas superior (Figura 14c) e inferior (Figura 14d), se observa una distribución uniforme, similar a los resultados reportados por Leonzio (2018) para un digestor anaeróbico. El perfil de velocidad mostrado en la Figura 14b, generado en el plano xz, utiliza el color azul para indicar velocidades bajas y el color rojo para velocidades altas. En la entrada y salida, se observa un cambio de azul a gris (0.5 m s^{-1}), así como en la parte superior de la geometría, debido al flujo de aire (interfaz líquido-gas) desplazado por la entrada de la mezcla. Inicialmente, el dominio computacional solo contenía aire, y una parte de este se expulsa por la parte superior. La Figura 14e muestra las líneas de corriente para la mezcla de mayor densidad, que presenta un comportamiento similar al de la mezcla de baja densidad. Aunque el perfil de velocidad muestra una coloración diferente, esto se debe al cambio en la escala de colores automático del software de post-procesamiento (Figura 14f). En ambas simulaciones, S1 y S2, las vistas superior (Figura 14g) e inferior (Figura 14h) revelan pequeñas regiones de baja velocidad en el centro de la geometría, rodeadas por la vorticidad generada por el flujo de entrada. En biodigestores auto-agitados por la alimentación, las velocidades más altas se localizan cerca de las entradas, mientras que las regiones distantes se consideran zonas muertas, estos patrones de velocidad concuerdan con el trabajo de Shrestha y Lohani (2022). La simulación S1 se configuró para 300 s de funcionamiento, pero la simulación se extendió a 42 489 s (11.80 h), mientras que S2 duró 15 992 s (4.44 h).

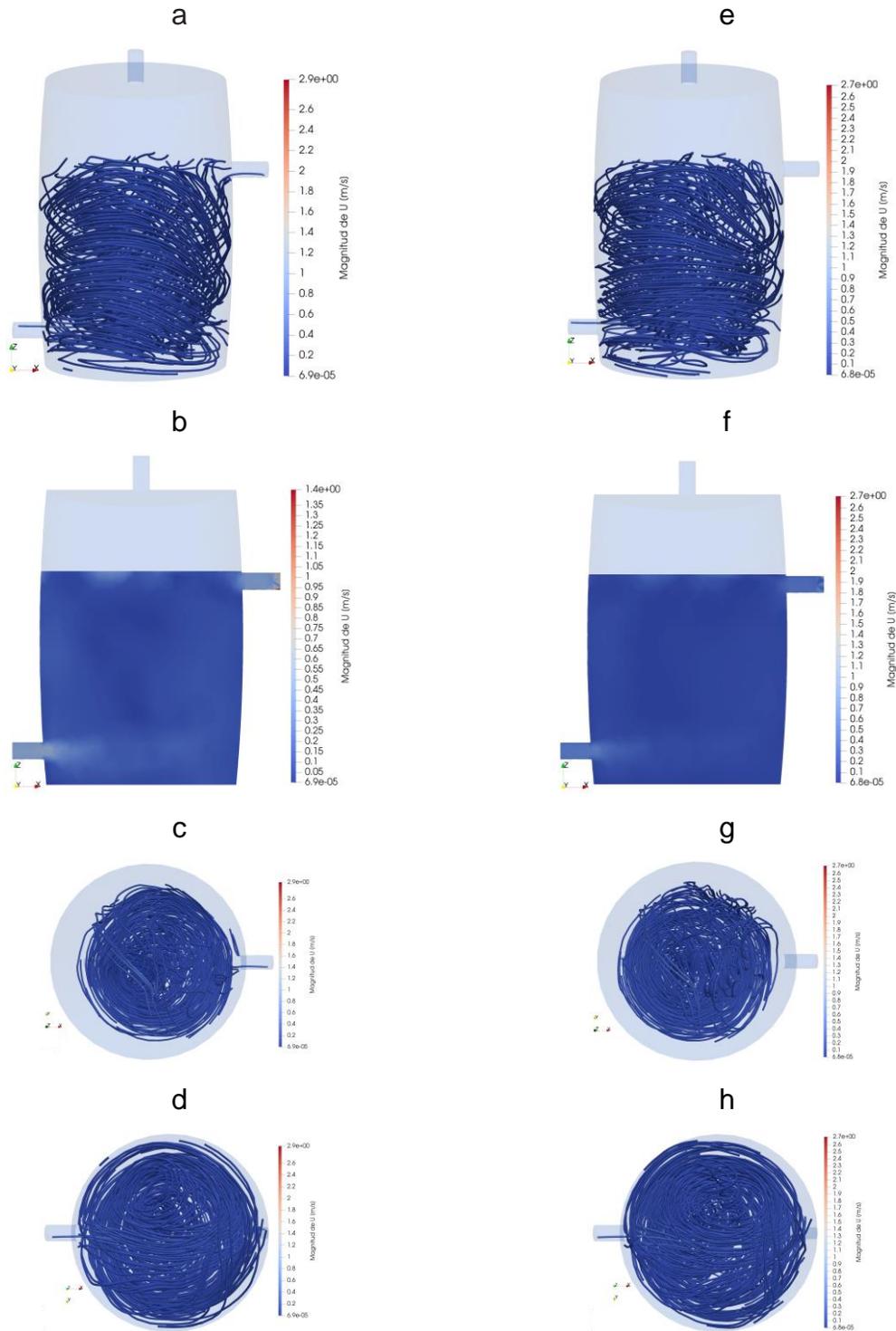


Figura 14. Análisis de cambio de densidad en G1. Simulación 1: a) líneas de corriente, b) perfil de velocidad, c) vista superior líneas de corriente, d) vista inferior líneas de corriente. Simulación 2: e) líneas de corriente, f) perfil de velocidad, g) vista superior líneas de corriente, h) vista inferior líneas de corriente.

4.3.2 Análisis hidrodinámico con diferentes densidades en geometría G2

La Figura 15 presenta los resultados de las simulaciones S3 y S4, que exploran el impacto de un cambio de densidad en la geometría G2. La entrada en G2 se posiciona a 30 cm del fondo del biodigestor, utilizando una mezcla con una densidad de 781.25 kg m^{-3} en S3 y 877.19 kg m^{-3} en S4. Las líneas de corriente revelan una falta de uniformidad en la mezcla, con bajas velocidades observadas debajo de la entrada y en el fondo del biodigestor (Figura 15a y 15e). A pesar de esto, se registra una magnitud de velocidad de 0.5 m s^{-1} tanto en la entrada como en la salida en ambas simulaciones, como se muestra en las Figura 15b y 15f. La capa de fluido situada por encima de la entrada muestra un movimiento más pronunciado y uniforme (Figura 15c y 15g), mientras que en el fondo del biodigestor ocurre lo contrario; las vistas inferiores también indican una vorticidad inclinada hacia un lado y la generación de zonas de baja velocidad (Figura 15d y 15h). En general, la geometría G1 evidencia un mayor movimiento desde la parte inferior hasta la superior, lo cual es atribuido a la posición de la entrada. Ambas geometrías muestran un comportamiento similar de las líneas de corriente, independientemente de la densidad de la mezcla. Estos resultados subrayan la importancia de seleccionar adecuadamente el punto de entrada de la alimentación y confirma que la geometría del biodigestor tiene un impacto significativo en el rendimiento de la mezcla, sustentado en los trabajos de (Agborambang *et al.*, 2024; Leonzio, 2018). El tiempo de funcionamiento de S3 y S4 se configuró en 300 s, y la duración total de las simulaciones fue de 10 837 s (3.01 h) y 7774 s (2.16 h), respectivamente.

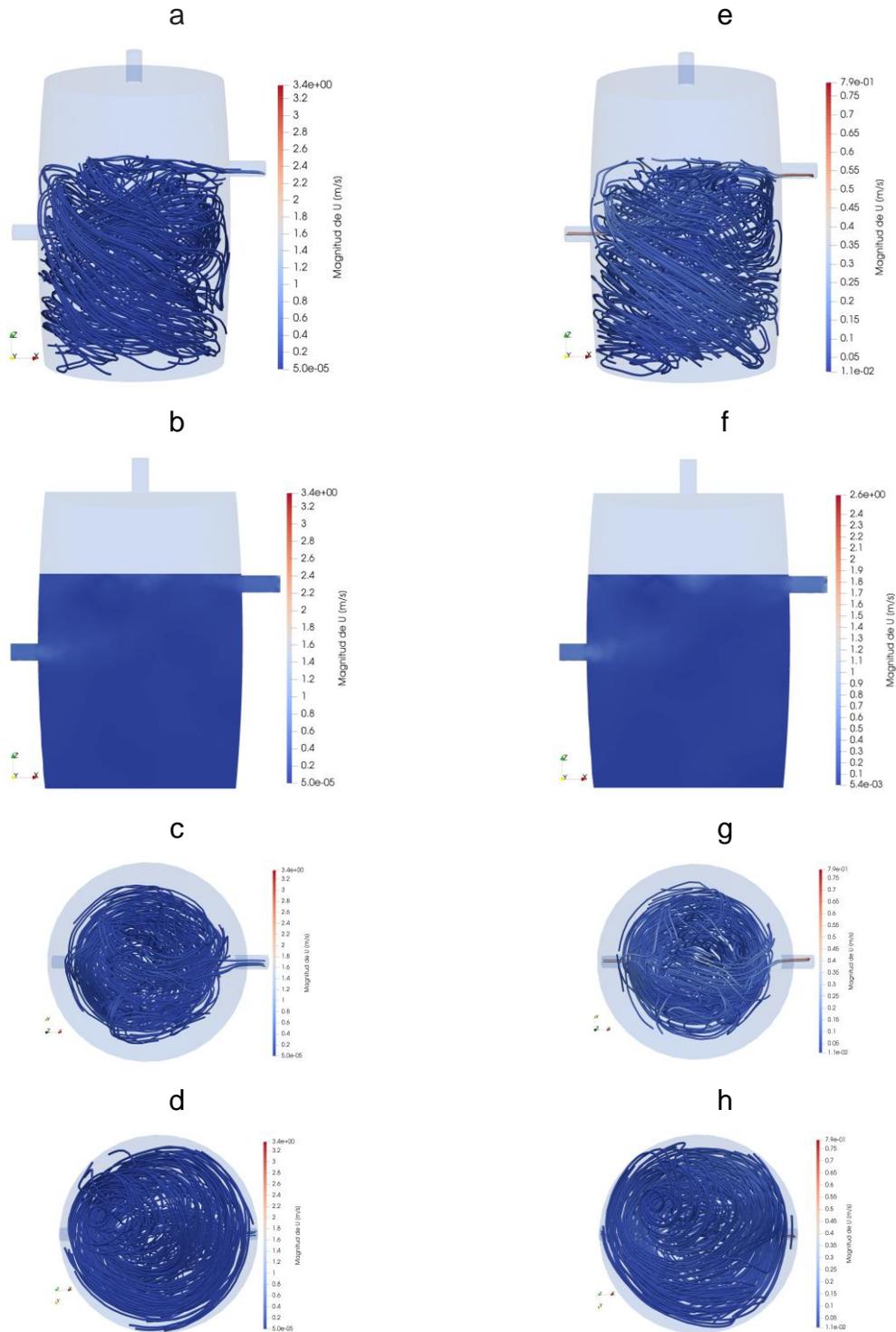


Figura 15. Análisis de cambio de densidad en G2. Simulación 3: a) líneas de corriente, b) perfil de velocidad, c) vista superior líneas de corriente, d) vista inferior líneas de corriente. Simulación 4: e) líneas de corriente, f) perfil de velocidad, g) vista superior líneas de corriente, h) vista inferior líneas de corriente.

4.3.3 Simulación con y sin agitación mecánica

Esta sección analiza los resultados obtenidos al considerar la agitación mecánica en los biodigestores. La Figura 16 presenta los perfiles de velocidad en las geometrías G1, correspondientes a la simulación S5, y G3, correspondientes a la simulación S6. Los resultados indican que el biodigestor con agitación mecánica (G3) logra una distribución más uniforme de la mezcla en comparación con el biodigestor sin agitación. Las líneas de corriente y los perfiles de velocidad se obtuvieron en el mismo instante temporal (200 s), manteniendo constantes las condiciones iniciales y de frontera, diferenciándose únicamente en el mecanismo de agitación empleado.

En la Figura 16a, se observa que los flujos atraviesan la geometría, mientras que la Figura 16f muestra una mezcla más homogénea en G3. Las líneas de corriente, tanto desde la vista superior como inferior de G1 (Figura 16c y 16d), revelan una mezcla inadecuada, mientras que en la geometría G3 (Figura 16h y 16i), estas líneas muestran una disposición perpendicular, lo que indica que el fluido recorre la mayor parte del volumen interior del biodigestor.

Los perfiles de velocidad en el plano xz ilustran la variación de la velocidad dentro de las geometrías, utilizando una escala de colores que va del azul (valor mínimo) al rojo (valor máximo). En la Figura 16b, se observa una coloración azul clara en la entrada, que corresponde a una magnitud de 0.5 m s^{-1} (condición inicial), lo que indica que la velocidad en la región interior es inferior a ese valor. En la Figura 16e, las celdas con una velocidad máxima entre 0.4 y 0.5 m s^{-1} se presentan en color rosa. Por otro lado, la geometría con agitación mecánica (Figura 16g) exhibe un cambio de coloración a lo largo de toda la región de la mezcla. La velocidad angular del agitador es de 6.5 rad s^{-1} y el radio es de 0.15 m , resultando en una velocidad lineal en la región inferior a 1 m s^{-1} . En el instante 200s, la Figura 16j muestra las celdas con una velocidad máxima entre 0.8 y 1 m s^{-1} , destacando que las aspas del agitador alcanzan una velocidad lineal de 1 m s^{-1} y el sistema se encuentra estable.

Además de los cálculos hidrodinámicos realizados en S5, también se evaluaron los esfuerzos utilizando 36 núcleos de la estación de trabajo *Dell Precision 7920*. El tiempo de funcionamiento del biodigestor se configuró en 200 s, con una duración de simulación de 1895 s (0.53 h) para S5 y 103 232 s (28.68 h) para S6.

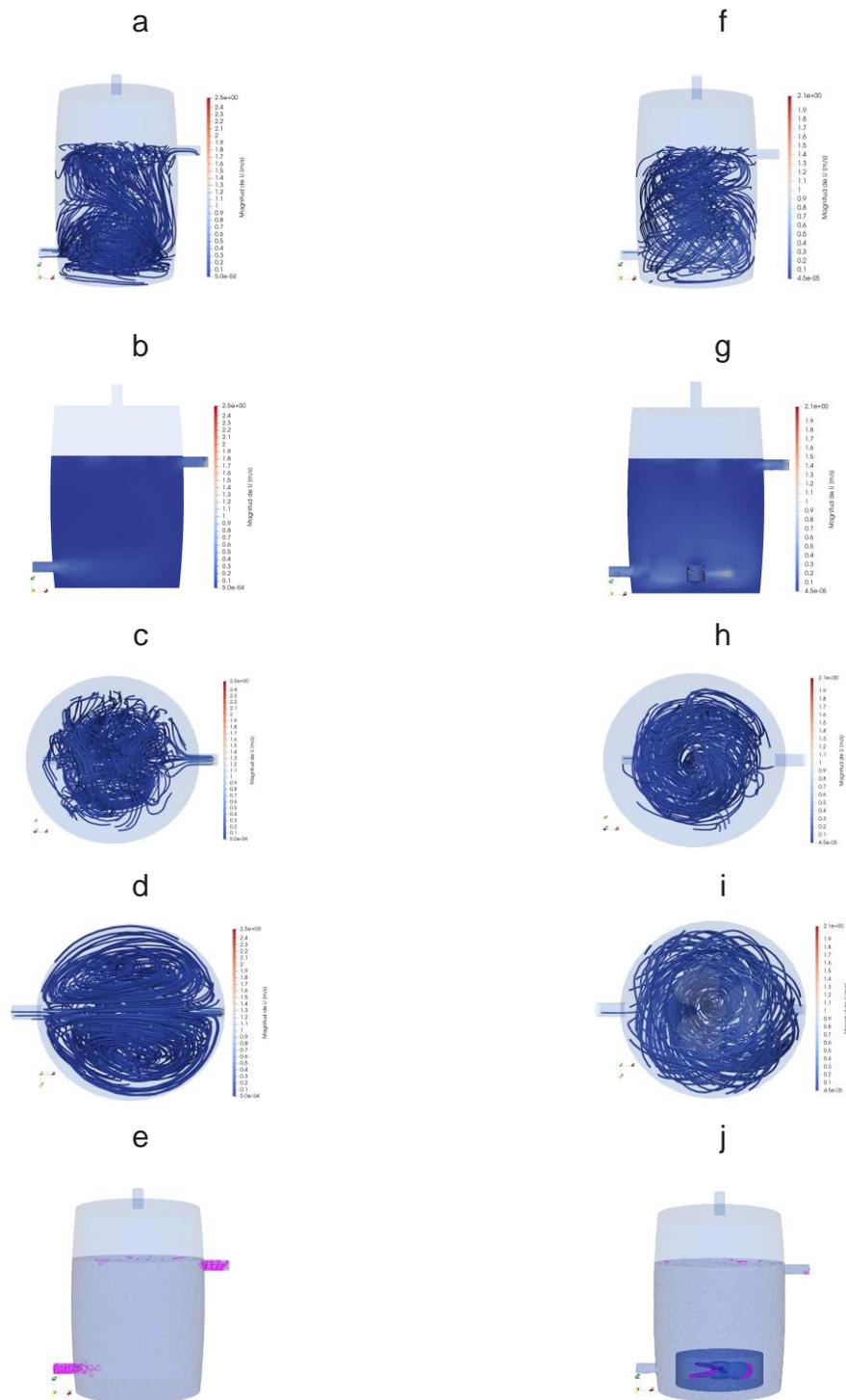


Figura 16. Comparación geometría G1 y G3. Geometría sin agitación mecánica (G1), a) líneas de corriente, b) perfil de velocidad, c) vista superior de líneas de corriente, d) vista inferior de líneas de corriente y e) celdas con velocidad máxima. Geometría con agitación mecánica (G3), f) líneas de corriente, g) perfil de velocidad, h) vista superior de líneas de corriente, i) vista inferior de líneas de corriente y j) celdas con velocidad máxima.

La Figura 17, que muestra el sistema en el instante de 150 s, presenta las celdas con velocidades en el mismo rango (0.8 y 1 m s^{-1}) cuando el sistema aún no ha alcanzado su capacidad máxima. En este caso, se observa un mayor número de celdas debido a la presencia de la interfaz líquido-gas en la salida del efluente. El solucionador realiza cálculos para ambos estados, y se confirma que la velocidad en las aspás del agitador se mantiene constante en todo momento. En relación con estos hallazgos, Caillet *et al.* (2021) afirman que la velocidad máxima de la mezcla dentro del biodigestor corresponde a la del agitador y disminuye conforme aumenta la distancia a este.



Figura 17. Celdas con velocidad entre 0.8 y 1 m s^{-1} en el tiempo 150 s.

4.3.4 Esfuerzos en el interior de la geometría con y sin agitación mecánica

A continuación, se presentan los resultados del análisis de esfuerzos en las geometrías G1 y G3. La Figura 18 muestra la magnitud de los esfuerzos, incluyendo tanto esfuerzos cortantes como normales. Los resultados se extraen en un mismo instante temporal y se orientan de acuerdo con la dirección de las velocidades, sin aplicar escalado en el tamaño de los vectores (Figura 18a y Figura 18f). La variación en la magnitud de los esfuerzos se representa mediante un cambio en la coloración, conforme a la escala de colores indicada.

El perfil de esfuerzos (Figura 18b) revela un cambio de coloración en la entrada y salida, atribuido a la reducción del diámetro, lo que genera una mayor resistencia al flujo del fluido. En el caso de la geometría con agitación mecánica, se observan resultados similares, aunque con un mayor esfuerzo en las aspas del agitador (Figura 18g), alcanzando un valor máximo de $0.17 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$, como se muestra en la Figura 19. Para convertir este valor en pascales (Pa), se multiplica por la densidad de la mezcla, que en este análisis es de 970 kg m^{-3} . De esta manera, la magnitud del esfuerzo en las aspas del agitador es aproximadamente 164.9 Pa.

Las Figura 18c y Figura 18d muestran una coloración azul intensa en el centro de la geometría, indicando esfuerzos mínimos. La geometría con agitación mecánica presenta un mayor esfuerzo en todo el dominio en comparación con la geometría sin agitación. Las vistas superior e inferior (Figura 18h y Figura 18i) confirman una mayor densidad en el campo de esfuerzos. Los mayores esfuerzos se localizan en la entrada, salida y en las aspas del agitador, resultados similares encontraron en el trabajo de (Caillet *et al.*, 2021).

En el instante de 200 s para ambas geometrías, la Figura 18e destaca la celda que presenta el valor máximo de $0.53 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ en el caso sin agitación, mientras que la Figura 18j identifica la celda con el esfuerzo máximo de $0.4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ en el caso con agitación.

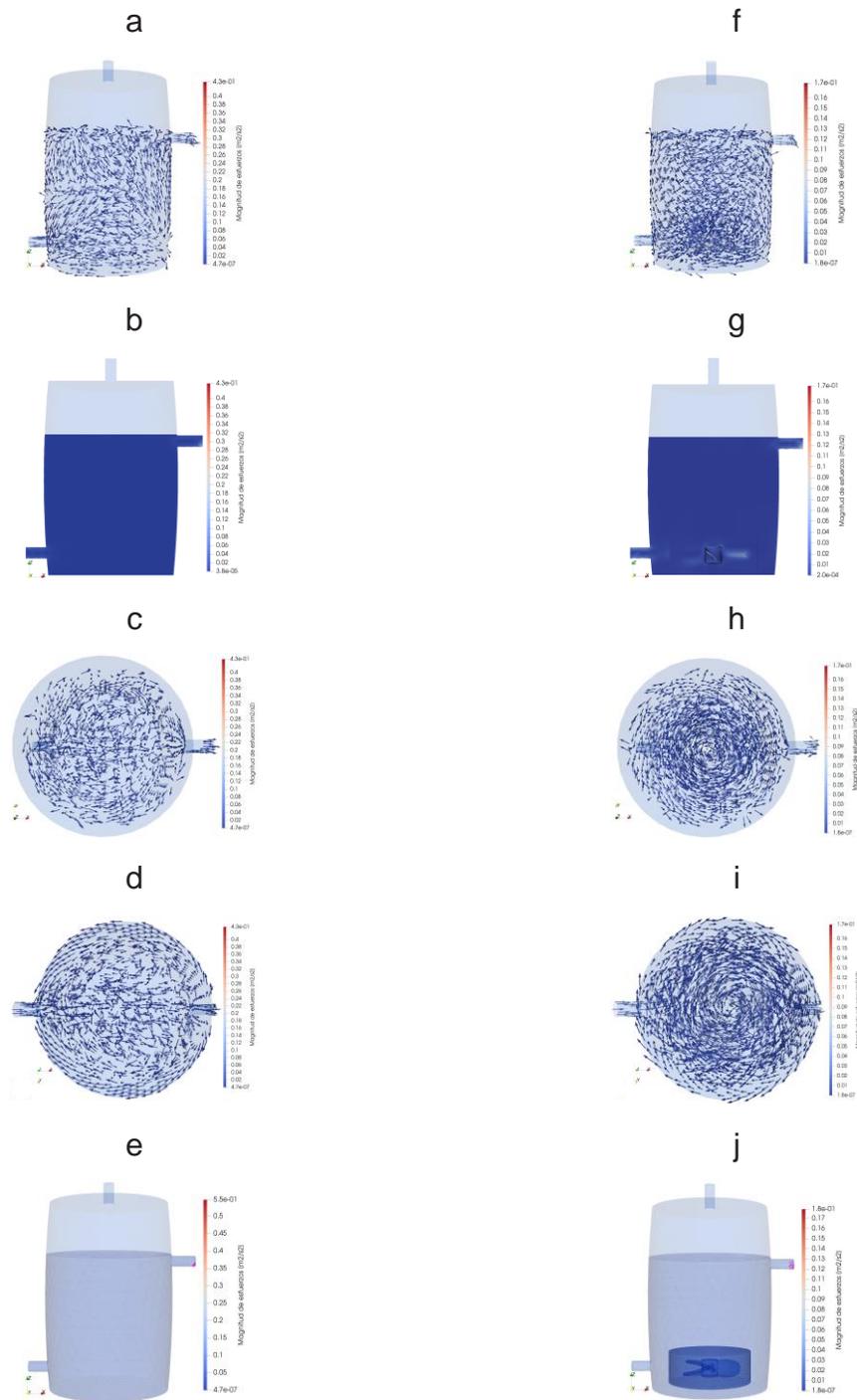


Figura 18. Resultados de esfuerzos. Geometría G1: a) magnitud de esfuerzos en el dominio, b) perfil de la magnitud de esfuerzos, c) vista superior de la magnitud de esfuerzos, d) vista inferior de la magnitud de esfuerzos y e) celdas con esfuerzo máximo. Geometría G3: f) magnitud de esfuerzos en el dominio, g) perfil de la magnitud de esfuerzos, h) vista superior de la magnitud de esfuerzos, i) vista inferior de la magnitud de esfuerzos y j) celdas con esfuerzo máximo.

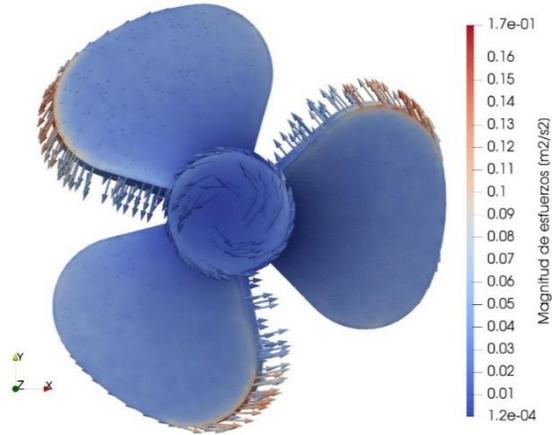


Figura 19. Esfuerzo en las aspas del agitador en 200s.

Los valores de los esfuerzos aumentan en el instante 160 s debido a la configuración de las condiciones de frontera, donde la salida del efluente se expone a la atmósfera, lo que provoca que el solucionador detecte flujos inversos en dicha salida. Esto se confirma en las Figura 20 y Figura 21, que muestran que, a partir del instante 150 s, la celda con el valor máximo de esfuerzo se ubica en la salida.

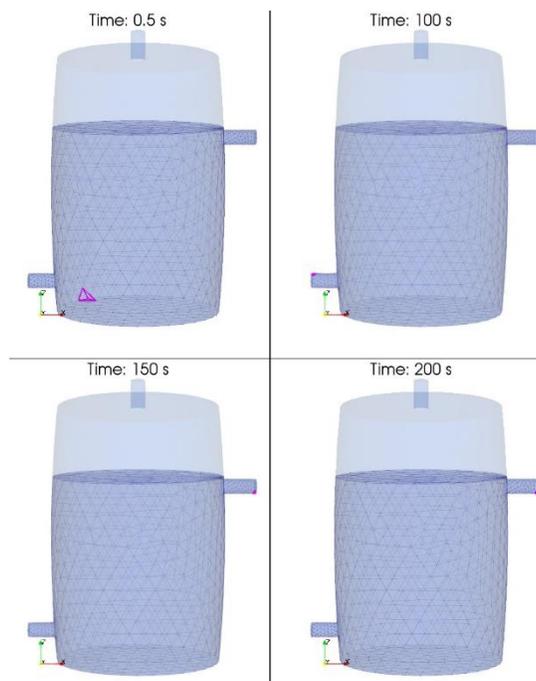


Figura 20. Celdas con esfuerzo máximo en el tiempo para la geometría G1.

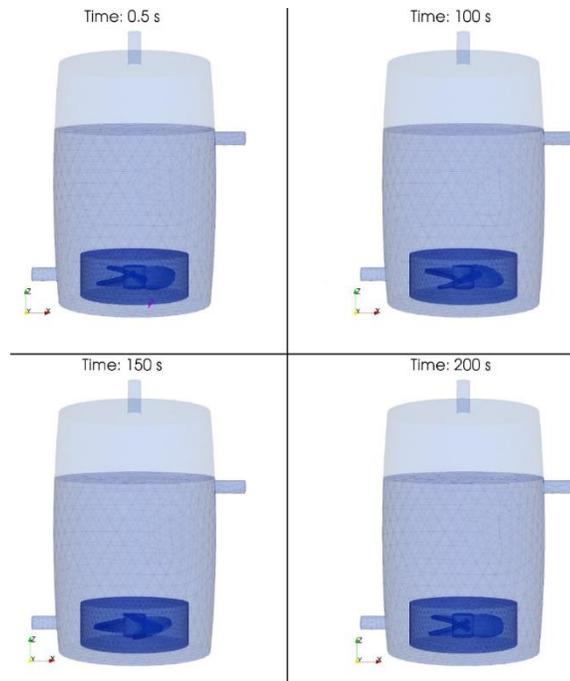


Figura 21. Celdas con esfuerzos máximos en el tiempo para la geometría G3.

En la geometría G1, los esfuerzos comienzan de manera estable con un valor de $0.08 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$. A partir de los 110 s, estos esfuerzos aumentan progresivamente desde $0.08 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ hasta alcanzar $0.4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ a los 160 s. Entre los 160 s y 200 s, la magnitud de los esfuerzos alcanza valores máximos entre 0.4 y $0.56 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$, como se muestra en la (Figura 22).

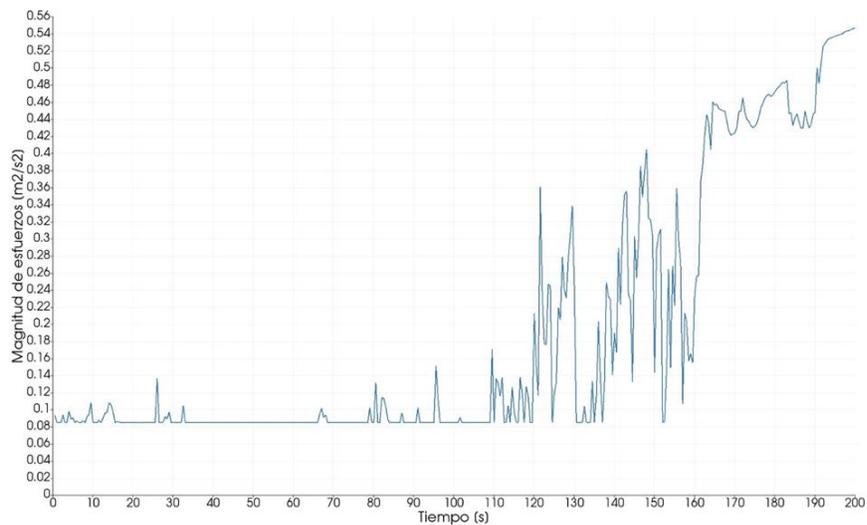


Figura 22. Gráfica de esfuerzo máximo en el tiempo de G1 simulación 5.

En la geometría G3, los esfuerzos iniciales presentan una alta variación en magnitud, reflejada por picos en la gráfica (Figura 23). Esta variabilidad se debe a que el líquido salpica o impacta las aspas del agitador, dado que se encuentran a la misma altura que la entrada. Este fenómeno ocurre a los 7 s, momento en el cual se registra el mayor esfuerzo con una magnitud de $1.4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ (Figura 24a). Otro pico se presenta a los 23 s, con una magnitud de $1.28 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$, cuando el nivel del líquido alcanza la mitad del agitador (Figura 24b). A los 40 s, el sistema comienza a estabilizarse, con una magnitud de $0.2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$, momento en que el agitador queda completamente sumergido (Figura 24c). Cuando el líquido alcanza la salida, a los 171 s (Figura 24d), la magnitud de los esfuerzos aumenta de $0.2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ a $0.4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$.

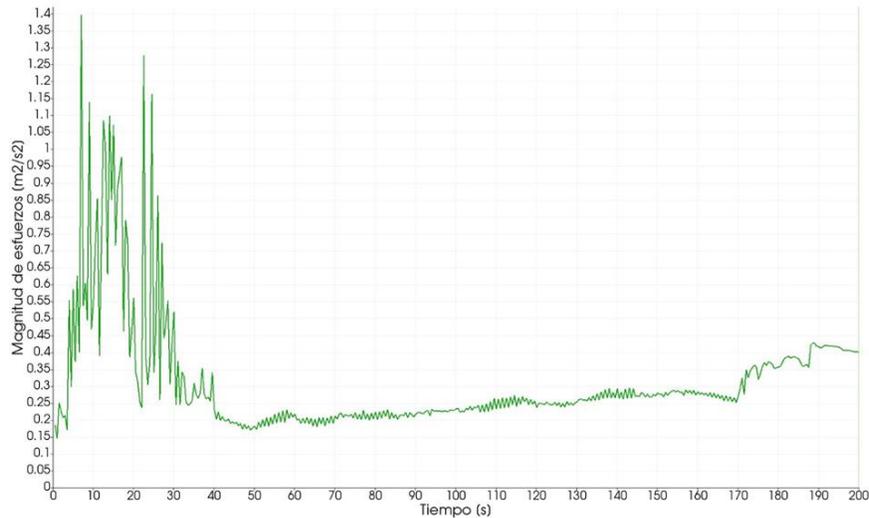


Figura 23. Gráfica de esfuerzo máximo en el tiempo en G3 simulación 6.

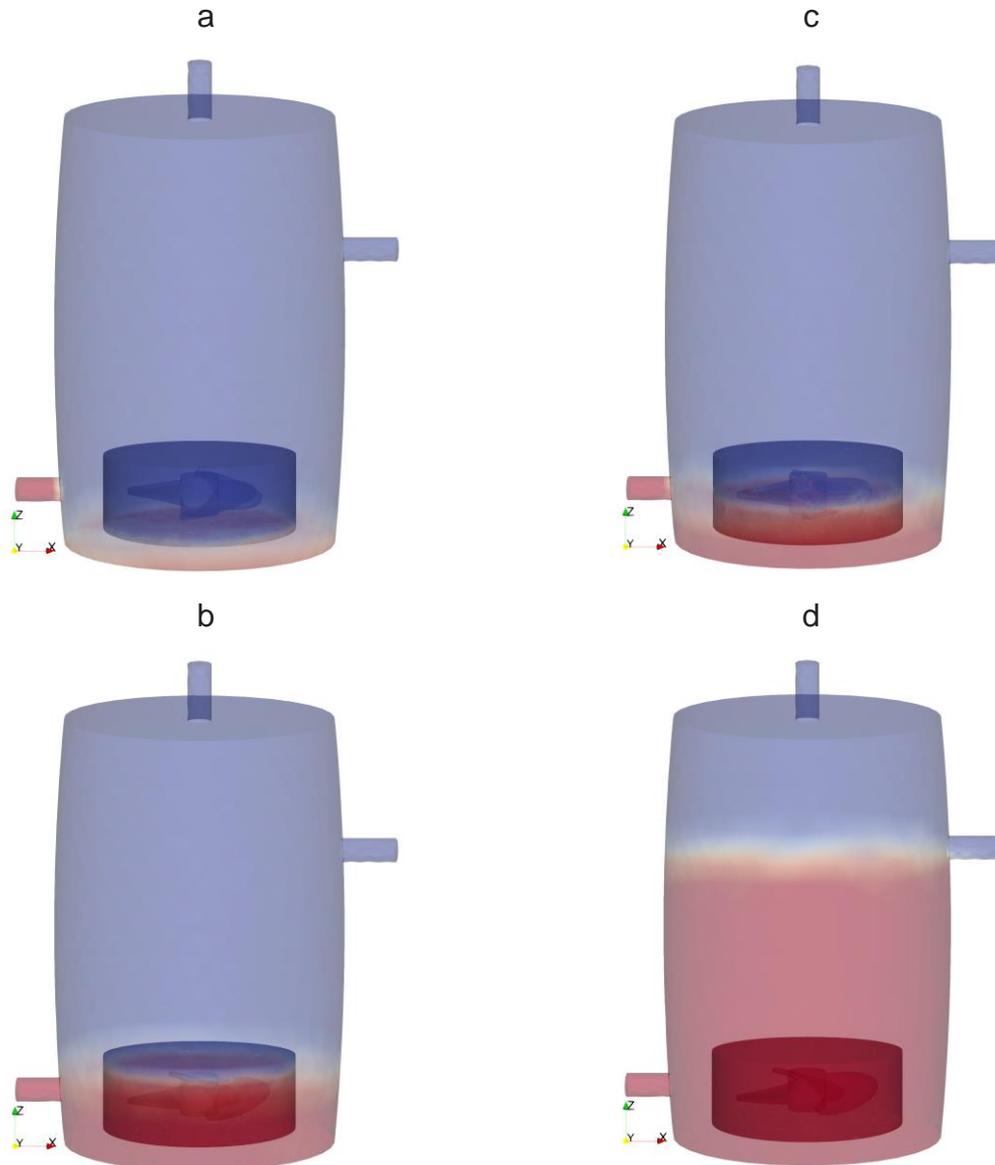


Figura 24. Esfuerzos máximos en diferentes niveles de líquido.

La Figura 25 muestra las celdas de la geometría G1 con esfuerzos comprendidos entre 0.01 y $0.04 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$. A los 0.5 s , las celdas con este rango de valores se localizan en el fondo del biodigestor. Durante el proceso de llenado, el mayor número de celdas con estos esfuerzos se concentra en la interfaz entre el líquido y el gas. Al alcanzar los 200 s , cuando el sistema está lleno y estable, se observa una disminución en el número de celdas señaladas, manteniéndose la magnitud de los esfuerzos únicamente en la entrada y salida.

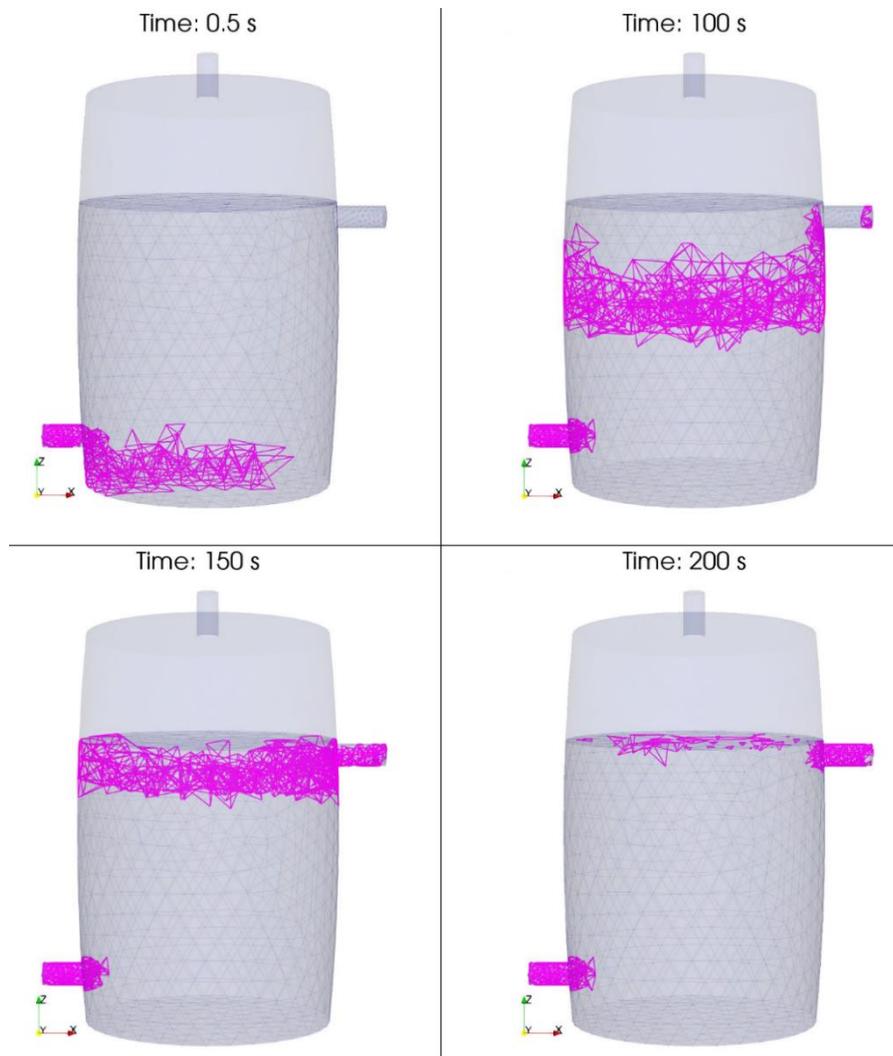


Figura 25. Celdas con esfuerzos entre 0.01 a $0.04 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$.

La Figura 22 presenta la gráfica de los esfuerzos máximos en la geometría G1 para cada paso de tiempo, mientras que la Figura 20 indica las celdas que alcanzan estos valores máximos en determinados instantes. Es esperable que, en un mismo instante, existan otras celdas con magnitudes inferiores (entre 0.01 y $0.04 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$), como se muestra en la Figura 25. Sin embargo, también se identifican celdas con esfuerzos aún menores (entre 0.001 y $0.005 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$), las cuales se grafican en la Figura 26, y en el instante 200s se tiene una magnitud promedio de esfuerzos mínimos de $0.0023 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ (2.231 Pa). De acuerdo con la Figura 27, la cantidad de celdas con estas magnitudes inferiores es significativamente mayor.

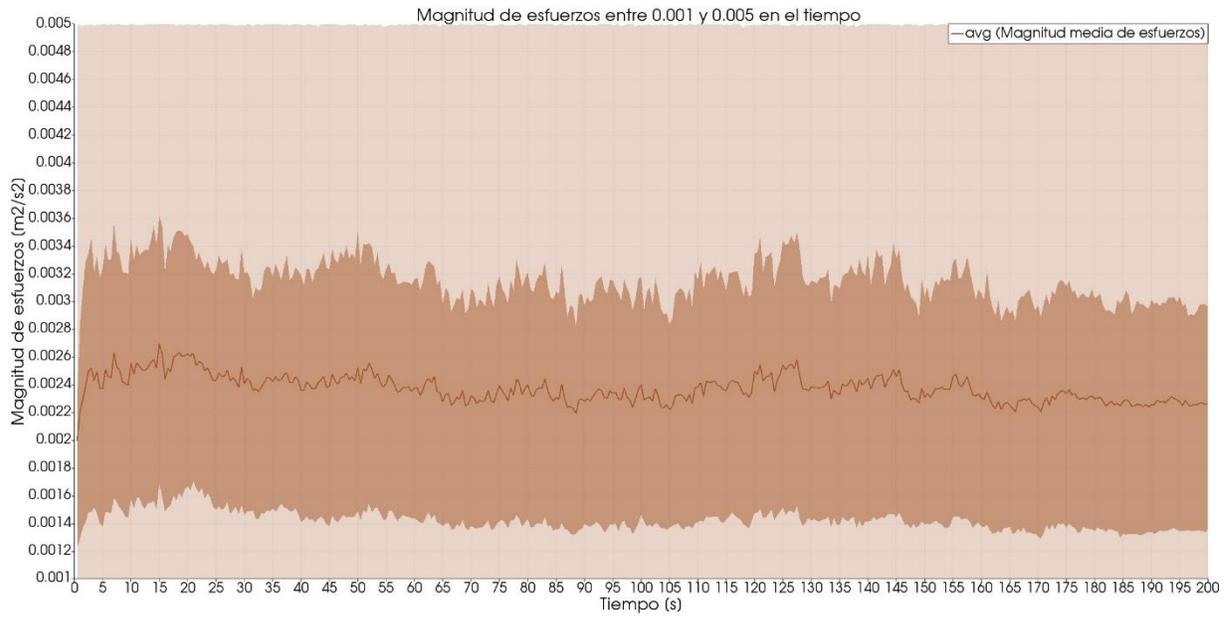


Figura 26. Esfuerzos entre 0.001 y 0.005 $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$ en el tiempo de G1 simulación 5.

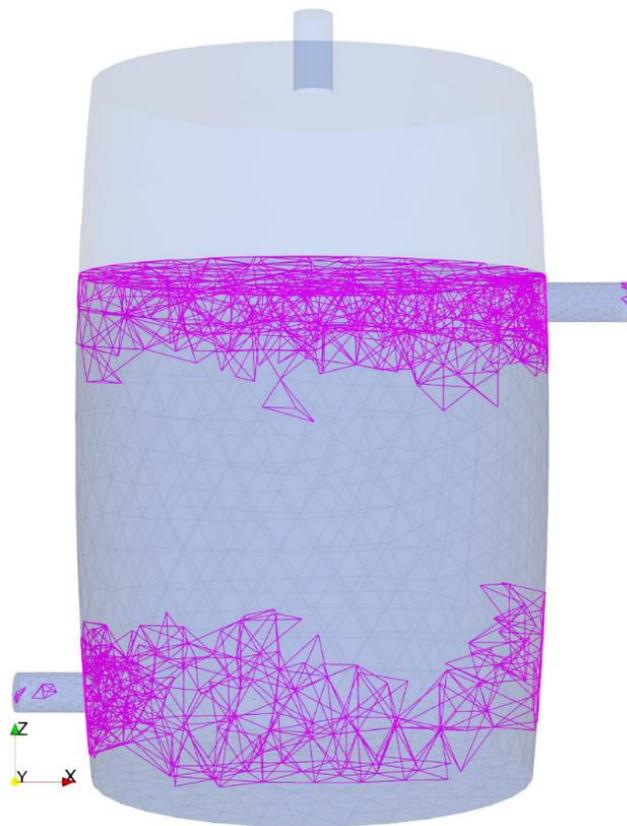


Figura 27. Celdas con esfuerzos entre 0.001 y 0.005 $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$ en 200s.

En G3, los esfuerzos superan significativamente a los observados en G1. La Figura 28 ilustra las celdas en G3 con magnitudes que varían entre 0.06 y $0.08 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$. A los 0.5 s, las celdas se encuentran en el fondo de la geometría. El líquido, al entrar en contacto con las paredes, genera esfuerzos de mayor magnitud. Durante el resto del tiempo, las celdas que presentan las mayores magnitudes se ubican cerca de las aspas del agitador. En todo momento, algunas celdas ubicadas en las entradas y salidas mantienen un valor de esfuerzo constante.

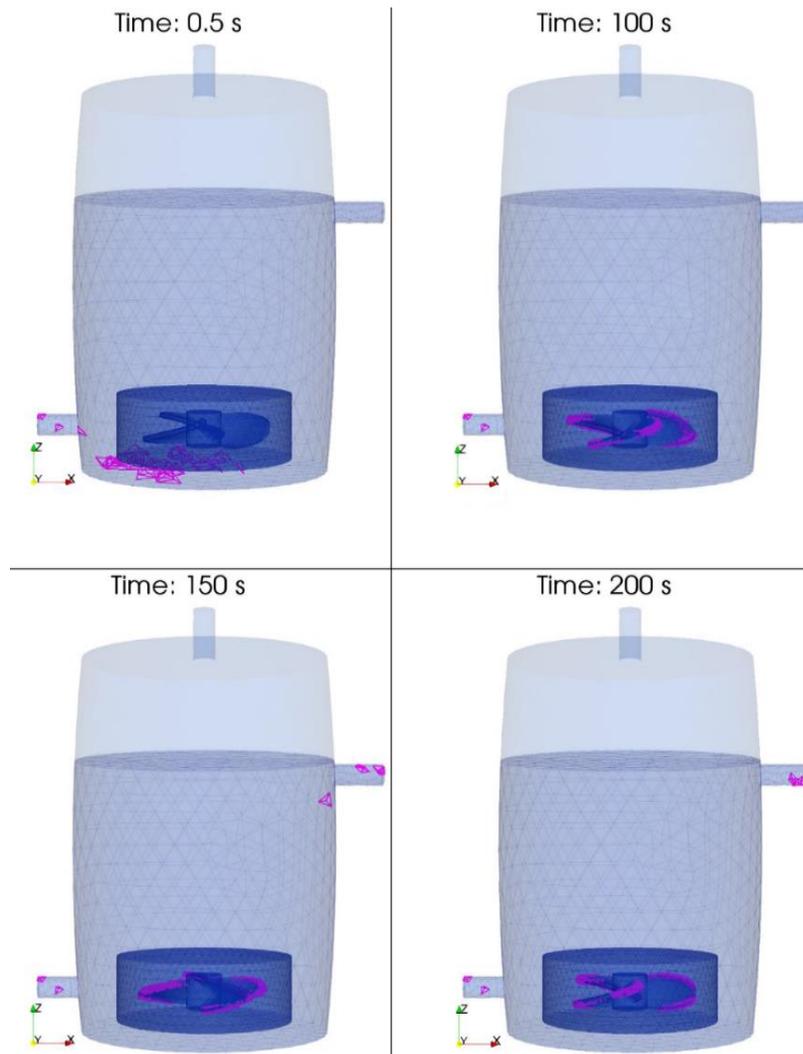


Figura 28. Celdas de G3 con esfuerzos entre 0.06 y $0.08 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$.

La Figura 29 muestra celdas con esfuerzos que oscilan entre 0.02 y $0.04 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$. A los 0.5 s , se observa una mayor cantidad de celdas marcadas en comparación con la Figura 28, lo que sugiere que las celdas ubicadas más alejadas de las paredes presentan menores magnitudes de esfuerzo. Durante el resto del tiempo, las celdas destacadas se sitúan alrededor de las aspas del agitador y en la interfaz líquido-gas. A los 150 y 200 s , la mayoría de las celdas en las entradas y salidas también exhiben la misma magnitud de esfuerzo.

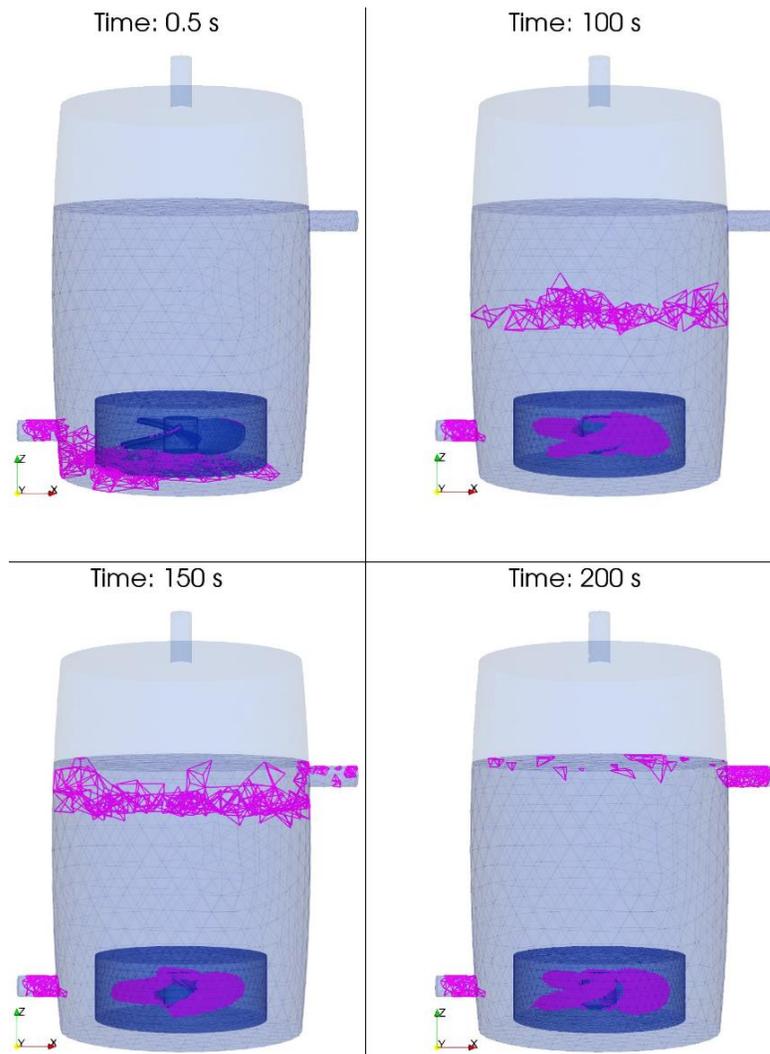


Figura 29. Celdas de G3 con esfuerzos entre 0.02 y $0.04 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$.

4.3.5 Geometría con diferente elevación del agitador

En esta sección, se analizan dos geometrías con agitación mecánica, G3 y G4. Ambas geometrías presentan la misma configuración, salvo por la posición del agitador. En G3, el agitador se encuentra a 10 cm del fondo del biodigestor, mientras que en G4 se ubica a 20 cm del fondo. Las imágenes a la izquierda de la Figura 30 corresponden a la geometría G4 con simulación (S7), mientras que las imágenes a la derecha muestran la geometría G3 con simulación (S6). Las posiciones de los agitadores se visualizan con mayor claridad en las Figura 30b y Figura 30g.

El perfil de velocidad muestra que ambas geometrías alcanzan magnitudes máximas entre 0.8 y 1 m s^{-1} . La mejor distribución de mezcla se observa con el agitador en mayor elevación, como se detalla en la Figura 30b, y las líneas de corriente evidencian un recorrido más extenso en el interior del biodigestor (Figura 30a). Por lo tanto, la vista superior (Figura 30c) y la inferior (Figura 30d) de G4 muestran un movimiento uniforme tanto debajo del agitador como en la parte superior.

La Figura 30e indica las celdas con velocidades entre 0.8 m s^{-1} y 1 m s^{-1} . El mayor número de estas celdas se encuentra alrededor del agitador, cuya velocidad angular es de 6.3 rad s^{-1} (60 rpm), lo que resulta en una velocidad lineal aproximada de 1 m s^{-1} . La simulación S7 con G4 tuvo una duración de 114 667 s (31.85 h). En comparación, en la simulación S6 con G3, las líneas de corriente (Figura 30f) muestran un recorrido menor en comparación con S7, y el perfil de velocidad revela que la parte superior se mueve más lentamente, mientras que la parte inferior presenta velocidades entre 0.8 y 1 m s^{-1} , debido a la velocidad lineal del agitador (Figura 30g). La vista superior de las líneas de corriente muestra un recorrido a través del diámetro de la geometría, aunque a baja velocidad (Figura 30h), mientras que la parte inferior exhibe una mayor magnitud de velocidad (Figura 30i). La Figura 30j señala las celdas con velocidades entre 0.8 y 1 m s^{-1} , que se encuentran alrededor de las espas del agitador. De acuerdo con los resultados, la elevación del agitador también influye en la eficiencia del biodigestor, tal como se sustenta en el trabajo de (Servati y Hajinezhad, 2020) y confirmada también por (Shen *et al.*, 2013), hallaron que la configuración óptima de agitación empleaba impulsores triples de pala inclinada, logrando una mezcla eficiente.

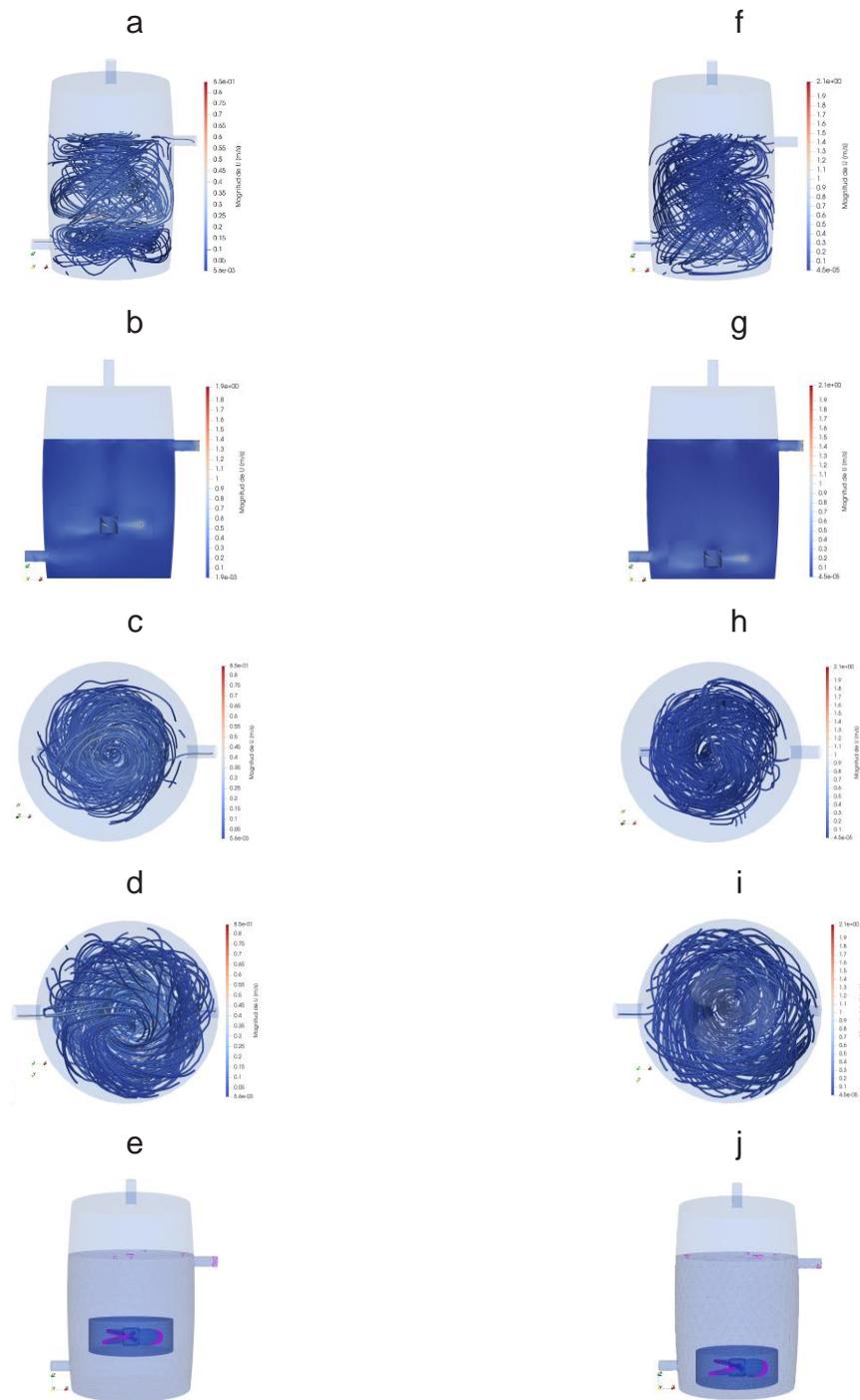


Figura 30. Resultados elevación del agitador. Agitador con 20 cm de elevación: a) líneas de corriente, b) perfil de velocidad, c) vista superior de líneas de corriente, d) vista inferior de líneas de corriente y e) celdas con velocidad máxima. Agitador con 10 cm de elevación: f) líneas de corriente, g) perfil de velocidad, h) vista superior de líneas de corriente, i) vista inferior de líneas de corriente y j) celdas con velocidad máxima.

4.3.6 Esfuerzos con diferente elevación del agitador.

En esta sección se analiza el efecto de la elevación de los agitadores sobre la magnitud de los esfuerzos, comparando G4 con S7 (agitador a 20 cm) y G3 con S6 (agitador a 10 cm). En general, no se observa una diferencia significativa en la magnitud de los esfuerzos debido a la elevación del agitador, como se muestra en la Figura 31. Las Figura 31a y 31f revelan una densidad similar en el campo de esfuerzos, concentrada alrededor del agitador. En los perfiles de esfuerzos (Figura 31b y Figura 31g), el cambio en la coloración se limita a las zonas de entrada, salida y las aspas del agitador. Las vistas inferior (Figura 31d y Figura 31i) y superior (Figura 31c y Figura 31h) muestran una similitud en la densidad del campo de esfuerzos en ambas geometrías, aunque con diferentes ubicaciones de los agitadores.

A los 200 s, ambas geometrías presentan una magnitud máxima de esfuerzos de $0.4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$, situándose en las mismas ubicaciones, como se indica en las Figura 31e y Figura 31j.

Las gráficas de esfuerzos máximos en función del tiempo, presentadas en la Figura 32 para la geometría G4 y en la Figura 33 para la geometría G3, indican que no existe una diferencia en la magnitud de los esfuerzos una vez que el sistema se estabiliza. La diferencia se manifiesta en los momentos en los cuales se producen los picos de esfuerzos máximos. En G4, el líquido alcanza el agitador (Figura 34a) a los 61 s con un esfuerzo de $1.3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ y el agitador se sumerge (Figura 34b) a los 85 s con un esfuerzo de $2.1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$. En contraste, en G3, el nivel de líquido alcanza el agitador (Figura 34d) a los 7 s con una magnitud de esfuerzo de $1.4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$, y el agitador se sumerge (Figura 34e) a los 40 s con un esfuerzo de $0.2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$. Cuando el sistema se estabiliza, los esfuerzos se mantienen en un rango de 0.2 a $0.3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ (194-291 Pa). Al rebosar el sistema (Figura 34c y Figura 34f) a los 171 s, el esfuerzo asciende hasta $0.4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ (388 Pa) en ambas geometrías. En general, los picos de máximo esfuerzo ocurren desde el inicio del llenado de la geometría hasta que el agitador se sumerge.

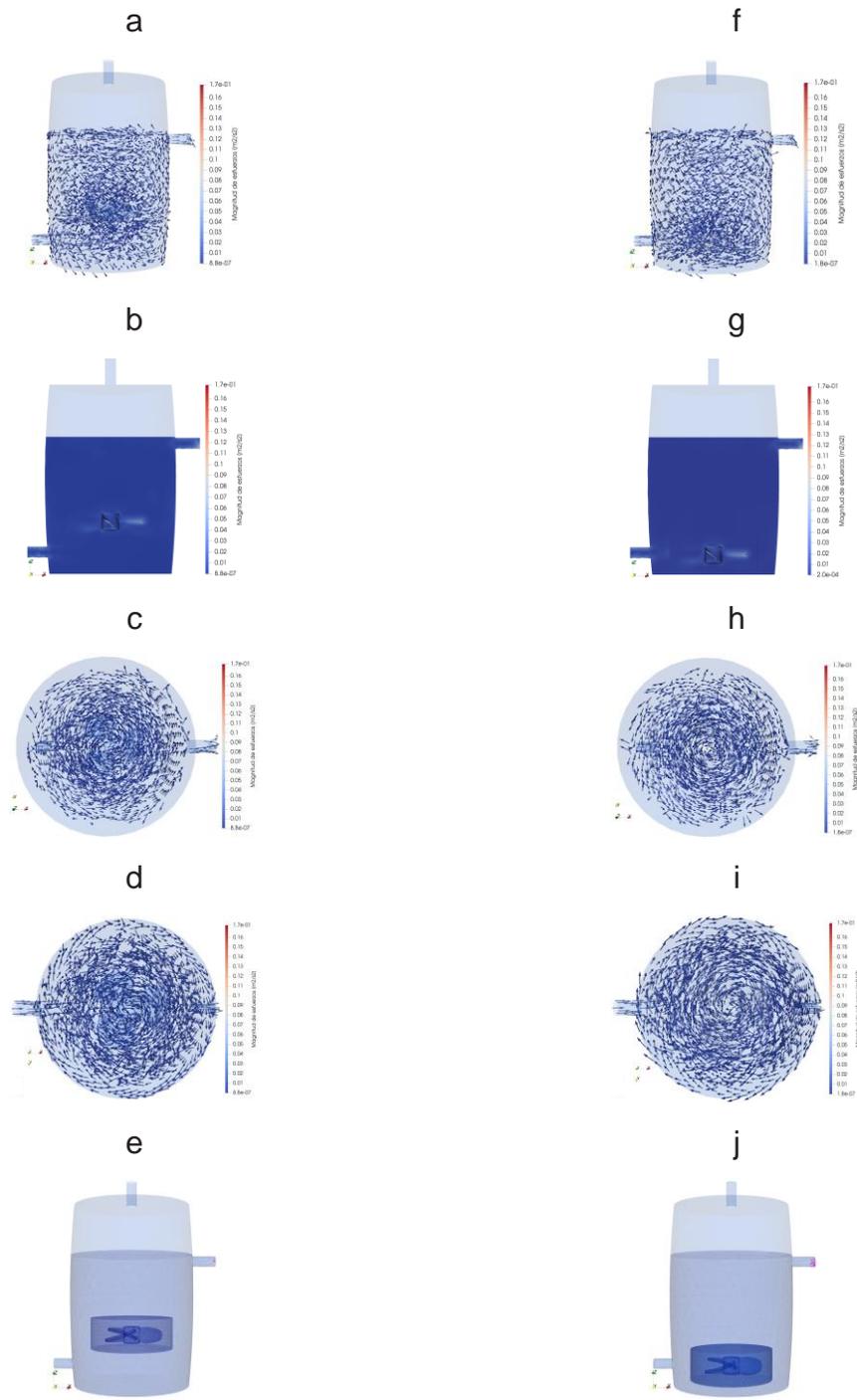


Figura 31. Análisis de esfuerzos con diferentes elevaciones del agitador. Agitador de 20 cm de elevación: a)magnitud de esfuerzos en el dominio, b) perfil de la magnitud de esfuerzos, c) vista superior de la magnitud de esfuerzos, d) vista inferior de la magnitud de esfuerzos y e) celdas con esfuerzo máximo. Agitador con 10 cm de elevación: f) magnitud de esfuerzos en el dominio, g) perfil

de la magnitud de esfuerzos, h) vista superior de la magnitud de esfuerzos, i) vista inferior de la magnitud de esfuerzos y j) celdas con esfuerzo máximo.

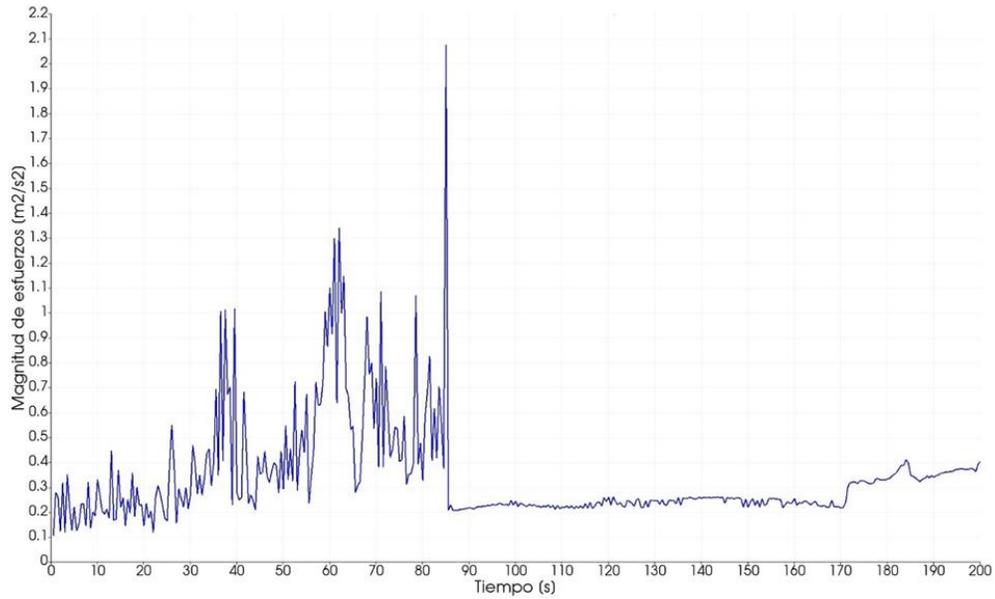


Figura 32. Gráfica de esfuerzo máximo en el tiempo de G4 simulación 7.

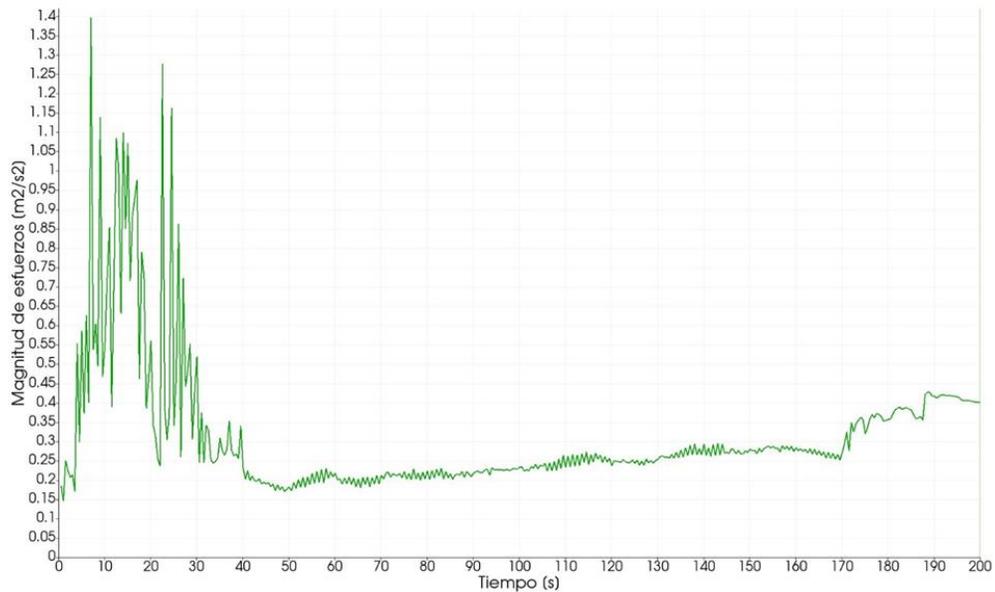


Figura 33. Gráfica de esfuerzo máximo en el tiempo en G3 simulación 6.

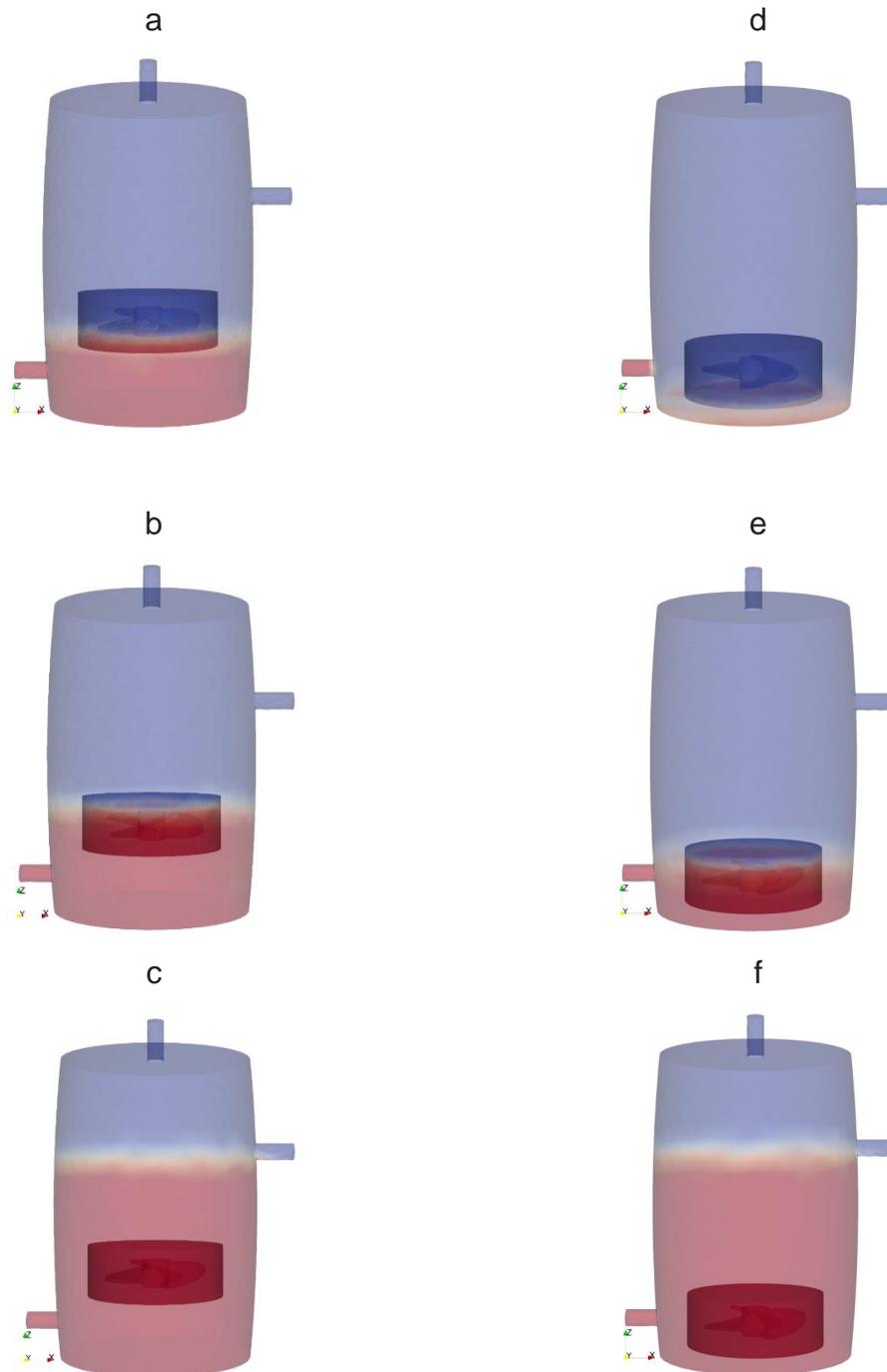


Figura 34. Esfuerzos máximos en diferentes niveles de líquido. G4 simulación 7: a) líquido alcanza el agitador en 61s, b) el agitador se sumerge en 85s y c) llenado del sistema en 171s. G3 simulación 6: a) líquido alcanza el agitador en 7s, b) el agitador se sumerge en 40s y c) llenado del sistema en 171s.

4.3.7 Geometría G4 con diferente velocidad angular del agitador.

En esta sección se analiza el efecto de la velocidad angular del agitador en la geometría G4, considerando las simulaciones 8 (S8) y 9 (S9). Las propiedades de la mezcla utilizadas son: una densidad de 781.25 kg m^{-3} , una viscosidad cinemática de $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ y una tensión superficial de 0.07 N m^{-1} para ambas simulaciones. Las imágenes a la izquierda en la Figura 35 corresponden a la simulación S8, en la cual el agitador tiene una velocidad angular de 90 rpm (9.5 rad s^{-1}), resultando en una velocidad lineal de 1.43 m s^{-1} en la punta de las aspas (Figura 35e). Las imágenes a la derecha muestran la simulación S9, donde el agitador opera a 60 rpm (6.3 rad s^{-1}), generando una velocidad lineal de 0.95 m s^{-1} en el agitador (Figura 35j).

Aunque se observa una diferencia en la magnitud de la velocidad, las líneas de corriente en ambos casos son similares (Figura 35a y Figura 35f), lo que indica una mezcla inadecuada en el contenido del biodigestor debido a la falta de enlazamiento entre las líneas de corriente. Los perfiles de velocidad (Figura 35b y Figura 35g) no muestran cambios significativos en la magnitud de la velocidad, y en el centro de la geometría, se observa un color azul intenso que indica una baja velocidad lineal provocada por la formación de un remolino. Las vistas inferior y superior para ambos casos están representadas en las Figura 35 incisos c, d, h e i. Las duraciones de las simulaciones fueron 418 584 s (116.27 h) para S8 y 256 012 s (71.11 h) para S9.

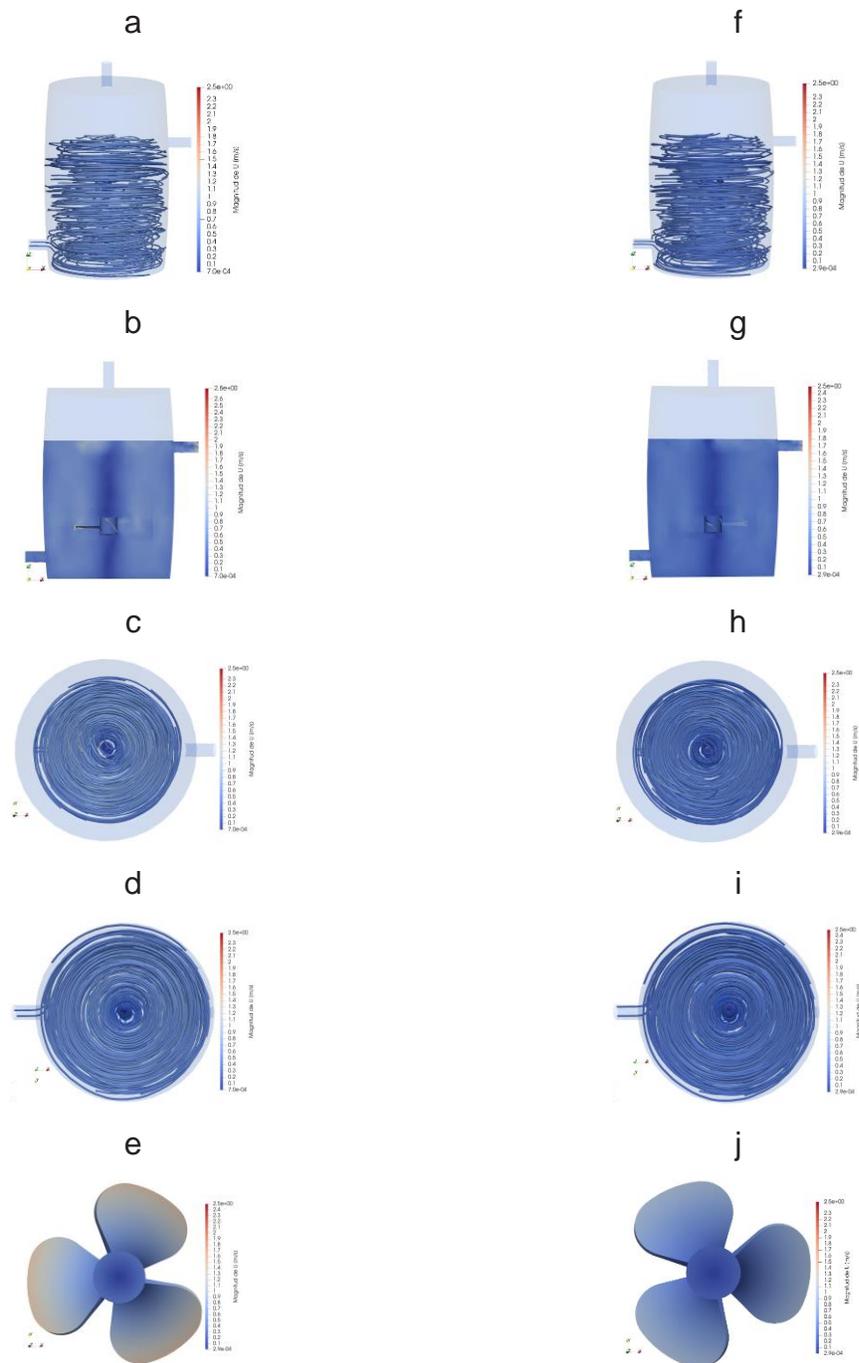


Figura 35. Simulaciones con diferente velocidad angular. Agitador con 90 rpm: a) líneas de corriente, b) perfil de velocidad, c) vista superior de líneas de corriente, d) vista inferior de líneas de corriente y e) velocidad lineal en el agitador. Agitador con 60 rpm: f) líneas de corriente, g) perfil de velocidad, h) vista superior de líneas de corriente, i) vista inferior de líneas de corriente y j) velocidad lineal en el agitador.

4.3.8 Los esfuerzos en diferentes velocidades angulares del agitador

En esta sección se analiza el efecto de la velocidad angular del agitador sobre la magnitud de los esfuerzos generados dentro del biodigestor G4. La Figura 36 muestra los esfuerzos máximos en función del tiempo para la simulación S8 (90 rpm). A los 58 s, se observa un pico en la gráfica de esfuerzos, cuando el líquido impacta contra las aspas del agitador, con una magnitud de esfuerzo de $1.5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ (1171.88 Pa). En la Figura 37 se presentan los esfuerzos máximos para S9 (60 rpm), que siguen un comportamiento similar al de S8, pero con magnitudes de esfuerzo menores. En 58 s, el líquido alcanza el agitador con un esfuerzo de $0.23 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ (179.69 Pa). Una vez que el sistema se estabiliza, en ambos casos, la magnitud de los esfuerzos se mantiene en un rango de 0.1 a $0.3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ (78.13-234.38 Pa). Estos resultados indican que mayores velocidades angulares producen mayores magnitudes de esfuerzos máximos, es similar a los resultados que se reporta en el trabajo de (Lebranchu *et al.*, 2017), indican que tasas de agitación demasiado altas implican una desaceleración en la producción del biodigestor y en cuanto a los esfuerzos óptimos, no superar los 30 Pa. En otros estudios obtuvieron las mismas tendencias (Polgár *et al.*, 2022; Verma *et al.*, 2019).

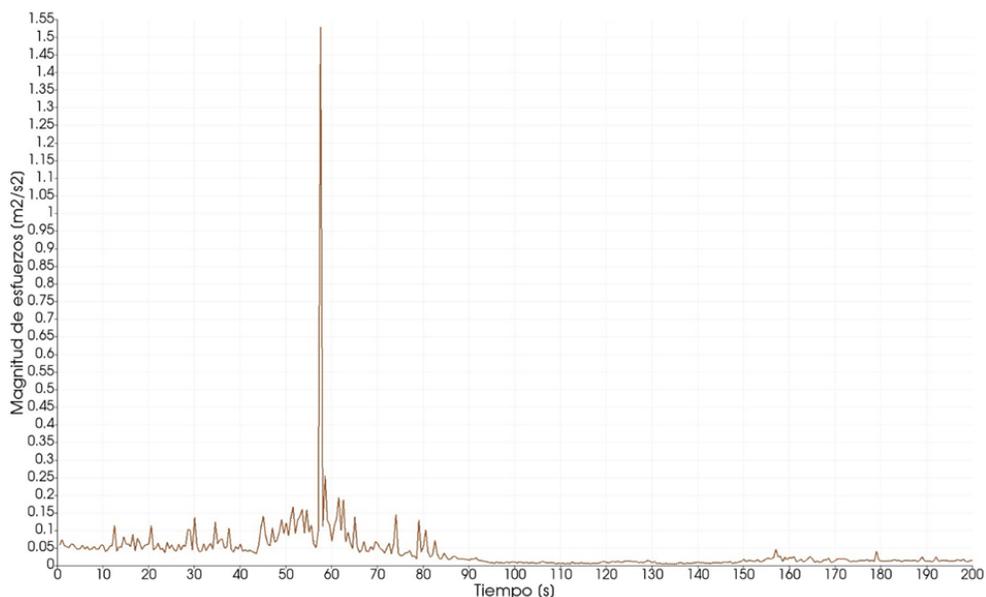


Figura 36. Magnitud de esfuerzos con agitador de 90 rpm a través del tiempo.

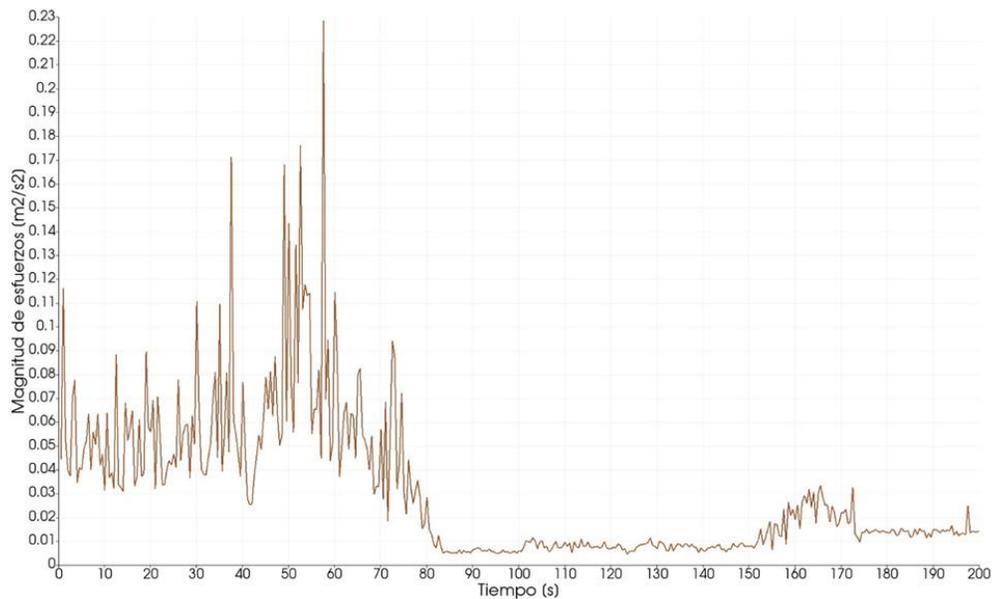


Figura 37. Magnitud de esfuerzos con agitador de 60 rpm a través del tiempo.

4.3.9 Análisis hidrodinámico con diferentes densidades

En esta sección se analiza el efecto de la densidad en G4, manteniendo el agitador a 60 rpm, mediante la comparación de los resultados de las simulaciones S7 (densidad de 970 kg m^{-3}) y S9 (densidad de 781.25 kg m^{-3}), como se muestra en la Figura 38. Además de la densidad, se presentan diferencias en otras variables: en S7, la viscosidad cinemática es de $4.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ y la tensión superficial es de 0.06 N m^{-1} , mientras que en S9, la viscosidad cinemática es de $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ y la tensión superficial es de 0.07 N m^{-1} .

Las Figura 38a y 38f muestran diferencias en la trayectoria de las líneas de corriente, pero estas diferencias no se deben exclusivamente a la densidad. En cambio, la viscosidad cinemática tiene un impacto más significativo en las líneas de corriente y en los esfuerzos, corroborando los resultados de las simulaciones 1 y 2, que también presentaron diferentes densidades, pero con trayectorias similares de las líneas de corriente.

El perfil de velocidad en la Figura 38g revela una mayor magnitud de velocidad lineal (0.9 m s^{-1}), mientras que la Figura 38b muestra una menor magnitud (0.5 m s^{-1}), según

la escala de colores. Por lo tanto, una mayor viscosidad cinemática se asocia con una menor velocidad, lo que provoca que las líneas de corriente se entrelacen (Figura 38c y Figura 38d). Cuando la viscosidad cinemática es baja, las líneas de corriente presentan trayectorias circulares horizontales (Figura 38h y Figura 38i). La Figura 38e señala algunas celdas con velocidades entre 0.8 y 1 m s^{-1} mientras que la Figura 38j muestra un mayor número de celdas con la misma magnitud, indicando que el fluido se mueve a una mayor velocidad, pero no se mezcla adecuadamente. Servati y Hajinezhad (2020) indican que incluso a 50 rpm , el 90% del volumen está activo y que la presencia de zonas muertas depende de la geometría del impulsor y la reología de la mezcla.

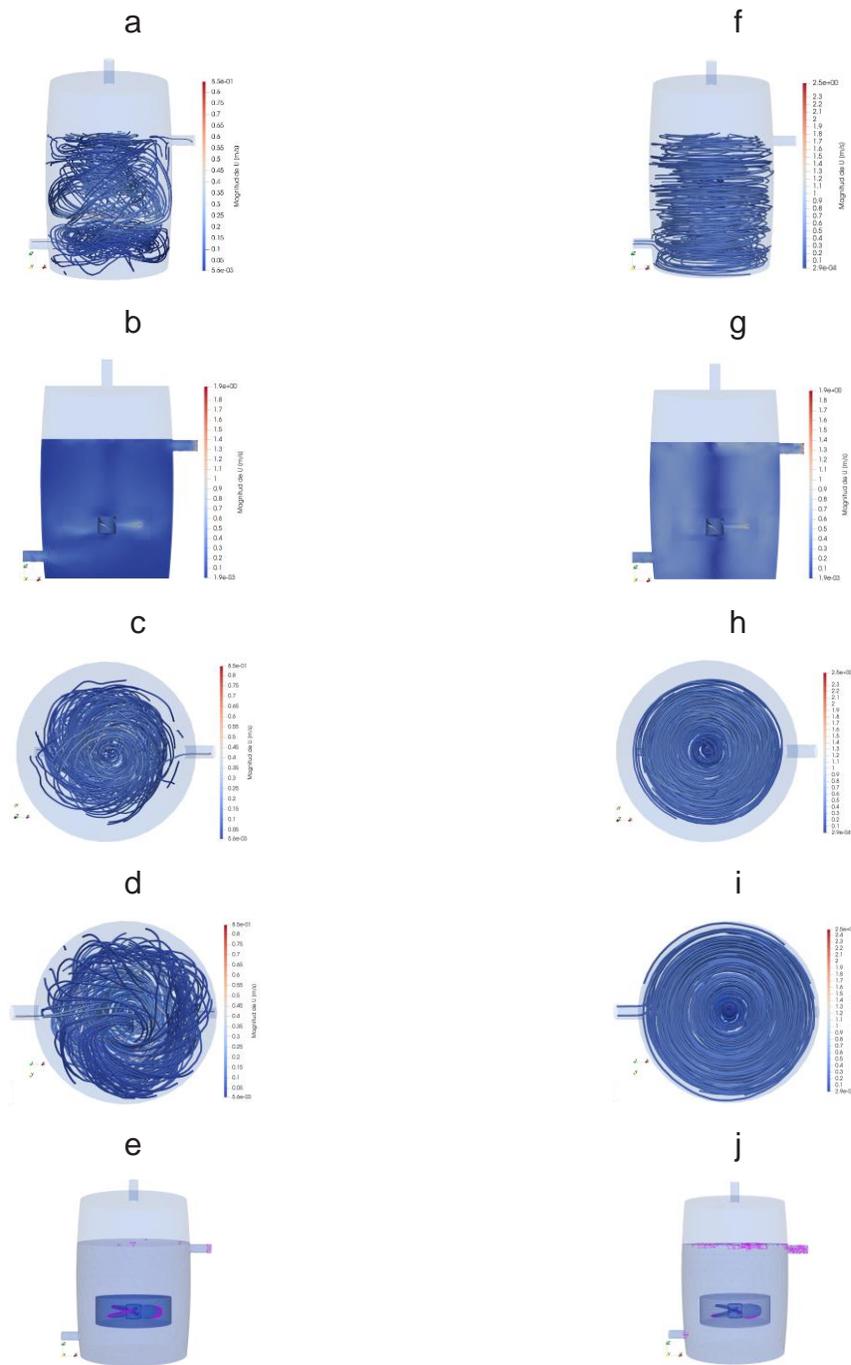


Figura 38. Resultados análisis de densidades. Mezcla con densidad de 970 kg m^{-3} : a) líneas de corriente, b) perfil de velocidad, c) vista superior de líneas de corriente, d) vista inferior de líneas de corriente y e) celdas con velocidad entre $0.8\text{-}1 \text{ m s}^{-1}$. Mezcla con densidad de 781.25 kg m^{-3} : f) líneas de corriente, g) perfil de velocidad, h) vista superior de líneas de corriente, i) vista inferior de líneas de corriente y j) celdas con velocidad entre $0.8\text{-}1 \text{ m s}^{-1}$.

4.3.10 Esfuerzos en mezclas de diferente densidad

En este apartado, se analiza la influencia de la densidad en la magnitud de los esfuerzos, considerando las simulaciones 7 y 9 con la geometría G4. La simulación S7 utiliza una densidad de 970 kg m^{-3} , una viscosidad cinemática de $4.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ y una tensión superficial de 0.06 N m^{-1} . Los esfuerzos máximos resultantes se muestran en la Figura 39. A los 61 s, el líquido alcanza el agitador (Figura 40a), generando una magnitud de esfuerzo de $1.3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ (1261 Pa). El esfuerzo máximo de $2.1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ (2037 Pa) ocurre cuando el agitador está completamente sumergido a los 85 s (Figura 40b). En general, los picos de máximo esfuerzo se observan desde el inicio del llenado de la geometría hasta la completa inmersión del agitador. Cuando el sistema se estabiliza, los esfuerzos se mantienen en un rango de 0.2 a $0.3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ (194-291 Pa). Al rebosar el sistema a los 171 s, la magnitud del esfuerzo aumenta hasta $0.4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ (388 Pa), como se muestra en la Figura 41.

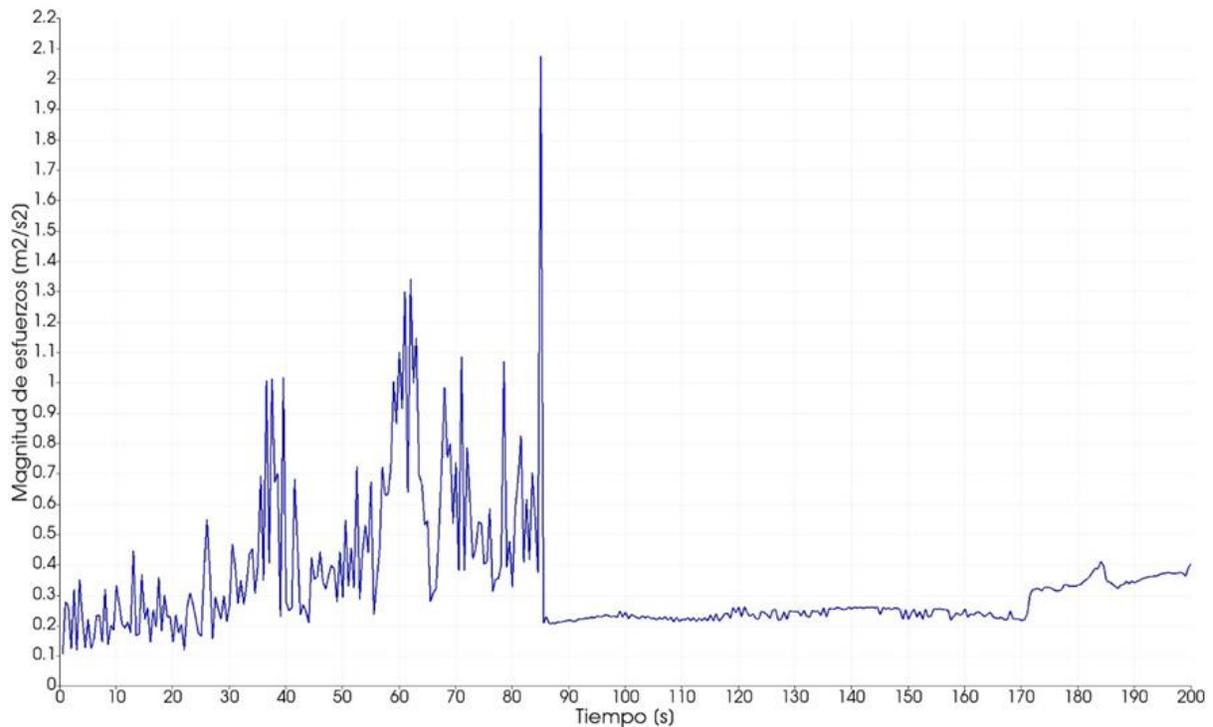


Figura 39. Esfuerzos en una mezcla con densidad de 970 kg m^{-3} .

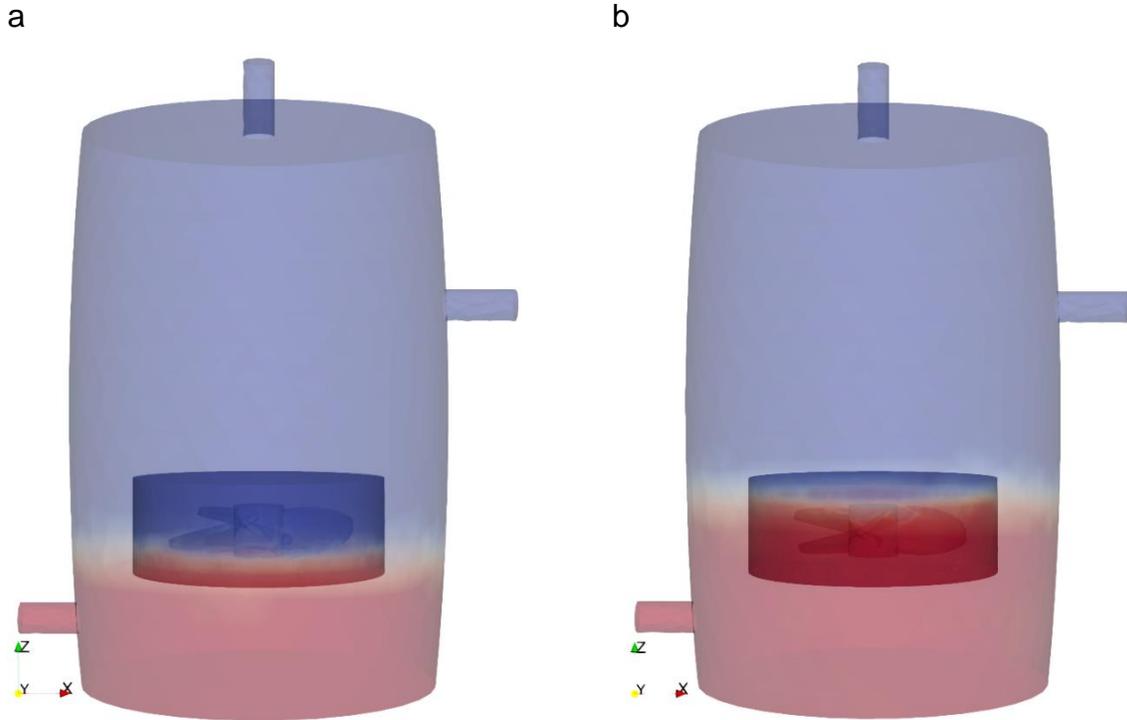


Figura 40. Nivel de líquido en el biodigestor: a) líquido alcanza el agitador en 61s, b) el agitador se sumerge en 85s.



Figura 41. Llenado del sistema en simulación 7 (171s).

A continuación, se presenta la magnitud de los esfuerzos en la simulación S9, que utiliza una densidad de 781.25 kg m^{-3} , una viscosidad cinemática de $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ y una tensión superficial de 0.07 N m^{-1} . En general, la gráfica de esfuerzos máximos en función del tiempo muestra un comportamiento similar al de S7 (Figura 42), aunque con magnitudes de esfuerzo menores. El pico máximo de esfuerzo, $0.23 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ (179.69 Pa), ocurre a los 58 s cuando el líquido toca el agitador (Figura 43a). A los 80 s, cuando el agitador se sumerge completamente (Figura 43b), la magnitud de los esfuerzos disminuye a $0.01 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ (7.81 Pa). Al rebosar el sistema a los 173 s (Figura 44), la magnitud de los esfuerzos aumenta ligeramente a $0.03 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ (23.44 Pa) y luego se estabiliza en un rango de 0.01 a $0.02 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ (7.81-15.63 Pa). Según los resultados obtenidos, cuando las propiedades reológicas y la densidad son elevados generan magnitudes de esfuerzos altos (Craig *et al.*, 2013).

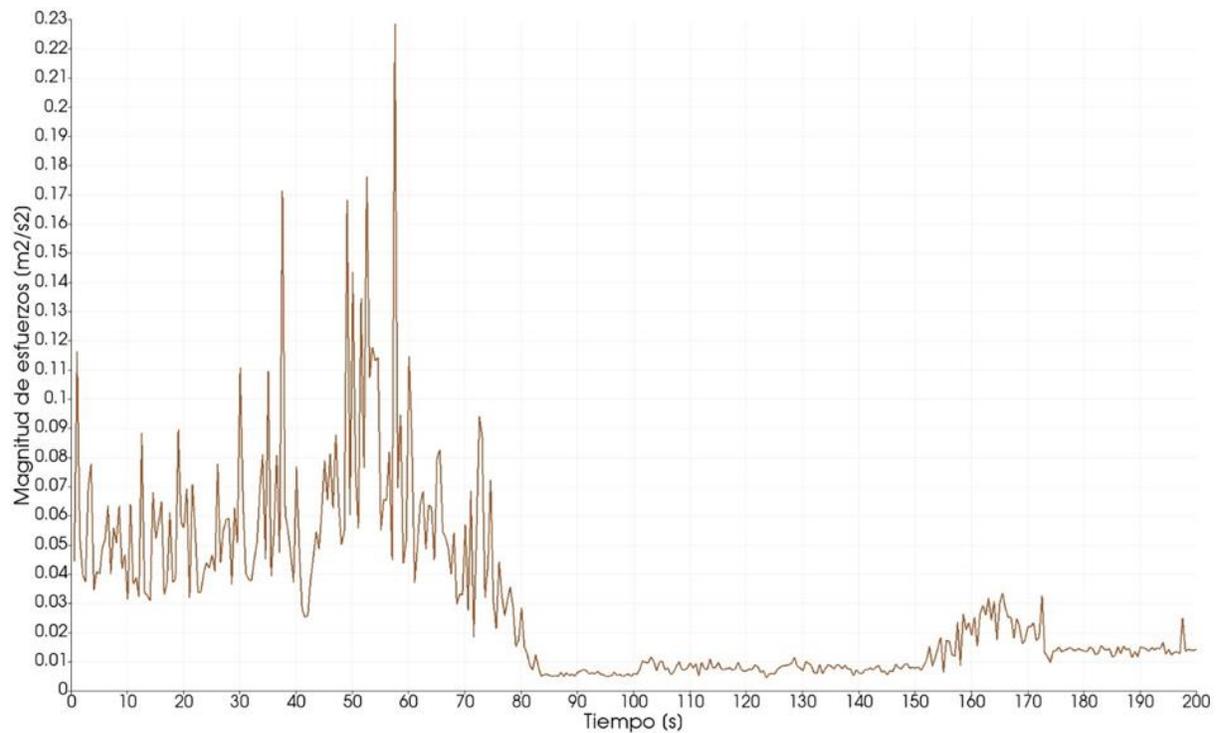


Figura 42. Esfuerzos en una mezcla con densidad de 781.25 kg m^{-3} .

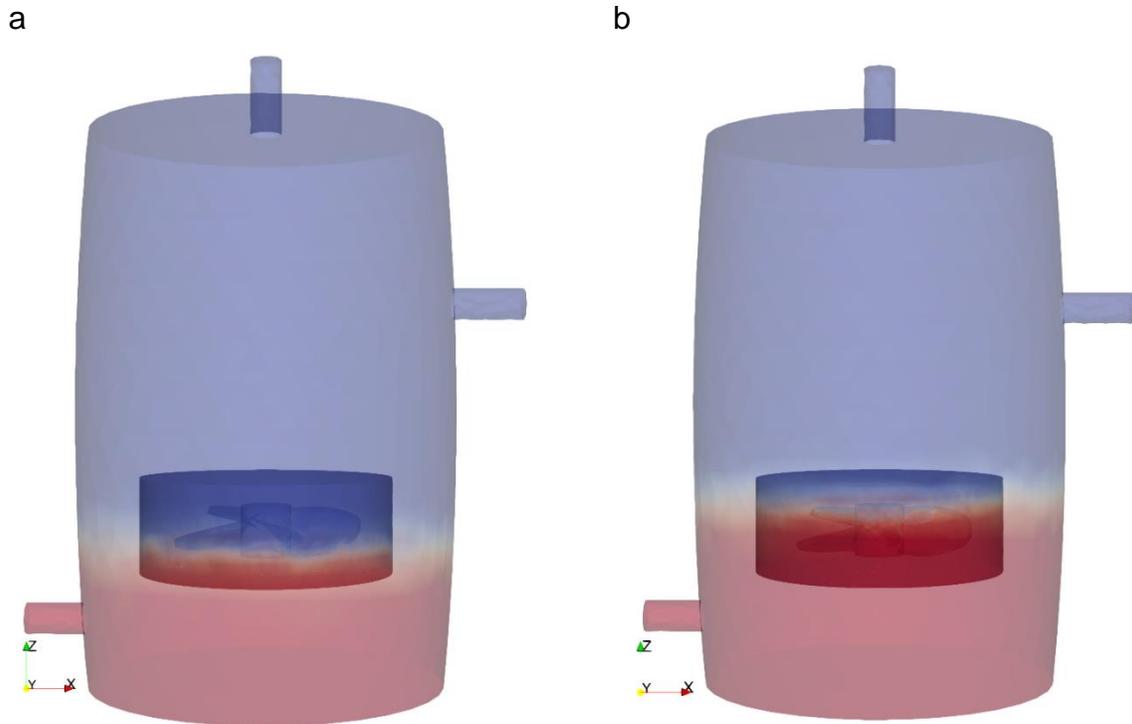


Figura 43. Nivel de líquido en el biodigestor: a) a los 58s se sumerge el agitador y b) a los 173s se desborda el líquido.



Figura 44. Llenado del sistema en simulación 9 (173s).

CONCLUSIONES

Esta investigación tuvo como objetivo diseñar y optimizar un biodigestor anaeróbico mediante la simulación de CFD, analizando diversas geometrías y configuraciones. A través de simulaciones detalladas, se evaluó el impacto de variables como la posición de la entrada, la agitación mecánica y las propiedades físicas de la mezcla en el desempeño hidrodinámico del sistema.

Los resultados mostraron que una alimentación tangencial a la superficie lateral mejora significativamente la homogeneidad de la mezcla, lo que sugiere que la geometría del biodigestor es un factor determinante para optimizar el proceso, superando en relevancia a la densidad de la mezcla. Entre las geometrías evaluadas, la configuración G1 destacó por su mejor desempeño, evidenciado por un entrelazamiento eficiente de las líneas de corriente en el centro del biodigestor, lo que promueve una mayor uniformidad en la mezcla.

Asimismo, la introducción de agitación mecánica contribuyó a una mayor homogeneidad de la mezcla, mientras que la elevación del agitador se identificó como un parámetro clave para mejorar dicha homogeneidad. En cuanto a los esfuerzos, se observó que, aunque la agitación mecánica incrementa los esfuerzos en las aspas y en todo el volumen del biodigestor, este efecto es moderado en comparación con el impacto que tiene el aumento de la densidad y la viscosidad cinemática de la mezcla. Este estudio contribuye a la optimización del diseño de biodigestores al identificar la geometría y la agitación como factores cruciales en la mejora de la eficiencia del sistema. Sin embargo, es necesario reconocer ciertas limitaciones, como la dependencia de los resultados en las condiciones de simulación empleadas, que podrían variar en escenarios reales.

RECOMENDACIONES

Futuros estudios podrían explorar la validación experimental de los resultados obtenidos en esta investigación y el análisis de diferentes materiales y condiciones operativas para afinar aún más el diseño de biodigestores anaeróbicos.

Se recomienda para futuras investigaciones realizar pruebas con distintas configuraciones del solucionador *OpenFOAM* para optimizar el costo computacional y mejorar la calidad del mallado. Las configuraciones de las condiciones de frontera deben considerar si existen fronteras expuestas a la atmósfera y revisar la presencia de flujos que entran o salen del dominio computacional para evitar resultados incorrectos.

Llevar a cabo simulaciones con agitadores de diferentes configuraciones y diseños, incluyendo agitadores helicoidales y agitadores con aspas ubicadas a diversas alturas. Este análisis debe evaluar las variables hidrodinámicas y los esfuerzos asociados.

Ejecutar simulaciones que integren tanto la parte hidrodinámica como la cinética química, con el objetivo de obtener perfiles de concentración para las distintas especies de microorganismos involucrados en las diferentes etapas del proceso de digestión anaeróbica, según el modelo ADM1.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agborambang, M. E., Fujiwara, M., Sekine, M., Bhatia, P., & Toda, T. (2024). *CFD simulation of the mixing process and performance evaluation of a two-way flow Chinese dome digester*. *Biosystems Engineering*, 240(February), 77–89. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.02.015>
- Barbazán, M., del Pino, A., Moltini, C., Hernández, J., & Rodríguez, J. (2011). *Characterization of organic materials applied in intensive farming systems in Uruguay*. *Agrociencia Uruguay*, 15(1), 82–92. Recuperado de http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S230115482011000100010&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Blanco, R., Lara, J. L., Barajas, G., Tejero, I., & Diez, R. (2020). *CFD simulation of a novel anaerobic-anoxic reactor for biological nutrient removal: Model construction, validation and hydrodynamic analysis based on OpenFOAM®*. *Chemical Engineering Science*, 215(xxxx), 115390. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.115390>
- Caillet, H., Bastide, A., & Adelard, L. (2021). *CFD Simulations in Mechanically Stirred Tank and Flow Field Analysis: Application to the Wastewater (Sugarcane Vinasse) Anaerobic Digestion*. *Promising Techniques for Wastewater Treatment and Water Quality Assessment*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.93926>
- Cimbala, J. M., y Cengel, Y. A. (2001). *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones* (1a. Ed.). McGrawHill Interamericana. México D.F., México. 997p.
- Craig, K. J., Nieuwoudt, M. N., & Niemand, L. J. (2013). *CFD simulation of anaerobic digester with variable sewage sludge rheology*. *Water Research*, 47(13), 4485–4497. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.05.011>
- Dabiri, S., Kumar, P., & Rauch, W. (2023). *Integrating biokinetics with computational fluid dynamics for energy performance analysis in anaerobic digestion*. *Bioresource Technology*, 373, 1-11. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2023.128728>

- De Jesus, S. S., Moreira Neto, J., & Maciel Filho, R. (2017). *Hydrodynamics and mass transfer in bubble column, conventional airlift, stirred airlift and stirred tank bioreactors, using viscous fluid: A comparative study*. *Biochemical Engineering Journal*, 118, 70–81. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2016.11.019>
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2011). *Biogas from Waste and Renewable Resources* (2 ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527632794>
- EBA. (2023). *EBA Statistical Report 2022*. European Biogas Association. Recuperado de https://www.europeanbiogas.eu/__trashed-3/
- FAO. (2011). *Manual de biogás*. Ministerio de Energía del Gobierno de Chile. Recuperado de <https://energia.gob.cl/documentos/manual-de-biogas>
- Gómez, X., Cuetos, M. J., Cara, J., Morán, A., & García, A. I. (2006). Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes: Conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate. *Renewable Energy*, 31(12), 2017–2024. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2005.09.029>
- Greenshields, C. J. (2022). *OpenFOAM The OpenFOAM Foundation User Guide*. Recuperado de <https://openfoam.org>
- Greenshields, C., & Weller, H. (2022). *Notes on Computational Fluid Dynamics: General Principles*. CFD Direct Ltd. Recuperado de <https://doc.cfd.direct/notes/cfd-general-principles/index>
- Gutiérrez, J. (2018). *Situación actual y escenarios para el desarrollo del biogás en México hacia 2024 y 2030*. Red mexicana de bioenergía A.C. Recuperado de <https://rembio.org.mx/wp-content/uploads/2023/05/Situacion-actual-y-escenarios-para-el-desarrollo-del-biogas-en-Mexico.pdf>
- Heyns, J. A., & Oxtoby, O. F. (2014). *Modelling surface tension dominated multiphase flows using the VOF approach*. 11th World Congress on Computational Mechanics, WCCM 2014, 5th European Conference on Computational Mechanics, ECCM 2014 and 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics,

ECFD 2014, Wccm Xi, 7082–7090.

Hoffmann, R. A., Garcia, M. L., Vesvikar, M., Karim, K., Al-Dahhan, M. H., & Angenent, L. T. (2008). *Effect of shear on performance and microbial ecology of continuously stirred anaerobic digesters treating animal manure*. *Biotechnology and Bioengineering*, 100(1), 38–48. <https://doi.org/10.1002/bit.21730>

Tobias Holzmann. *Mathematics, Numerics, Derivations and OpenFOAM(R)*. Holzmann CFD. Release 7.0. Recuperado de <https://Holzmann-cfd.com>. DOI: 10.13140/RG.2.2.27193.36960.

Kaparaju, P. L. N., & Rintala, J. A. (2008). *Effects of solid–liquid separation on recovering residual methane and nitrogen from digested dairy cow manure*. *Bioresource Technology*, 99(1), 120–127. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2006.11.046>

Karim, K., Varma, R., Vesvikar, M., & Al-Dahhan, M. H. (2004). *Flow pattern visualization of a simulated digester*. *Water Research* 38, 96, 3659–3670.

Khanchezar, S., Hashemi-Najafabadi, S., Shojaosadati, S. A., & Babaeipour, V. (2019). *Hydrodynamics and mass transfer in miniaturized bubble column bioreactors*. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 42(2), 257–266. <https://doi.org/10.1007/s00449-018-2030-0>

Kowalczyk, A., Harnisch, E., Schwede, S., Gerber, M., & Span, R. (2013). *Different mixing modes for biogas plants using energy crops*. *Applied Energy*, 112, 465–472. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2013.03.065>

Kress, P., Nägele, H.-J., Oechsner, H., & Ruile, S. (2018). *Effect of agitation time on nutrient distribution in full-scale CSTR biogas digesters*. *Bioresource Technology*, 247, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.054>

Lebranchu, A., Delaunay, S., Marchal, P., Blanchard, F., Pacaud, S., Fick, M., & Olmos, E. (2017). *Impact of shear stress and impeller design on the production of biogas in anaerobic digesters*. *Bioresource Technology*, 245, 1139–1147. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.113>

- Lemmer, A., Naegele, H.-J., & Sondermann, J. (2013). *How Efficient are Agitators in Biogas Digesters? Determination of the Efficiency of Submersible Motor Mixers and Incline Agitators by Measuring Nutrient Distribution in Full-Scale Agricultural Biogas Digesters*. *Energies*, 6(12), 6255–6273. <https://doi.org/10.3390/en6126255>
- Leonzio, G. (2018). *Study of mixing systems and geometric configurations for anaerobic digesters using CFD analysis*. *Renewable Energy*, 123, 578–589. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.071>
- Li, L., Wang, K., Wei, L., Zhao, Q., Zhou, H., & Jiang, J. (2022). *CFD simulation and performance evaluation of gas mixing during high solids anaerobic digestion of food waste*. *Biochemical Engineering Journal*, 178, 108279. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2021.108279>
- Lindmark, J., Eriksson, P., & Thorin, E. (2014a). *The effects of different mixing intensities during anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste*. *Waste Management*, 34(8), 1391–1397. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2014.04.006>
- Lindmark, J., Eriksson, P., & Thorin, E. (2014b). *The effects of different mixing intensities during anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste*. *Waste Management*, 34(8), 1391–1397. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.04.006>
- Martí, J. (2008). *Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación*. GTZ-Energía. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1048.6242>
- Jiménez, P. A. L. (2011). Modeling flow inside an anaerobic digester by CFD techniques. *International Journal of Energy and Environment*, 2(6). Recuperado de https://www.ijee.ieefoundation.org/vol2/issue6/IJEE_02_v2n6.pdf
- Meroney, R. N., & Sheker, R. E. (2014). *CFD Simulation of Vertical Linear Motion Mixing in Anaerobic Digester Tanks*. *Water Environment Research*, 86(9), 816–827. <https://doi.org/10.2175/106143014X14062131177836>
- Meroney, R. N., & Colorado, P. E. (2009). *CFD simulation of mechanical draft tube*

- mixing in anaerobic digester tanks*. *Water Research*, 43(4), 1040–1050. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.11.035>
- Mohammadian, A., Gildeh, H. K., & Yan, X. (2023). *Numerical Simulation of Effluent Discharges*. In *Numerical Simulation of Effluent Discharges*. <https://doi.org/10.1201/9781003181811>
- Moukalled, F., Mangani, L., & Darwish, M. (2016). *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics*. In *Fluid Mechanics and its Applications (Vol. 113)*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16874-6>
- Nandi, R., Saha, C. K., Huda, M. S., & Alam, M. M. (2017). *Effect of mixing on biogas production from cow dung*. *Eco-Friendly Agril J* 10(02), 07-13.
- OpenFOAM. (2021). *OpenFOAM: User Guide V2112*. OpenCFD Limited. Recuperado de <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/>
- Ortega, F. A., Álvarez, H., y Botero, H. A. (2017). *Enfrentando el modelado de bioprocesos: una revisión de las metodologías de modelado*. *Revista ION*, 30(1), 73–90. <https://doi.org/10.18273/revion.v30n1-2017006>
- Polgár, M., Agarwal, C., Gogate, P., Németh, G., & Csóka, L. (2022). *Using CFD simulations to investigate the shear stress in hydrodynamic cavitation reactors coupled with experimental validation using colony count measurements*. *Scientific Reports*, 12(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20349-7>
- Qi, W. K., Hojo, T., & Li, Y. Y. (2013). *Hydraulic characteristics simulation of an innovative self-agitation anaerobic baffled reactor (SA-ABR)*. *Bioresource Technology*, 136, 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.02.033>
- Rico, C., Rico, J. L., Munuz, N., Gomez, B., & Tejero, I. (2011). *Effect of mixing on biogas production during mesophilic anaerobic digestion of screened dairy manure in a pilot plant*. *Eng Life Sci* 11(5), 476-481.
- Sadino-Riquelme, M. C., Donoso-Bravo, A., Zorrilla, F., Valdebenito-Rolack, E., Gómez, D., & Hansen, F. (2023). *Computational fluid dynamics (CFD) modeling applied to biological wastewater treatment systems: An overview of strategies for*

- the kinetics integration*. Chemical Engineering Journal 466, 143-180.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143180>
- Sadino, C., Hayes, R. E., Jeison, D., & Donoso, A. (2018). *Computational fluid dynamic (CFD) modelling in anaerobic digestion: General application and recent advances*. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 48(1), 39–76.
<https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1440853>
- Sarathai, Y., Koottatep, T., & Morel, A. (2010). *Hydraulic characteristics of an anaerobic baffled reactor as onsite wastewater treatment system*. Journal of Environmental Sciences, 22(9), 1319–1326. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60257-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60257-6)
- Servati, P., & Hajinezhad, A. (2020). *CFD simulation of anaerobic digestier to investigate sludge rheology and biogas production*. Biomass Conversion and Biorefinery, 10(4), 885–899. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00793-z>
- Sharma, D., Amiroudine, S., Erriguible, A., & Sengupta, T. K. (2019). *Error growth and phase lag analysis for high Courant numbers*. Applied Mathematics and Computation, 346, 374–384. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2018.10.035>
- Shen, F., Tian, L., Yuan, H., Pang, Y., Chen, S., Zou, D., Zhu, B., Liu, Y., & Li, X. (2013). *Improving the mixing performances of rice straw anaerobic digestion for higher biogas production by computational fluid dynamics (CFD) simulation*. Applied Biochemistry and Biotechnology, 171(3), 626–642.
<https://doi.org/10.1007/s12010-013-0375-z>
- Shrestha, S., & Lohani, S. P. (2022). *CFD analysis for mixing performance of different types of household biodigesters*. Clean Energy, 6(2), 1090–1099.
<https://doi.org/10.1093/ce/zkac009>
- Tajsoleiman, T., Spann, R., Bach, C., Gernaey, K. V., Huusom, J. K., & Krühne, U. (2019). *A CFD based automatic method for compartment model development*. Computers & Chemical Engineering, 123, 236–245.
<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.12.015>

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.07.069>
- Tian, L., Zou, D., Yuan, H., Wang, L., Zhang, X., & Li, X. (2015). *Identifying proper agitation interval to prevent floating layers formation of corn stover and improve biogas production in anaerobic digestion*. *Bioresource Technology*, 186, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.018>
- Trad, Z., Fontaine, J. P., Larroche, C., & Vial, C. (2016). *Multiscale mixing analysis and modeling of biohydrogen production by dark fermentation*. *Renewable Energy*, 98, 264–282. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.094>
- Vavilin, V. A., & Angelidaki, I. (2005). *Anaerobic degradation of solid material: importance of initiation centers for methanogenesis mixing intensity, and 2D distributed model*. *Biotechnol Bioeng*, 89, 113–122.
- Verma, R., Mehan, L., Kumar, R., Kumar, A., & Srivastava, A. (2019). *Computational fluid dynamic analysis of hydrodynamic shear stress generated by different impeller combinations in stirred bioreactor*. *Biochemical Engineering Journal*, 151(July), 107312. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2019.107312>
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Pearson Education. England. 517p.
- Wang, H., Garcia, P. V., Ahmed, S., & Heggerud, C. M. (2022). *Mathematical comparison and empirical review of the Monod and Droop forms for resource-based population dynamics*. *Ecological Modelling*, 466, 109887. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.109887>
- WBA. (2019). *Bioenergy Sector at the Leading Edge of Transformation & Innovation*. The Official World Bioenergy Association Magazine. Recuperado de [https://www.worldbioenergy.org/uploads/190902%20WBA%20BIOENERGY%20Magazine%20Issue%208%20-%202019%20\(hq\).pdf](https://www.worldbioenergy.org/uploads/190902%20WBA%20BIOENERGY%20Magazine%20Issue%208%20-%202019%20(hq).pdf)
- Weiland, P. (2010). *Biogas production: Current state and perspectives*. *Applied*

Microbiology and Biotechnology, 85(4), 849–860. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>

Wiedemann, L., Conti, F., Janus, T., Sonnleitner, M., Z rner, W., & Goldbrunner, M. (2017). *Mixing in biogas digesters and development of an artificial substrate for laboratory-scale mixing optimization*. Chem Eng Technol 40.

Wimshurst, A. (2020,08,23). An introduction to the Courant number in modern Computational Fluid Dynamics (CFD) codes. Fluid Mechanics 101. Reino Unido. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=WBWY46ynRk0&t=399s>

Wimshurst, A. (2022,04,03). An introduction to relaxation and how it can be used to help improve convergence in CFD. Fluid Mechanics 101. Reino Unido. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=GSsv2ncNjN8&list=PLnJ8llgfDbkoZ33CHR-p6z2CBkp9OTcWj&index=10>

Wu, B. (2010a). *CFD simulation of mixing in egg-shaped anaerobic digesters*. Water Research, 44(5), 1507–1519. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2009.10.040>

Wu, B. (2010b). *Computational fluid dynamics investigation of turbulence models for non-Newtonian fluid flow in anaerobic digesters*. Environ Sci Technol 44.

Wu, B. (2012). *CFD simulation of mixing for high-solids anaerobic digestion*. Biotechnology and Bioengineering, 109(8), 2116–2126. <https://doi.org/10.1002/bit.24482>

Wu, B. (2014). *CFD simulation of gas mixing in anaerobic digesters*. Computers and Electronics in Agriculture, 109, 278–286. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.10.007>

Zhang, Y., Yu, G., Yu, L., Siddhu, M. A. H., Gao, M., Abdeltawab, A. A., Al-Deyab, S. S., & Chen, X. (2016). *Computational fluid dynamics study on mixing mode and power consumption in anaerobic mono- and co-digestion*. Bioresource Technology, 203, 166–172. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.12.023>

ANEXOS

Anexo 1. Configuración del algoritmo *PIMPLE* para su ejecución en modo PISO.

```
/*-----*- C++ -*-----*\
|=====|
|\ / Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
|\ / Operation | Version: 8 |
|\ / And | Web: www.OpenFOAM.org |
|\ / Manipulation |
\*-----*/
```

FoamFile

```
{
  version 2.0;
  format ascii;
  class dictionary;
  location "system";
  object fvSolution;
}
// ***** //
```

solvers

```
{
  "alpha.water.*"
  {
    nAlphaCorr 2;
    nAlphaSubCycles 1;
    cAlpha 1;

    MULESCorr yes;
    nLimiterIter 3;
```

```

    solver      smoothSolver;
    smoother    symGaussSeidel;
    tolerance   1e-8;
    relTol      0;
}
pcorrFinal
{
    solver      PCG;
    preconditioner DIC;
    tolerance   1e-5;
    relTol      0;

}

p_rgh
{
    solver      PCG;
    preconditioner DIC;
    tolerance   1e-07;
    relTol      0.05;
}

p_rghFinal
{
    $p_rgh;
    relTol      0;
}

U
{

```

```
    solver    smoothSolver;
    smoother  symGaussSeidel;
    tolerance 1e-06;
    relTol    0;
}
}
```

PIMPLE

```
{
    momentumPredictor no;
    nOuterCorrectors 1;
    nCorrectors      3;
    nNonOrthogonalCorrectors 0;
}
```

relaxationFactors

```
{
    equations
    {
        ".*" 1;
    }
}
```

```
// ***** //
```

Anexo 2. Configuración del algoritmo *PIMPLE* para su ejecución en modo *PIMPLE*.

```

/*-----*- C++ -*-----*\
|=====|
|\ / Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
|\ / Operation | Version: 8 |
|\ / And | Web: www.OpenFOAM.org |
|\ / Manipulation |
\*-----*/

FoamFile
{
    version 2.0;
    format ascii;
    class dictionary;
    location "system";
    object fvSolution;
}
// ***** //

solvers
{
    "alpha.water.*"
    {
        nAlphaCorr 2;
        nAlphaSubCycles 1;
        cAlpha 1;
        MULESCorr yes;
        nLimiterIter 3;
        solver smoothSolver;
        smoother symGaussSeidel;
        tolerance 1e-8;
        relTol 0;
    }
}

```

```

}
pcorrFinal
{
    solver      PCG;
    preconditioner DIC;
    tolerance   1e-5;
    relTol      0;
}
p_rgh
{
    solver      PCG;
    preconditioner DIC;
    tolerance   1e-07;
    relTol      0.05;
}
p_rghFinal
{
    $p_rgh;
    relTol      0;
}
U
{
    solver      smoothSolver;
    smoother    symGaussSeidel;
    tolerance   1e-06;
    relTol      0;
}
}
PIMPLE
{
    momentumPredictor no;

```

```
nOuterCorrectors 3;
nCorrectors      1;
nNonOrthogonalCorrectors 0;
}
relaxationFactors
{
  equations
  {
    "."* 0.95;
  }
}

// ***** //
```

Anexo 3. Configuración del tiempo en el archivo controldict

```
/*-----*- C++ -*-----*\n|=====  
| \\ / Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |  
| \\ / Operation | Version: 8 |  
| \\ / And | Web: www.OpenFOAM.org |  
| \\ / Manipulation |  
\\*-----*/
```

FoamFile

```
{  
    version 2.0;  
    format ascii;  
    class dictionary;  
    location "system";  
    object controlDict;  
}  
// ***** //  
application interFoam;  
startFrom startTime;  
startTime 0;  
stopAt endTime;  
endTime 300;  
deltaT 0.01;  
writeControl adjustableRunTime;  
writeInterval 0.05;  
purgeWrite 0;  
writeFormat ascii;  
writePrecision 6;  
writeCompression uncompressed;  
timeFormat general;  
timePrecision 6;
```

```
runTimeModifiable yes;  
adjustTimeStep yes;  
maxCo      1;  
maxAlphaCo 1;  
maxDeltaT  1;
```

```
// ***** //  
// ***** //
```

Anexo 4. Método de Mallado para MRF en *OpenFOAM*

Después de generar las mallas de geometría y rotor por separados en la herramienta Mesh de Salome, se continua con los siguientes pasos en la terminal:

1. Convertir mallas de salome a *OpenFOAM*

1.1 Entrar en la carpeta rotor

```
ideasUnvToFoam.exe rotor.unv
```

1.2 Revisar malla rotor

```
checkMesh
```

1.3 Entrar en la carpeta geometría

```
ideasUnvToFoam.exe stator.unv
```

1.4 Revisar malla geometría

```
checkMesh
```

1.5 Regresar en la carpeta que contiene a rotor y geometría para sobre-escribir la malla en la carpeta geometría.

```
mergeMeshes.exe -overwrite geometría rotor
```

1.6 Regresar a la carpeta geometría y revisar malla

```
checkMesh
```

1.7 Visualizar en paraview

```
paraFoam
```

1.8 Abrir archivo boundary y cambiar la configuración de tipo patch a AMI_1 Y AMI_2

1.9 Configurar archivo toposetdict en la carpeta System

```
topoSet
```

1.10 Configurar zona de rotor

```
setSet
```

1.11 Revisar región le corresponde al rotor.

```
readline>>help, a veces es command>>help
```

```
cellZoneSet rotor new setToCellZone region1
```

1.12 Salir de la configuración (la malla MRF esta lista).

```
quit
```