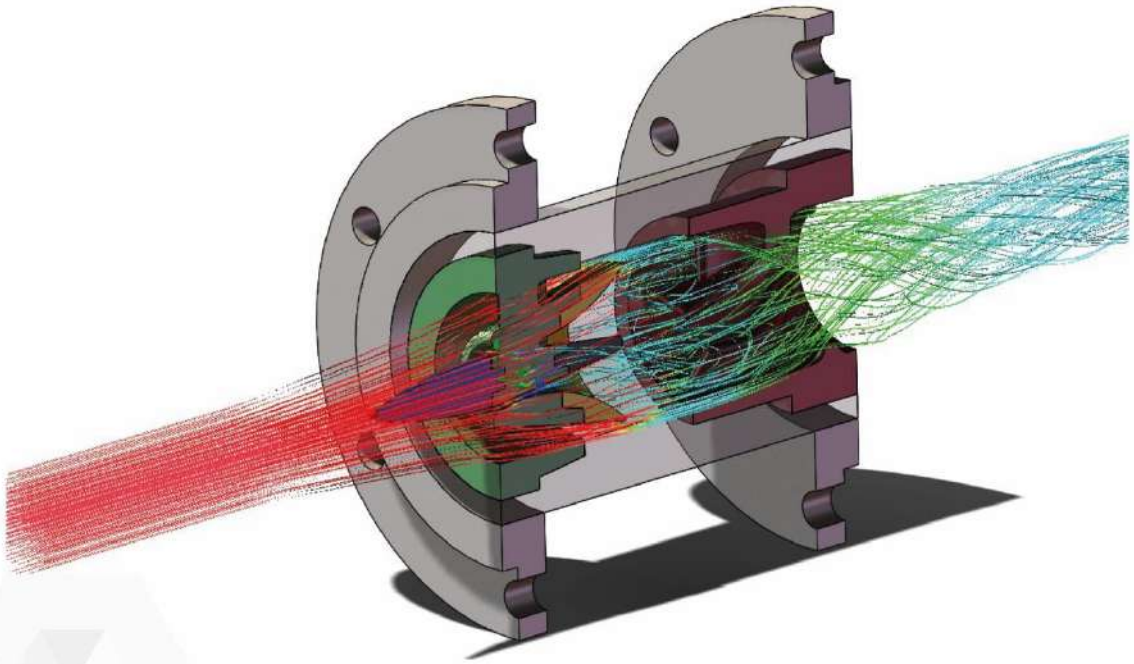
UNISANGIL
VIGILADA MINEDUCACIÓN

Cavitación hidrodinámica para el tratamiento de vertidos no convencionales



Proyecto Cavitación

UNISANGIL editora

ISBN: 978-628-96208-6-3

Cavitación hidrodinámica para el tratamiento de vertidos no convencionales

Hydrodynamic cavitation for the treatment of non-conventional effluents

De

Milton Javier Muñoz Neira, Wilson Gamboa Contreras, Frank Carlos Vargas Tangua, Freddy Alexander Jara Mora, Jorge Alberto Neira Tavera, Luis Eduardo Cobos Ramírez, Yuleimy Ramírez Ordoñez, Fabio Andrés Dueñas Bohórquez, Azucena Ayala Ramírez, Sandra Johana Benítez Muñoz, Yeimy Marcela Martínez Santana, Sergio Andrés Peña Perea, Chandrakant R. Holkar, Ananda J. Jadhav, y Aniruddha B. Pandit

© Copyright Año de publicación 2025. UNISANGIL Editora. Todos los derechos reservados.

Es ilegal reproducir, copiar o difundir cualquier parte de este documento en formato digital o en papel. Está totalmente prohibido registrar esta publicación.

Cavitación hidrodinámica para el tratamiento de vertidos no convencionales
Hydrodynamic cavitation for the treatment of non-conventional effluents

ISBN: 978-628-96208-6-3
Fecha de publicación: mayo 08 de 2025

Fundación Universitaria de San Gil - UNISANGIL
www.unisangil.edu.co

Editorial: Unisangil editora
unisangileditora@unisangil.edu.co
investigacionsangil@unisangil.edu.co

Coordinación editorial
Departamento de Investigación UNISANGIL

Autores capítulos 1,2 y 3:
Milton Javier Muñoz Neira
Wilson Gamboa Contreras
Frank Carlos Vargas Tangua
Freddy Alexander Jara Mora
Jorge Alberto Neira Tavera
Luis Eduardo Cobos Ramírez
Yuleimy Ramírez Ordoñez
Fabio Andrés Dueñas Bohórquez
Azucena Ayala Ramírez
Sandra Johana Benítez Muñoz
Yeimy Marcela Martínez Santana
Sergio Andrés Peña Perea

Autores capítulo 4:
Chandrakant R. Holkar
Ananda J. Jadhav
Aniruddha B. Pandit

Evaluadores:
Manuel Fernando Roa Ardila
Cesar Augusto Castellanos Morales

San Gil, Santander, Colombia
Km 2 vía San Gil – Charalá
Teléfonos: (607) 6852925 - 6852926 Ext. 2110

Licencia Creative Commons
Attribution NonCommercial- NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

Tabla de contenido

Tabla de contenido 2
Lista de figuras 3
Lista de tablas 5
Introducción 8
Capítulo I: Fundamentos de la Cavitación Hidrodinámica 10
Marco Teórico y Conceptual 11
Estado del Arte 26
Capítulo II: Montaje de un Sistema de HC 36
Esquema General Automatizado de un Sistema de HC 37
CFD para el diseño de reactores de cavitación 40
Consideraciones para las Pruebas Microbiológicas y Fisicoquímicas 57
Capítulo III: Experiencias de Tratamiento de Aguas Residuales con HC 60
HC en el Manejo de Aguas Residuales Vertidas en el Río Fonce 61
HC en el Manejo de Lixiviados 74
HC en el Manejo de Aguas Residuales en una Planta de Beneficio Animal 77
HC en el Manejo de Aguas Residuales del Beneficio del Café 80
Chapter IV: Future Perspectives 84
Introduction 85
New Proposed Research Work in UNISANGIL Colombia 85
Challenges 93
Future 94
Epílogo o conclusión 97
Bibliografía 99
Agradecimientos 109

Lista de figuras

Figura 1. Expansión del radio de una burbuja con $P\infty = 5x105$ Pa, $PB = 1x105$ Pa, y $R0 = 50\mu m$.. 12
Figura 2. Expansión del radio de una burbuja con $P\infty = 0.2x105$ Pa, $PB = 1x105$ Pa, y $R0 = 50\mu m$.. 12
Figura 3. Expansión sostenida en el tiempo del radio de una burbuja con $P\infty = 0.2x105$ Pa, $PB = 1x105$ Pa, y $R0 = 50\mu m$. 13
Figura 4 Colapso de una burbuja de cavitación en las proximidades de una superficie libre al ser atravesada por un micro chorro de líquido. 14
Figura 5. Fenómenos experimentados por las burbujas en un campo ultrasónico 15
Figura 6. Ejemplo de sistema de cavitación ultrasónico para tratamiento de una solución. .. 15
Figura 7. Relación entre la velocidad del flujo (intensidad de la cavitación) y la energía de Entrada 18
Figura 8. Ejemplo placas con orificios 19
Figura 9. Ejemplo reactores tipo Venturi 20
Figura 10. Ejemplo reactor diodo de vórtice 20
Figura 11. Ejemplo reactor rotativo 21
Figura 12. Variaciones de presión de un fluido al pasar por una placa con orificio 22
Figura 13. Explicación gráfica de la muerte de los microorganismos por efecto de la cavitación. 22
Figura 14. Explicación gráfica del rompimiento de la membrana celular y daño del ADN en los microorganismos por la cavitación 23
Figura 15. Micrografía electrónica de barrido de E. coli. Cuadros a) y b) a 0 minutos de cavitación. Cuadros c) y d) a los 10 minutos de cavitación 23
Figura 16. Microscopía de fuerza atómica de E. coli. A y E antes del tratamiento. B, C, D, F, G y H, después de cinco ciclos de tratamiento 24
Figura 17. Áreas temáticas asociadas la Cavitación Hidrodinámica 27
Figura 18. Autores con mayor número de publicaciones en HC 27
Figura 19. Países con mayor número de publicaciones en HC 28
Figura 20. Palabras Claves asociadas a la HC 28
Figura 21. Palabras Claves asociadas al Tratamiento de Aguas Residuales con HC 28
Figura 22. Palabras claves asociadas a la Desinfección de Aguas Residuales con HC 29
Figura 23. Esquema general de un sistema tratamiento de aguas a través de HC 37
Figura 24. Esquema proceso de simulación a través de CFD 42
Figura 25. Geometría de un reactor de cavitación de doble aleta 43
Figura 26. Geometría Reactor Doble Aleta y Generador de Vorticidad. 44
Figura 27. Curva de la bomba como condición de frontera a la entrada del reactor 46
Figura 28. Geometría de las aletas en un reactor con dos aletas. 49
Figura 29. Contorno del número de cavitación para β1 y β2 50
Figura 30. Contorno del número de cavitación para φ1, φ2 50
Figura 31. CAD del reactor con doble aleta, diseño para evaluar fabricación 51

Figura 32. Resultados simulación con CFD – Bomba de 10 HP.....53
Figura 33. Resultados de Simulación CFD para la Presión Relativa y la Velocidad del Flujo54
Figura 34. Definición de la calidad del vapor, x, en el fenómeno de la cavitación.....55
Figura 35. Relación entre el delta de presión y el caudal obtenida por simulación CFD y por modelado teórico.....56
Figura 36. Hidrografía del departamento de Santander, Colombia.....62
Figura 37. Resultados Rr de Coliformes Totales con HC en muestras de aguas residuales del río Fonce.....65
Figura 38. Resultados LR de Coliformes Totales con HC en muestras de aguas residuales del río Fonce.....65
Figura 39. Resultados Rr de E. coli con HC en muestras de aguas residuales del río Fonce.66
Figura 40. Resultados LR de E. coli con HC en muestras de aguas residuales del río Fonce 67
Figura 41. Foto cabina con sistema HC para procesamiento in situ de aguas residuales vertidas al río Fonce 70
Figura 42. Detalle reactores de cavitación experimentados en proceso de reducción de microorganismos in situ.....70
Figura 43. Resultados Promedio Rr (%) Reactor Venturi – Reducción microbiana in situ de un solo paso.....72
Figura 44. Resultados Promedio LR Reactor Venturi – Reducción microbiana in situ de un solo paso. 72
Figura 45. Reducción Logarítmica promedio para reducción microbiana con HC en lixiviados. 76
Figura 46. Porcentaje de reducción de microorganismos con HC en lixiviados. 77
Figura 47. Porcentaje de reducción de microorganismos con HC en aguas residuales de una planta de beneficio animal. 79
Figura 48. Reducción Logarítmica de microorganismos con HC en aguas residuales de una planta de beneficio animal 79
Figura 49. Residuos generados en el proceso del café 80
Figura 50. Porcentaje de reducción en aguas residuales del café con HC de un solo paso 81
Figura 51. Reducción Logarítmica en aguas residuales del café con HC de un solo paso.....82
Figura 52. Porcentaje de reducción en aguas residuales del café con HC de 60 minutos 82
Figura 53. Reducción Logarítmica en aguas residuales del café con HC de un solo paso.....82
Figure 54. Process Demonstration: Combination of cavitation and UV irradiation and chemical oxidants (Hydrogen Peroxide, Ozone and Fenton`s reagent) 86
Figure 55. Harnessing the existing static pressure of water in dam to create cavitation. 89
Figure 56. Proposed Process Intensification in wastewater treatment.....95

Lista de tablas

Tabla 1. Condiciones Iniciales Simulación Reactor Doble Aleta 44
Tabla 2. Condiciones de Frontera a la Entrada del Reactor. 45
Tabla 3. Condiciones de Frontera a la Salida del Sistema Reactor más Generador de Vorticidad. 45
Tabla 4. Objetivos de Ingeniería. 47
Tabla 5. Resultados de Simulación con Bomba de 10 HP 52
Tabla 6. Caracterización Orgánica y Microbiológica Muestras de Agua Residual Urbana Vertida al Río Fonce. 62
Tabla 7. Parámetros para el Cálculo de las KFU/J 68
Tabla 8. Presiones, Caudal y Concentraciones Reactor Venturi - Proceso de HC in situ 71
Tabla 9. Comparativo Entre Resultados de Tratamiento de Aguas Residuales por HC Obtenidos por UNISANGIL y por Otros Trabajos Similares. 73
Tabla 10. Presiones de Entrada – Salida y Concentración Inicial de Microorganismos en el Procesamiento de Lixiviados. 75
Tabla 11. Resultados Fisicoquímicos Tratamiento Lixiviados con HC 76
Tabla 12. Presiones de Entrada – Salida y Concentración Inicial de Microorganismos en el Procesamiento de Aguas Residuales de Una Planta de Beneficio Animal 78

Introducción

La cavitación hidrodinámica (HC por sus iniciales en inglés) es un fenómeno físico explorado en el mundo de la ciencia desde los albores del siglo veinte, el cual, inicialmente despertó particular interés por su relación con problemas asociados a la corrosión y avería de los sistemas hidráulicos, pero que sucesivamente se ha venido explorando de manera controlada para un número variado de importantes aplicaciones tecnológicas, que abarcan, entre otros aspectos, la síntesis de nuevos materiales, el procesamiento de alimentos y el tratamiento de aguas residuales. Este último tópico es de especial relevancia, dada la urgente necesidad mundial de optimizar el uso del recurso hídrico, en procura de que la disponibilidad de agua potable para toda la población, no se vea amenazada. Es así como uno de los objetivos de desarrollo sostenible fijados por la Organización de las Naciones Unidas ONU, es la meta global de garantizar la disponibilidad de agua limpia, su gestión sostenible y el saneamiento para toda la población mundial. Tal realidad global es visible en los entornos locales, como el caso de la denominada Provincia de Guanentá, cuyo municipio de San Gil es su centro, y se ubica al sur del departamento de Santander, en Colombia. La economía de esta región está fuertemente ligada a su principal fuente hídrica, la cuenca del río Fonce, en torno a la cual gira su desarrollo agrícola y las prácticas ecoturísticas.

En este marco de ideas, la Fundación Universitaria de San Gil, UNISANGIL, una institución académica con visión global pero centrada en las posibilidades de las regiones locales en las que hace presencia, y su Departamento de Investigación, con el apoyo del Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación de Colombia, a través de la financiación del Fondo Nacional de Regalías, se dio a la tarea de potenciar sus exploraciones de laboratorio orientadas a la comprensión y el uso de la tecnología de cavitación hidrodinámica, proyectándola como una alternativa viable y sostenible para el tratamiento y desinfección de aguas contaminadas. Diversos frentes de trabajo motivaron estos desarrollos, entre ellos el manejo de las aguas residuales que son vertidas al importante río Fonce de San Gil, así como el manejo de los lixiviados producidos en el relleno sanitario de la región, el procesamiento de las aguas residuales de la planta de beneficio animal de la provincia, o, de las aguas generadas en los cientos de beneficios cafeteros que se efectúan en sus campos.

El presente libro, expone al público interesado en el tema, los fundamentos de la técnica, al tiempo que elabora una síntesis de los notables trabajos de investigación y aplicación tecnológica realizados por UNISANGIL, con el fin de contribuir a la divulgación científica del fenómeno de la cavitación hidrodinámica, y de provocar el ánimo de una mayor exploración de sus posibilidades, en procura del logro de más aplicaciones concretas que beneficien a la población regional y desde ellas, se proyecten al mundo entero.

El primer capítulo esboza los fundamentos de esta tecnología, detalla algunas de sus principales aplicaciones y resume un estado del arte a partir de publicaciones destacadas en el tema. El capítulo dos, por su parte, describe aspectos esenciales para la estructuración de un sistema de cavitación hidrodinámica, al tiempo que resume los principales aspectos del uso de la dinámica computacional de fluidos (computational fluid dynamics, CFD), para el diseño de reactores de cavitación, con base en la experiencia de diseño llevada a cabo por UNISANGIL. Este capítulo aporta también elementos clave para el análisis microbiológico del manejo de aguas residuales por medio de HC. El capítulo tres resume las aplicaciones abordadas por UNISANGIL para el manejo con HC de aguas residuales urbanas, lixiviados, aguas residuales de una planta de beneficio animal, y aguas residuales de un beneficio de café. Finalmente, el capítulo cuatro presenta la muy interesante visión de tres voces expertas, de gran notabilidad mundial, sobre los desafíos y las perspectivas futuras para la cavitación hidrodinámica: el Dr. Aniruddha B. Pandit, el Dr. Chandrakant Holkar, y el Dr. Ananda J. Jadhav, todos del Institute of Chemical Technology de Mumbai. El Dr. Pandit, por ejemplo, es uno de los autores más citados en el mundo en temas relacionados con HC (con más de 39000 citas). Contar con la destacada opinión de estos dos científicos en estas letras, además de ser un honor para UNISANGIL como autora y editora del libro, constituye un legado muy importante a espera de alentar futuros trabajos en HC.

El texto ha procurado emplear un lenguaje claro y sencillo, manteniendo al tiempo la rigurosidad científica, pero sin caer en intrincados tecnicismos que limiten su carácter divulgativo. Para los autores, es claro que esta tecnología tiene un potencial enorme para tratar aguas residuales y contribuir de manera significativa a la reducción de su carga microbiana. Su viabilidad tanto a nivel de escalabilidad industrial, como de consumo energético es evidente. Gran parte del valioso aporte de UNISANGIL ha sido demostrar que es posible sacar esta tecnología de la escala de laboratorio y experimentarla con éxito en entornos reales. Esperamos que esta obra, sea también una contribución a la apropiación social del conocimiento en cavitación hidrodinámica, que impulse futuros desarrollos, en asocio, probablemente, con otras tecnologías emergentes. Que este aporte desde lo regional haga que cada día sea más cierta la frase de Mandela: "*Education is the most powerful weapon which you can use to change the world* ", que el poder de las burbujas contribuya a dar ese paso siempre adelante, para que el sueño de un mundo sostenible sea posible.

Capítulo I: Fundamentos de la Cavitación Hidrodinámica

Milton Javier Muñoz Neira, Wilson Gamboa Contreras, Frank Carlos Vargas Tangua, Freddy Alexander Jara Mora, Jorge Alberto Neira Tavera, Luis Eduardo Cobos Ramírez, Yuleimy Ramírez Ordoñez, Fabio Andrés Dueñas Bohórquez, Azucena Ayala Ramírez, Sandra Johana Benítez Muñoz, Yeimy Marcela Martínez Santana, Sergio Andrés Peña Perea.

Departamento de Investigación de UNISANGIL, San Gil, Colombia.

*Autor de correspondencia

Email: mmunoz@unisangil.edu.co (Milton Javier Muñoz Neira)

Marco Teórico y Conceptual

El fenómeno de la cavitación.

Cavitación es un término que deriva del latín *cavitas* y significa cavidad. Hace referencia al fenómeno físico caracterizado por la formación de burbujas en un líquido, como consecuencia de las variaciones de presión que éste experimenta. Una de las primeras descripciones formales de dicho fenómeno se encuentra en los trabajos del Lord Rayleigh, científico británico nacido en 1842, estudioso de la acústica, la óptica y la propagación de las ondas; premio nobel de física en 1904[1]. Los estudios de Rayleigh fueron complementados por Milton Plesset, físico estadunidense que trabajó con amplitud la mecánica de fluidos. La denominada ecuación de Rayleigh-Plesset, descrita en la Ecuación (1), la cual fue obtenida primero por Rayleigh y usada posteriormente por Plesset para analizar el fenómeno de la cavitación, modela por medio de una ecuación diferencial ordinaria no lineal y de segundo orden, derivada de las ecuaciones de Navier- Stoke, la dinámica de una burbuja de vapor inmersa en un líquido:

$$\frac{P_B(t) - P_\infty(t)}{\rho_L} = R\frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2}\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 + \frac{4\nu_L}{R}\frac{dR}{dt} + \frac{2S}{\rho_L R} \qquad (1)$$

Siendo,

$P_B(t)$, la presión al interior de la burbuja, asumida como uniforme y variante en el tiempo (t). Puede ser equivalente a la presión de vapor.

$P_\infty(t)$, la presión instantánea externa que es aplicada a la burbuja se considera, por simplicidad, que se encuentra en un líquido infinito, el cual, a su vez, se halla en un estado de reposo en el infinito. Infinito que puede entenderse, en la práctica, como la situación en la que el radio de la burbuja es al menos, cien veces menor que el eventual radio del recipiente que contiene al líquido, y al interior del cual se genera la burbuja.

ρ_L, la densidad del líquido, asumida como constante.

$R(t)$, el radio de la burbuja, variante en el tiempo.

ν_L, la viscosidad cinemática del líquido que rodea la burbuja.

S, la tensión superficial de la burbuja.

Si se conoce el delta de presión, $P_B(t) - P_\infty(t)$, la Ecuación (1) permite encontrar la variación del radio de la burbuja con el tiempo $R(t)$. Este delta, determina la evolución de la burbuja, su crecimiento, colapso, u oscilación (Franc, 2007). A modo de ejemplo, la Figura 1 muestra la evolución de una burbuja en el tiempo, a partir de la solución numérica de la Ecuación 1, despreciando el efecto de la viscosidad y la tensión superficial ($\nu_L = 0, S = 0$), asumiendo una $P_\infty = 5x10^5$ Pa, una $P_B = 1x10^5$ Pa, y un radio inicial de la burbuja $R_0 = 50\mu m$. Al ser negativo

[1] Biografía completa disponible en: https://www.britannica.com/biography/John-William-Strutt-3rd-Baron-Rayleigh

el delta de presión (presión externa mayor que la interna), la burbuja tiende al colapso, y al cabo de 3 microsegundos, su radio es aproximadamente el 10% del radio inicial. La Figura 2, por su parte, muestra la situación inversa, siendo $P_\infty = 0.2x10^5$ Pa y $P_B = 1x10^5$ Pa. En este caso, el delta de presión es positivo, la burbuja tiende a expandirse, y al cabo de 3 microsegundos su radio es al menos un 14% mayor que el radio inicial.

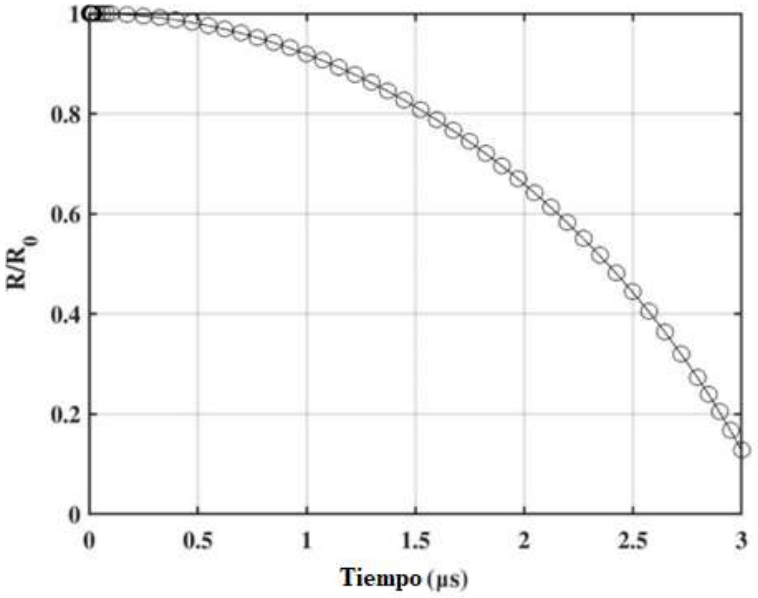


Figura 1. Expansión del radio de una burbuja con $P_\infty = 5x10^5$ Pa, $P_B = 1x10^5$ Pa, y $R_0 = 50\mu m$. Fuente: Los autores.

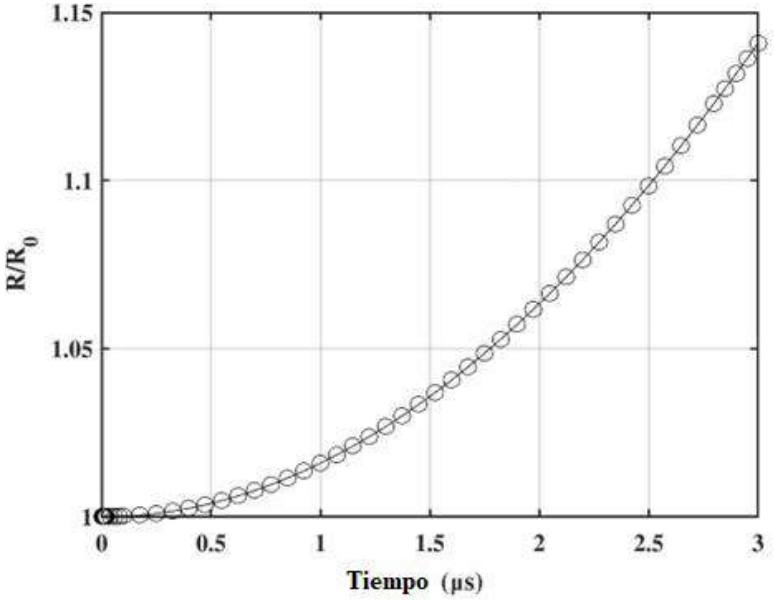


Figura 2. Expansión del radio de una burbuja con $P_\infty = 0.2x10^5$ Pa, $P_B = 1x10^5$ Pa, y $R_0 = 50\mu m$. Fuente: los autores.

Si la misma condición de la Figura 2 ($P_\infty < P_B$) se mantiene en el tiempo, se obtiene la Figura 3. En ella se aprecia como la burbuja sometida a este delta de presión se expande hasta un punto máximo, a partir del cual iniciará su colapso hasta su posterior explosión.

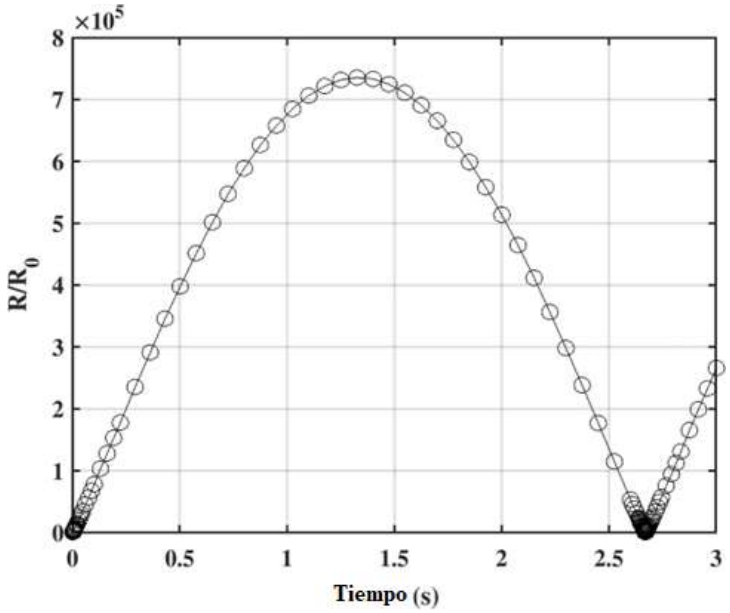


Figura 3. Expansión sostenida en el tiempo del radio de una burbuja con $P_\infty = 0.2x10^5$ Pa, $P_B = 1x10^5$ Pa, y $R_0 = 50\mu m$. Fuente: los autores.

Es claro entonces que las variaciones de presión guían la dinámica de la formación de burbujas. En la Figura 4, puede observarse una imagen real del colapso de una burbuja, producido por un microchorro de líquido inducido por una superficie libre. En ella se detalla como a medida que la burbuja colapsa, se pliega sobre sobre sí misma y es atravesada por el microchorro.

Una cavitación intensa puede ocasionar fenómenos mecánicos, químicos y térmicos extremos en la corriente del fluido, según lo comenta (Ozonek, 2012). Entre estos fenómenos se encuentran los siguientes efectos:

- Mecánicos: generación de turbulencia y aumento de la transición de fase líquido-vapor en la superficie límite de las burbujas, que se generan a causa de la reducción de la presión hasta por debajo de la presión de vapor.
- Químicos: generación de radicales hidróxilos, ozono y otras reacciones químicas.
- Térmicos: aumento de la temperatura y la presión.

Las variaciones de presión para la generación de cavitación pueden realizarse a través de diversos métodos, los guales pueden clasificarse en dos grandes grupos: métodos acústicos y métodos hidrodinámicos.

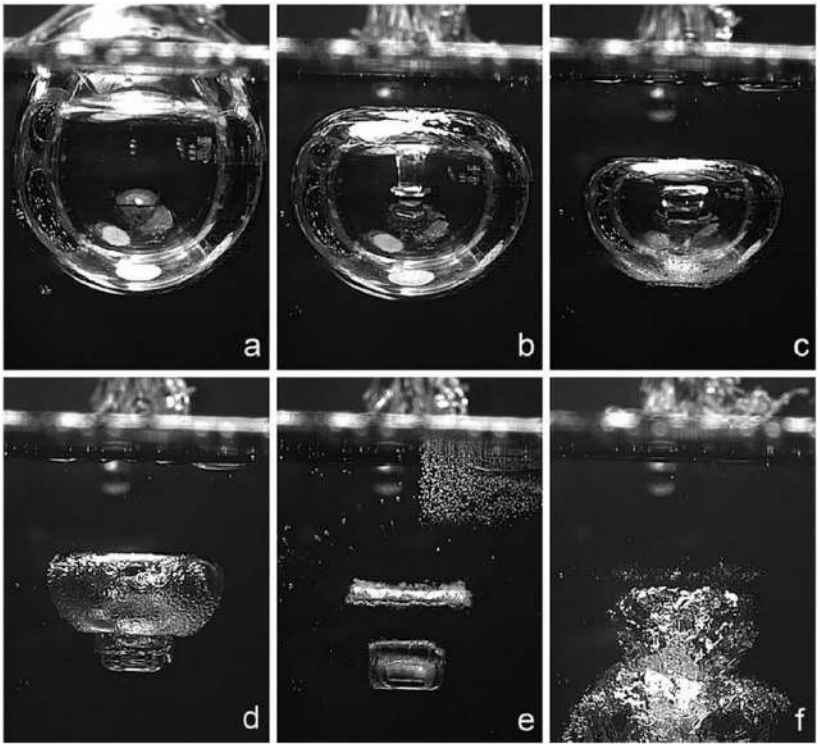


Figura 4 Colapso de una burbuja de cavitación en las proximidades de una superficie libre al ser atravesada por un micro chorro de líquido. Fuente: imagen presentada en (Sun et al., 2020).

Cavitación Acústica

La presencia de un campo acústico puede producir cavitación, y principalmente, la cavitación acústica es generada a partir de ultrasonido. El ultrasonido está relacionado con vibraciones a frecuencias mayores al rango de audición humana, el cual es de 20 kilo-Hertz. La exposición de un líquido a ondas ultrasónicas ocasiona variaciones de presión que se propagan a través del líquido con cada ciclo de las ondas (Ashokkumar, 2011; Du & Chen, 2021). Esta compresión y rarefacción del líquido produce la formación y un violento colapso de las burbujas.

En medio de un campo acústico, las burbujas pueden experimentar, entre otros, los siguientes fenómenos (ver Figura 4):

- Crecimiento de las burbujas como consecuencia de la concentración de las ondas en una dirección preferencial (difusión rectificada).
- Combinación de dos o más burbujas para formar una burbuja de mayor tamaño (coalescencia).
- Disolución o colapso de las burbujas, lo cual a su vez puede generar reacciones químicas secundarias, entre ellas la producción de radicales libres.
- Sonoluminiscencia (SL), o generación de luz como consecuencia del sometimiento del líquido a ondas ultrasónicas de alta intensidad, que generan y colapsan burbujas en tiempos muy cortos.

Un esquema que ilustra un posible montaje de un sistema de cavitación ultrasónico se muestra en la Figura 5. Nótese como los transductores ultrasónicos generan las ondas que ocasionan la cavitación en el líquido que circula por el sistema.

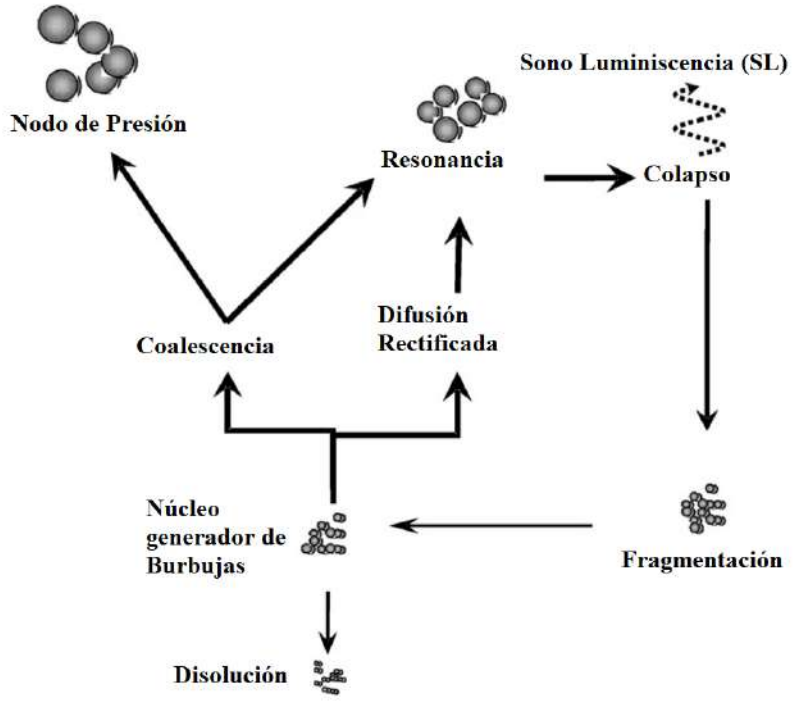


Figura 5. Fenómenos experimentados por las burbujas en un campo ultrasónico. Adaptado de (Ashokkumar et al., 2007)

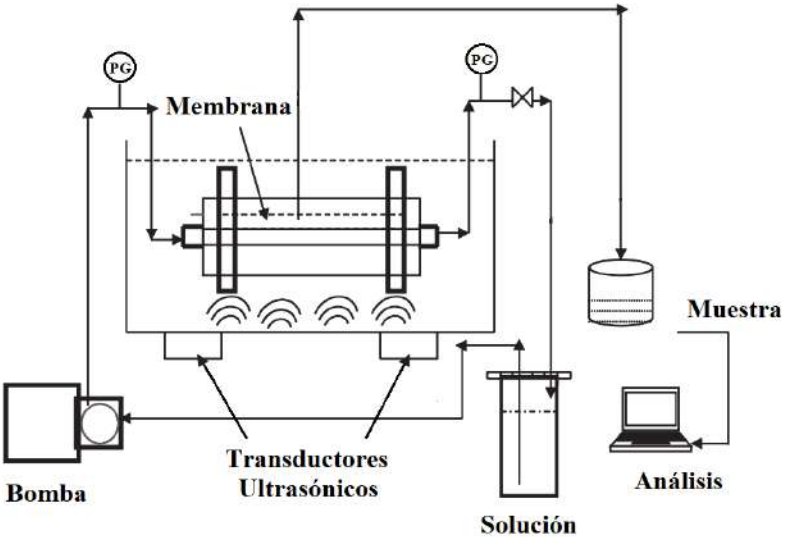


Figura 6. Ejemplo de sistema de cavitación ultrasónico para tratamiento de una solución. Adaptado de (Yusof et al., 2016)

La cavitación ultrasónica tiene aplicaciones en diversos campos, entre ellos la purificación de agua y desactivación de patógenos (Yusof et al., 2016), la mezcla de líquidos inmiscibles (Han et al., 2022), la síntesis de nanomateriales (Hangxun et al., 2013) y la litotricia (pulverización de cálculos renales y biliares, (Ghorbani et al., 2016)).

Cavitación Hidrodinámica

La cavitación hidrodinámica, por su parte, es ocasionada por variaciones en la velocidad de un fluido, las cuales a su vez generan deltas de presión que inducen en el líquido que fluye la generación de burbujas. Su intensidad puede determinarse con base en la ecuación de Bernoulli (ver Ecuación 2).

$$\frac{P_1}{\rho_1 g} + \frac{v_1^2}{2g} + H_1 = \frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{v_2^2}{2g} + H_2 \tag{2}$$

Siendo P_1 la presión a la entrada del elemento mecánico que produce la cavitación (reactor de cavitación), ρ_1 la densidad del fluido a la entrada, v_1 la velocidad del fluido a la entrada, P_2 la presión a la salida del reactor, ρ_2, la densidad del fluido a la salida, v_2 la velocidad del fluido a la salida, H_1 la altura del fluido a la entrada, H_2 la altura del fluido a la salida, y g la aceleración de la gravedad; si el fluido a la entrada y salida del reactor se encuentra a la misma altura, la Ecuación 2 puede transformarse en la Ecuación 3.

$$v_1^2 - v_2^2 = 2\left(\frac{P_2 - P_1}{\rho}\right) \tag{3}$$

Si se divide la Ecuación 3 en la velocidad de entrada al cuadrado (v_1^2), y si se asume que la presión en la entrada de la restricción es lo suficientemente baja para que el agua alcance su presión de vapor, de modo que $P_1 = P_v$, y la velocidad de entrada se hace igual a la velocidad en la restricción del reactor ($v_1 = v_h$), la relación se transforma en la Ecuación 4, la cual define el término conocido como factor de dispersión o número de cavitación, σ_v.

$$\sigma_v = 1 - \frac{v_2^2}{v_h^2} = \frac{P_2 - P_v}{\frac{\rho\, v_h^2}{2}} \tag{4}$$

El número de cavitación relaciona la energía del fluido asociada con el delta de presión $P_2 - P_v$, con la energía cinética máxima, la cual a su vez está asociada con el cuadrado de la

velocidad del fluido al pasar por la restricción (v_h^2). Entendido de otra manera, σ_v determina una relación entre el delta de presión $P_2 - P_v$ y la presión dinámica que surge en virtud de la velocidad de entrada v_h. Esta presión dinámica define entonces el tamaño de la caída de presión, lo que a su vez resulta en la formación y crecimiento de las burbujas.

Una manera alterna de definir el número de cavitación surge de considerar que la presión P_1 es diferente a la presión de vapor P_v, en cuyo caso el número de cavitación se define según la Ecuación 5.

$$\sigma_p = \frac{Diferencia\ Presión\ Recuperada}{Diferencia\ Presión\ total} = \frac{P_2 - P_v}{P_1 - P_2} \tag{5}$$

Un número de cavitación bajo está asociado a una alta intensidad de cavitación, ya que la presión dinámica, la cual según se ha referido está asociada a la velocidad del flujo en la restricción; es la que genera las cavidades. Minimizar el número de cavitación, de acuerdo con las variables que define las Ecuaciones 4 y 5, puede lograrse por una de las siguientes cuatro alternativas o por una combinación de ellas: a) aumentar la presión de entrada, P_1; b) aumentar la velocidad en la restricción, v_h; c) disminuir la presión de salida, P_2; d) aumentar la presión de vapor, P_v, aumentando la temperatura.

Pero la minimización del número de cavitación conlleva retos de diseño. En efecto, un delta de presión $P_2 - P_v$ pequeño haría que la presión de descarga se hiciese cercana a la velocidad de vapor, pudiendo ocasionar erosión en los elementos que se encuentren aguas abajo. De otra parte, una v_h mayor también requiere un consumo energético mayor, es decir, obtener una alta velocidad requiere aumentar la capacidad de la bomba que impulsa el fluido, bien sea en presión o en caudal (Sun et al., 2020). La Figura 10 muestra una representación de la relación que existe entre la velocidad del fluido y la energía de entrada al sistema.

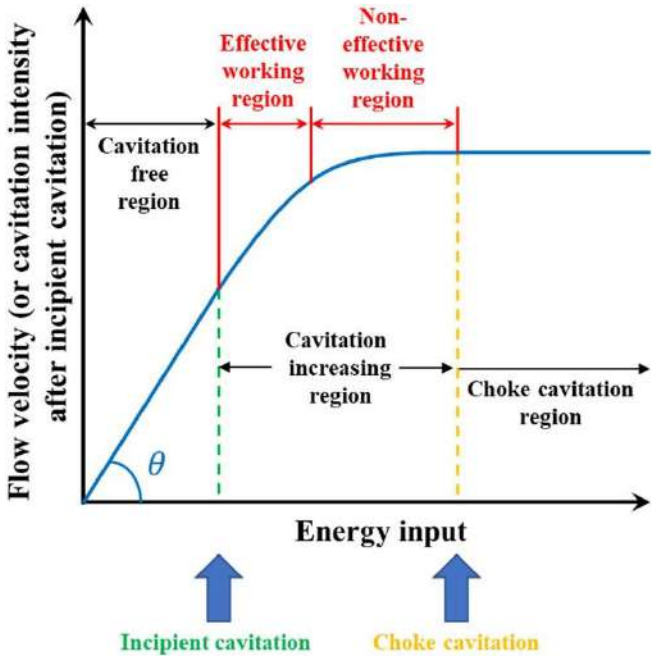


Figura 7. Relación entre la velocidad del flujo (intensidad de la cavitación) y la energía de Entrada. Fuente: (Sun et al., 2020)

La cavitación hidrodinámica puede generarse a través de diversos mecanismos. Para esto, el diseño del reactor de cavitación es fundamental. Los reactores de cavitación pueden clasificarse en dos grandes grupos: reactores con partes móviles y reactores sin partes móviles (Sarvothaman et al., 2024). En el primer grupo se encuentran los reactores de tipo Placa con Orificio, los Venturi, y los de tipo Diodo de vórtice, pudiendo tener los dos primeros (Orificio y Venturi) diseños mecánicos que favorecen la formación de remolinos o vórtices. En el segundo grupo se encuentran los reactores de rotación, en los cuales el líquido a cavitar es sometido a rotaciones de alta velocidad, y que emplea diversas geometrías para favorecer la generación de las burbujas.

A continuación, se describen los reactores más empleados, en tanto que las Figuras 8 a 11 presentan ejemplos de estos reactores tal como son detallados en algunos textos de la literatura consultada.

Reactor de placa con orificio. En este reactor las variaciones de presión son producidas por una placa que posee una o varias ranuras u orificios, por donde debe pasar el fluido. La distribución geométrica de las ranuras y el tamaño de estas, ocasionan que el flujo al pasar disminuya su presión y genere burbujas, las cuales colapsan una vez la presión aumenta, luego de que el flujo atraviesa la placa. Esta secuencia de funcionamiento (alternancia entre aumento de velocidad, disminución de presión, generación de burbujas, disminución de velocidad, aumento de presión y, colapso de las burbujas), se presenta en todos los reactores. La Figura 12 muestra una gráfica de dicho fenómeno referido a un reactor de placa con orificio.

Reactor tipo Venturi. Este tipo de reactor se compone de una parte convergente y otra divergente, en el que el corte transversal de la unión de estas dos partes puede ser de forma circular,

ovalada, cuadrada o rectangular. Al llegar a la parte convergente, el flujo aumenta su velocidad y disminuye su presión, generando burbujas. Luego, al salir el fluido por la zona divergente, sucede el fenómeno contrario, la velocidad disminuye y la presión aumenta, ocasionándose el colapso de las cavidades.

Reactor tipo diodo de vórtice. Este tipo de reactores poseen un diseño que consiste en una entrada tangencial para el líquido, la cual conecta con un canal en espiral que transporta el fluido a una cámara que induce a la formación de vórtices, desde la que el líquido es forzado a moverse a un puerto de salida axial. Luego de entrar, el líquido es acelerado en la cámara de vórtice, lo que reduce la presión hasta valores cercanos a la presión de vapor, generando burbujas. Estas burbujas colapsan al experimentar turbulentas variaciones de presión, a medida que se mueven hacia la salida (Gode et al., 2023). Si el reactor se operase en sentido inverso, haciendo entrar el líquido por la parte axial, el fluido experimentaría una gran resistencia. De ahí el nombre de diodo[2].

Reactor de rotación. Estos reactores emplean el rotor de un motor, el cual es acondicionado con álabes, palas o una cobertura con una geometría específica, que favorece la formación de burbujas cuando el fluido circula a su alrededor, como consecuencia de los deltas de presión ocasionados por dicha geometría, y por la alta velocidad de rotación a la cual es sometido el flujo circundante.

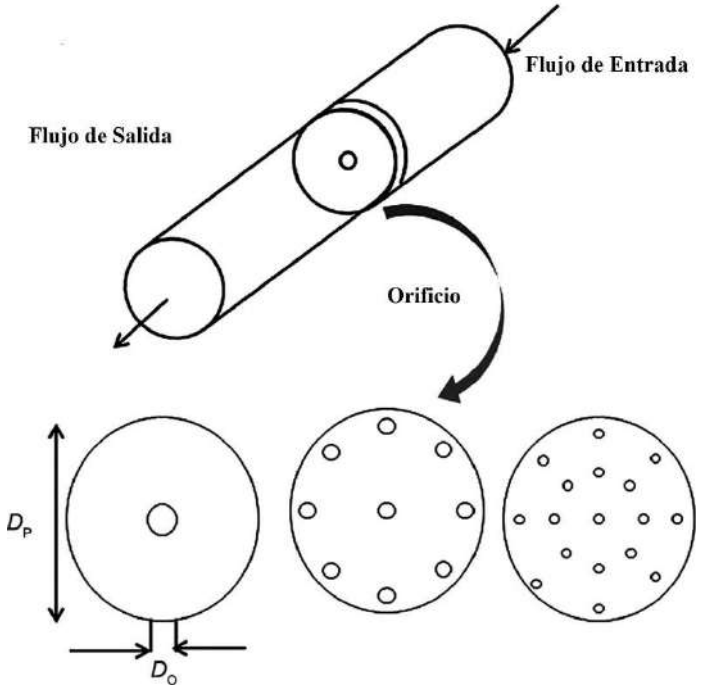


Figura 8. Ejemplo placas con orificios. Fuente: (Zheng et al., 2022)

[2] Un diodo es un dispositivo electrónico que permite el paso de la corriente en un solo sentido.

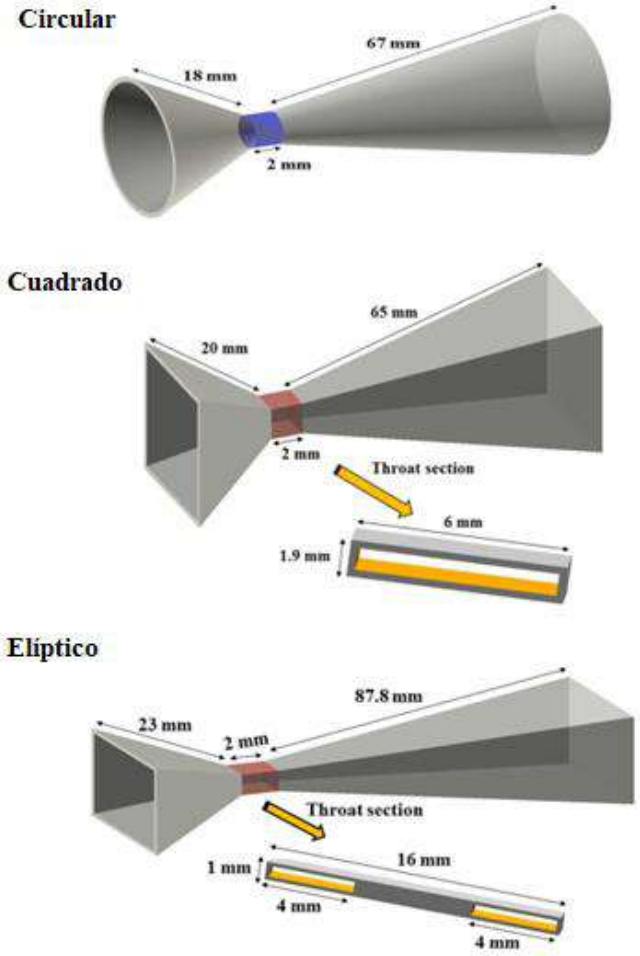


Figura 9. Ejemplo reactores tipo Venturi. Fuente: adaptado de (Agarkoti et al., 2023)

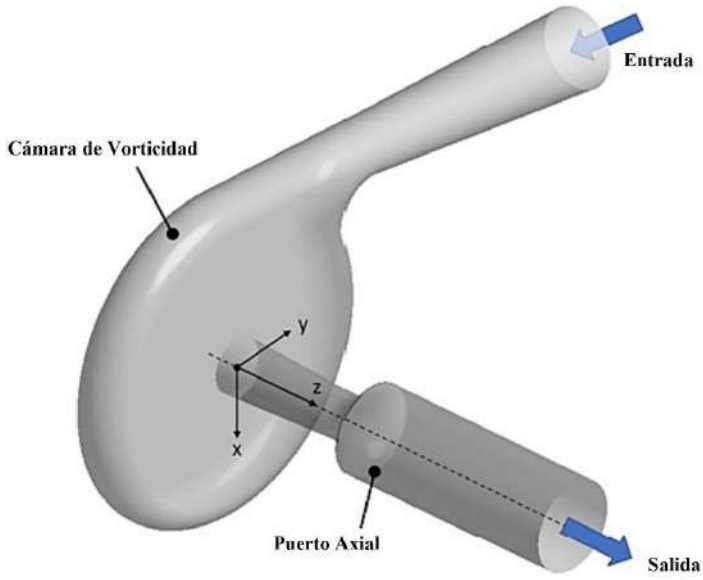


Figura 10. Ejemplo reactor diodo de vórtice. Fuente:(Sarvothaman et al., 2024)

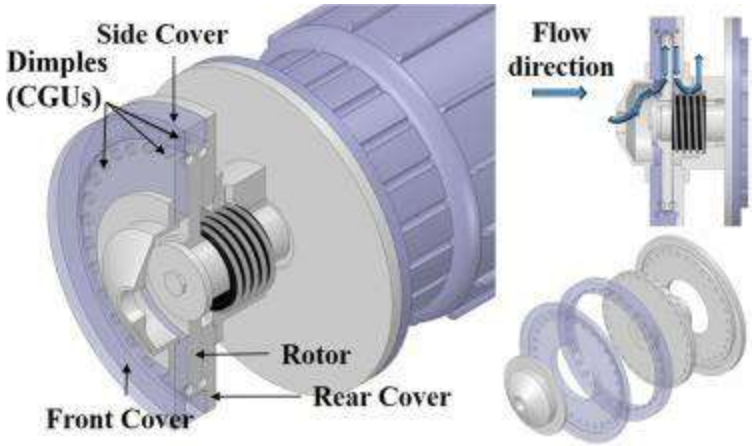


Figura 11. Ejemplo reactor rotativo. Fuente: (Sun et al., 2021)

La cavitación hidrodinámica tiene múltiples aplicaciones (Sun et al., 2024), las cuales incluyen el procesamiento de alimentos (Castro-Muñoz et al., 2023), la síntesis de materiales y nanomateriales (Bulychev, 2021), el tratamiento de celulosa en la industria del papel (Pamidi et al., 2024), y la destacada aplicación para el tratamiento y desinfección del agua, entre otras. El tratamiento se refiere a la degradación de contaminantes ocasionados, por ejemplo, por residuos farmacéuticos o tintas industriales, en tanto que la desinfección hace referencia a la reducción de microorganismos contaminantes como las bacterias *E. coli*. La cavitación hidrodinámica es, por tanto, un prometedor método físico alternativo a los tradicionales métodos químicos para el manejo de aguas.

Los trabajos de (Yadav et al., 2021a) y (Jain et al., 2019) describen muy bien los efectos que produce la cavitación hidrodinámica en los microorganismos (ver Figuras 13 y 14). En síntesis, la generación y colapso abrupto de las burbujas al interior del reactor produce incrementos de la temperatura y de la presión, las cuales pueden alcanzar valores cercanos a los 10000 K y 1000 atm, respectivamente, en lapsos de tiempo del orden de los microsegundos, que son suficientes para generar rupturas en la membrana celular de los microorganismos presentes en el agua. Adicionalmente, la cavitación puede formar radicales libres como el OH^{-1}, que tras la ruptura de la membrana celular pueden ocasionar daños en el ADN de los microorganismos. En las Figuras 15 y 16, pueden observarse imágenes microscópicas que evidencian estos daños.

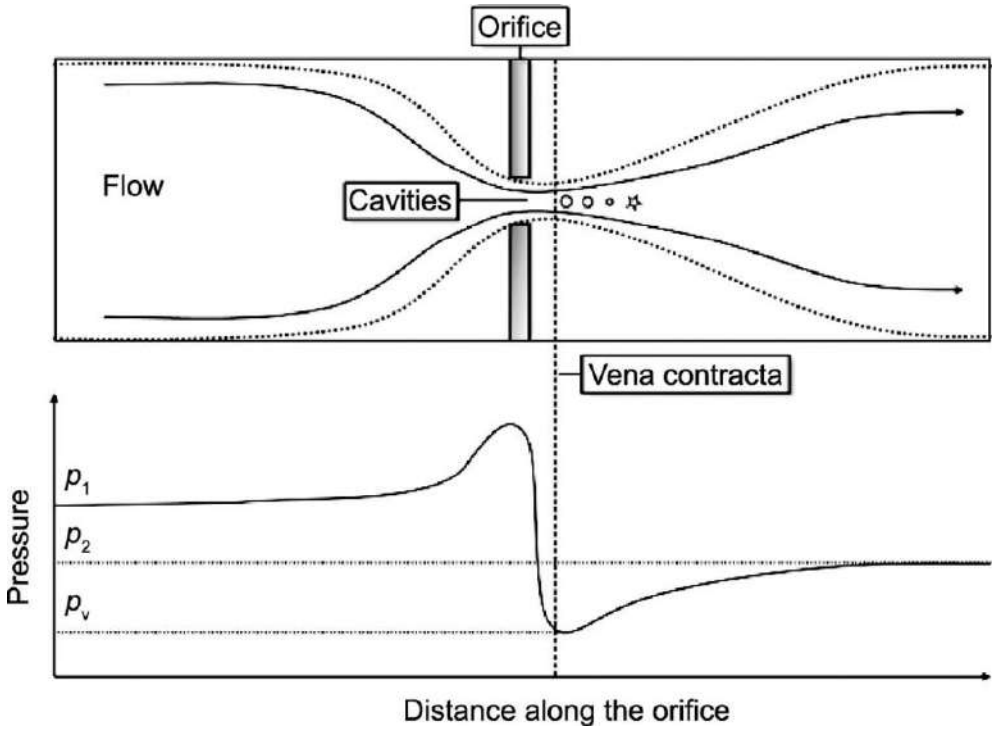


Figura 12. Variaciones de presión de un fluido al pasar por una placa con orificio. Fuente: (Zheng et al., 2022)

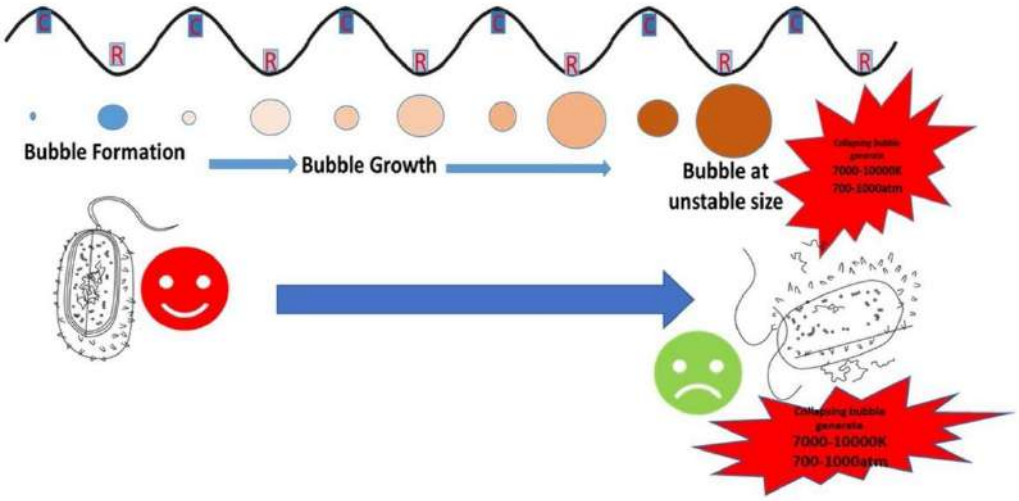


Figura 13. Explicación gráfica de la muerte de los microorganismos por efecto de la cavitación. Fuente: (Yadav et al., 2021a) . C hace referencia a ciclo de compresión y R al de relajación.

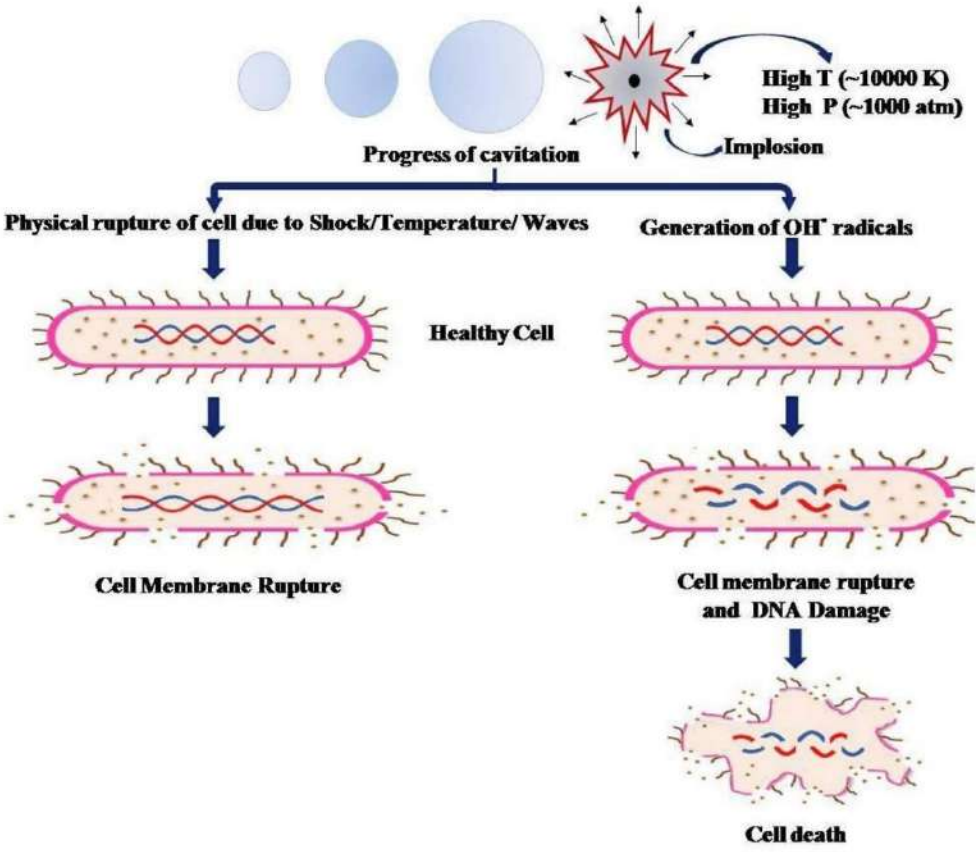


Figura 14. Explicación gráfica del rompimiento de la membrana celular y daño del ADN en los microorganismos por la cavitación. Fuente: (Jain et al., 2019)

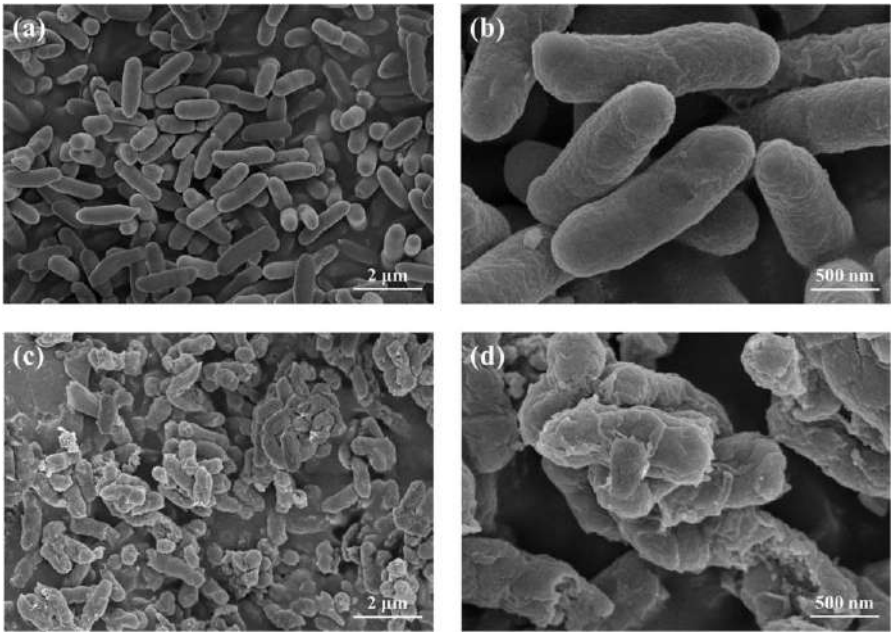


Figura 15. Micrografía electrónica de barrido de *E. coli*. Cuadros a) y b) a 0 minutos de cavitación. Cuadros c) y d) a los 10 minutos de cavitación. Fuente: (Sun et al., 2021)

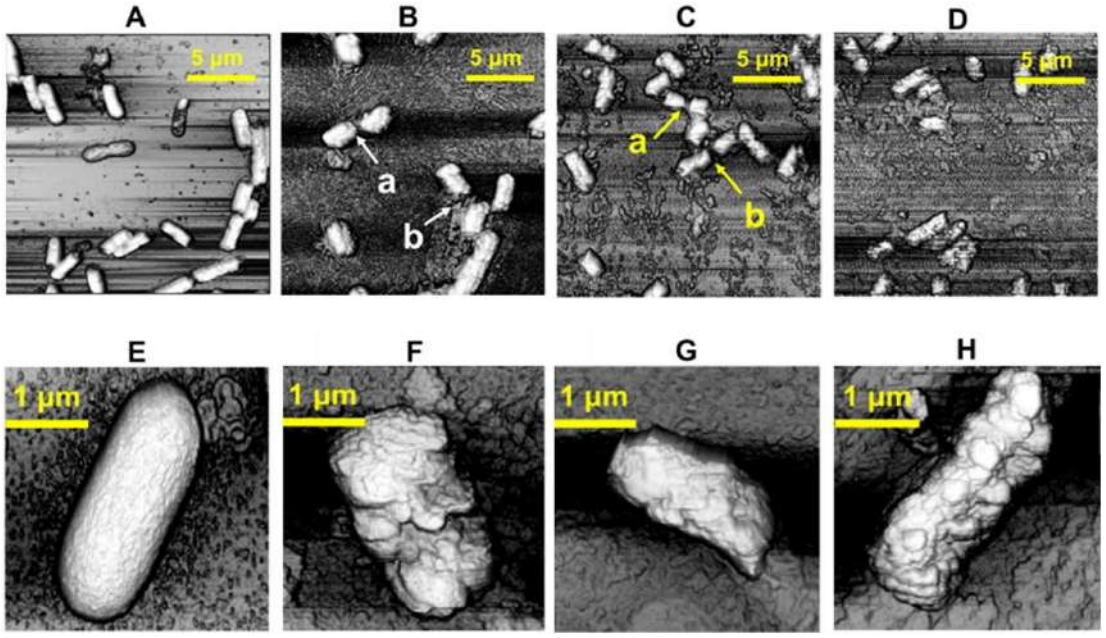


Figura 16. Microscopía de fuerza atómica de *E. coli*. A y E antes del tratamiento. B, C, D, F, G y H, después de cinco ciclos de tratamiento. Fuente: (Sun et al., 2020)

La cinemática de la desinfección de la reducción de microorganismos como consecuencia de la cavitación puede ser modelada por una ecuación diferencial de primer orden (Jain et al., 2019) como la mostrada en la Ecuación 6, en la que V es el volumen del tanque que almacena el agua a procesar por cavitación, C es la concentración de los microorganismos, k_G es la tasa de crecimiento de los microorganismos y k la tasa de desinfección.

$$V\frac{dC}{dt} = V(k_G - k)C \tag{6}$$

La solución de la Ecuación 6 para C es una función exponencial que será decreciente si la tasa de desinfección es mayor que la tasa de crecimiento de los microorganismos (ver Ecuación 7).

También en (Jain et al., 2019) se propone un ajuste a la Ecuación 6, para considerar el flujo del líquido, Q, y la desinfección por cada ciclo de circulación del agua en el sistema, ϕ. Así, la Ecuación 6 se transforma en la Ecuación 8, y la solución para C en la Ecuación 9, en la que n es el número de circulaciones que tiene el líquido en el sistema de cavitación (Ecuación 10), y τ el tiempo que permanece el líquido en el tanque, es decir, la relación entre V y Q.

$$C = C_{in}e^{-(k-k_G)t} \tag{7}$$

$$V\frac{dC}{dt} = Vk_G C - Q\phi \mathrm{C} \tag{8}$$

$$C = C_{in} e^{-(\phi - k_G \tau)n} \tag{9}$$

$$n = \frac{Q}{V} t \tag{10}$$

Múltiples estudios abordan investigaciones y desarrollos en torno a la cavitación hidrodinámica, y su aplicación al tratamiento y desinfección de aguas. Algunos de ellos son expuestos en el siguiente estado del arte.

Estado del Arte

Al consultar en SCOPUS[3] sobre las publicaciones relacionadas con las palabras clave "Hydrodynamic Cavitation", se encuentra que las áreas temáticas más relacionadas con las publicaciones científicas asociadas al tema son: Ingeniería (31%), Física (13%), Ingeniería Química (11%) y Ciencias Ambientales (11%), según se observa en la Figura 17. De otra parte, los países con mayor número de trabajos de investigación asociados al tema, de acuerdo con SCOPUS, son, en orden de mayor a menor, China, India y Estados Unidos (Ver Figura 18), en tanto que los autores con mayor número de publicaciones son Parag Gogate (del Instituto de Tecnología Química de Mumbai), Aniruddha B. Pandit (del Instituto de Tecnología Química de Mumbai, coautor del presente libro), Vivek Ranade (de la University of Limerick en Irlanda, y de la Queen's University de Belfast) y Matevz Dular (de la University of Ljubljana en Eslovenia), según se observa en la Figura 19.

Las redes bibliométricas establecidas con VOSviewer[4] con base en las consultas realizadas en SCOPUS, muestran, así mismo, que entre las palabras que se asocian con mayor frecuencia a cavitación hidrodinámica están: degradación, residuo, simulación y superficie (ver Figura 20), en tanto que entre las palabras relacionadas con el tratamiento de aguas residuales a través de cavitación hidrodinámica están: degradación, combinación, peróxido de hidrogeno, flujo y modelo, entre otras (ver Figura 21). Una red bibliométrica adicional, creada para asociar palabras entre cavitación hidrodinámica y desinfección de aguas residuales, resalta las palabras: reactor de cavitación hidrodinámica, degradación, desinfección, modelo, flujo, microorganismo, entre otras (ver Figura 22).

Publicaciones sobre los fundamentos de la HC

Un documento base que describe los elementos de diseño fundamentales para la construcción de reactores de cavitación hidrodinámica es el de (Gogate & Pandit, 2000). En él se describe el denominado número de cavitación (Ecuaciones 4 y 5), así como el modelo matemático de las turbulencias y de la dinámica de la cavitación. El artículo resalta la dependencia de la presión de colapso (magnitud de la presión generada al final del colapso en la cavidad) respecto al número de cavitación, al diámetro de los huecos en un reactor con platina de orificio, y al porcentaje de área libre.

[3] SCOPUS: Base de datos bibliográfica que presenta resúmenes y citas, que ofrece herramientas de análisis de información, propiedad de ELSEVIER. Las consultas sobre cavitación hidrodinámica se hicieron en julio de 2024.

[4] VOSviewer: Herramienta software gratuita que permite la construcción de redes bibliométricas.

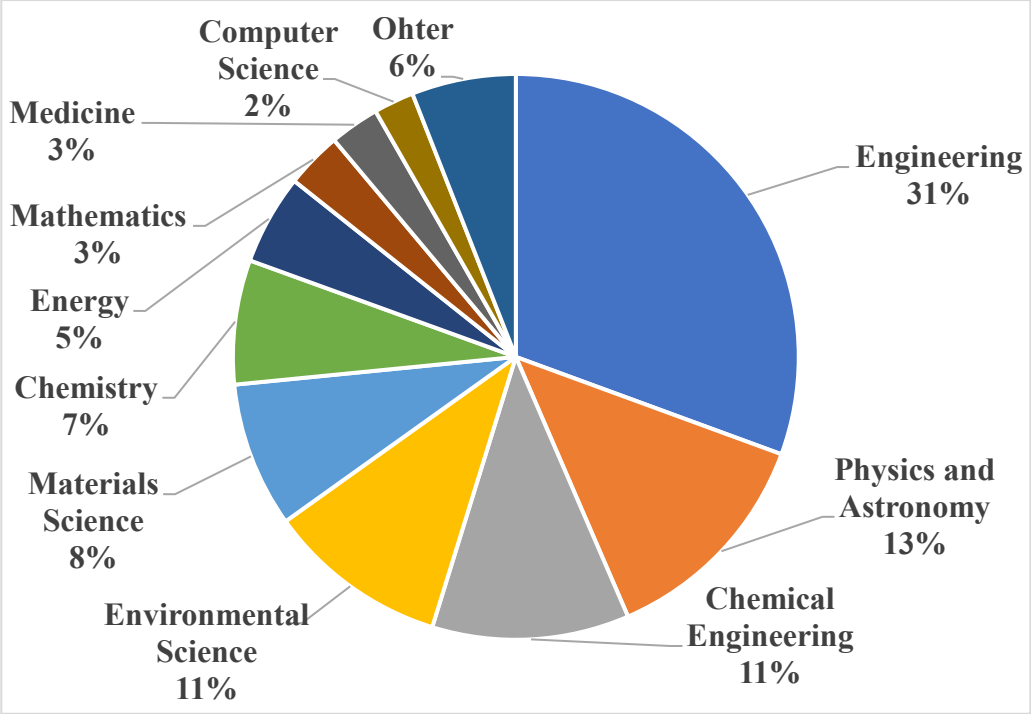


Figura 17. Áreas temáticas asociadas la Cavitación Hidrodinámica

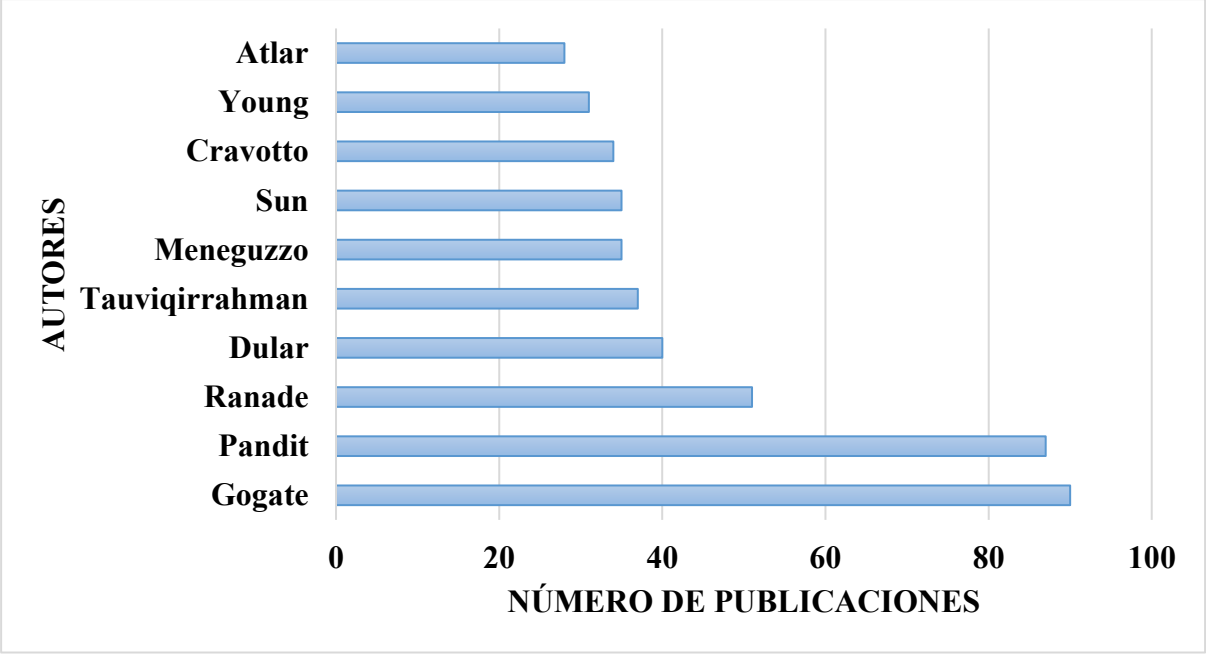


Figura 18. Autores con mayor número de publicaciones en HC

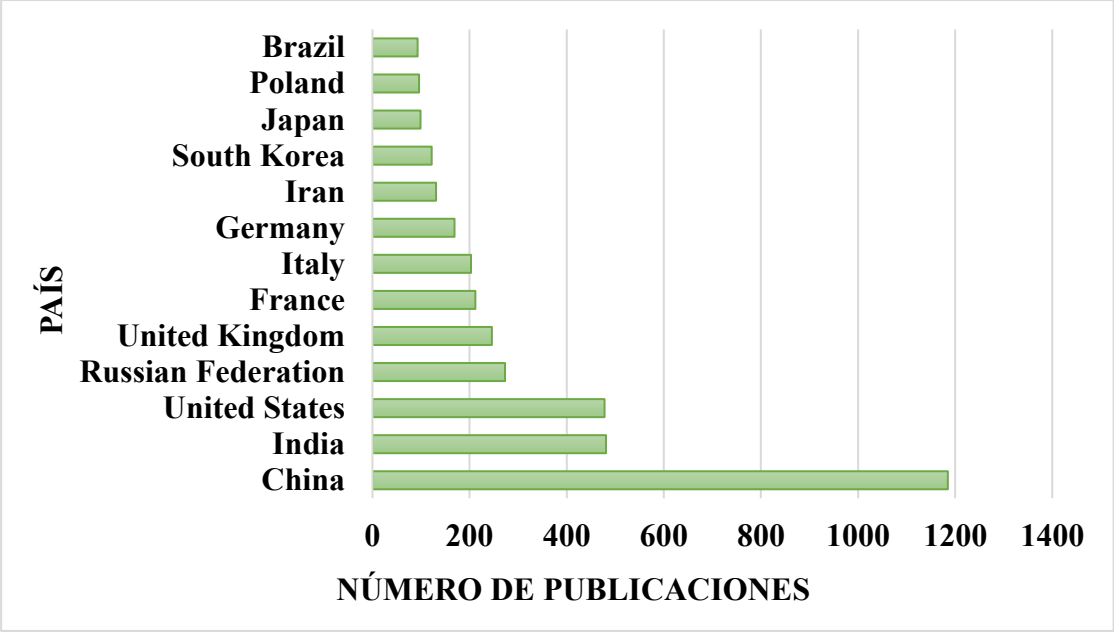


Figura 19. Países con mayor número de publicaciones en HC

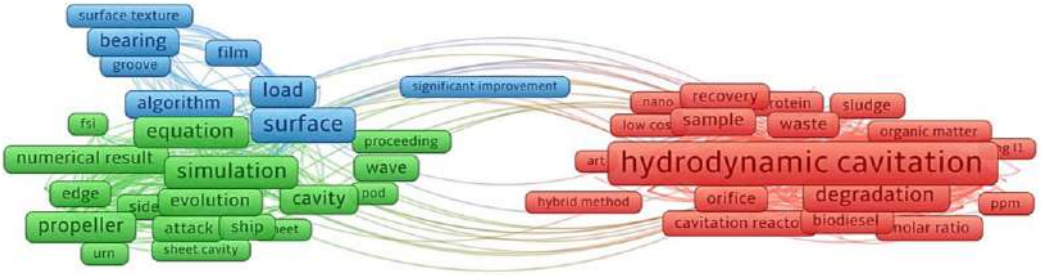


Figura 20. Palabras Claves asociadas a la HC

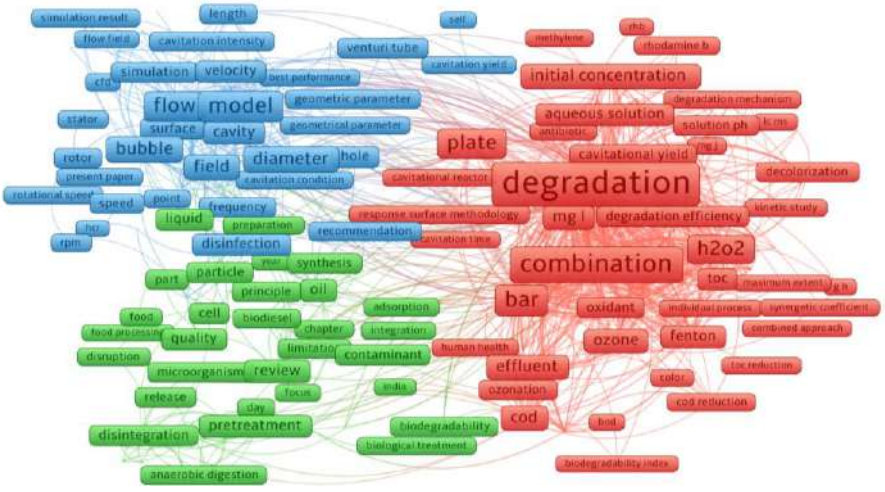


Figura 21. Palabras Claves asociadas al Tratamiento de Aguas Residuales con HC

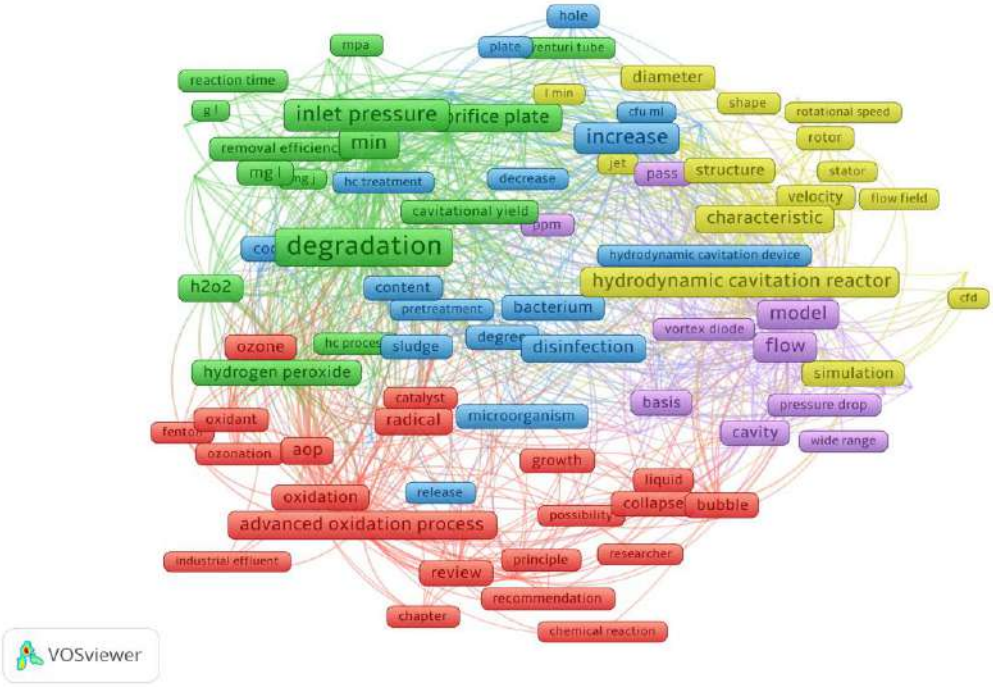


Figura 22. Palabras claves asociadas a la Desinfección de Aguas Residuales con HC

También en (Gogate et al., 2006) se comentan las principales aplicaciones de la cavitación, y se definen las técnicas de cavitación más comunes (hidrodinámica, acústica, óptica, y por partículas), así como las principales configuraciones de los reactores, y se proyectan aplicaciones futuras. Por su parte (Arrojo & Benito, 2008), realizan un estudio teórico de la cavitación hidrodinámica, como un proceso avanzado de oxidación. Estos autores analizan diferentes parámetros que deben tenerse en cuenta en el diseño de los sistemas de cavitación hidrodinámica, entre ellos las escalas de tiempo, y los periodos de rarefacción y compresión. El trabajo resalta la mayor eficiencia energética de la cavitación hidrodinámica frente a otros sistemas de cavitación, destacando, a su vez, que grandes escalas de tiempo dificultan el colapso de las burbujas, generando pocos ciclos de cavitación, que pueden compensarse con el diseño de cámaras de cavitación más flexibles que favorezcan los impulsos de presión.

Posteriormente (Carpenter et al., 2017), elabora un trabajo del que es coautor Aniruddha B. Pandit, en el que se estructura una síntesis del principio de operación y de las principales aplicaciones de la cavitación hidrodinámica tanto en procesos químicos como físicos, especificando dos opciones para el diseño del reactor: Platina de orificio y Tubo Venturi. Para los reactores con platina de orificio, se consideran dos posibles diseños: platina de hueco único o platina con múltiples huecos, y se detallan dos parámetros:

- **alfa**: hace referencia a la relación entre el perímetro de los huecos y el área total para el flujo. Maximizar alfa lleva a un mayor rendimiento del sistema de

cavitación. Se reportan trabajos en los que un mayor alfa implica una degradación mayor de contaminantes. Un alfa entre 2 y 4 se establece como deseable, dado que un perímetro mayor ocasiona un número mayor de eventos de cavitación y un mejor rendimiento del sistema de cavitación.

- **beta**: se establece como la relación entre el área de la "garganta" del sistema de cavitación y el área de la sección transversal del tubo. Se reportan diversos trabajos en los cuales se evidencia que un parámetro beta menor optimiza el funcionamiento del sistema de cavitación (mayor degradación de contaminantes, por ejemplo). Para tratamiento de aguas residuales, un beta entre 0.01 y 0.25 se establece como deseable. Sin embargo, para desinfección microbiana, se sugiere una beta mayor a 0.3.

Para los reactores Venturi, se consideran tres posibles diseños: planos, circulares y elípticos, considerando en todos los casos, dos parámetros en su diseño:

- **Área de la "garganta" del Venturi**, y su relación perímetro - área. Para una determinada área, un perímetro mayor genera una mayor cavitación, por lo que una geometría plana o elíptica es más apropiada que una circular. El área de la garganta también se caracteriza por el parámetro gamma: relación entre la altura o diámetro de la garganta y su longitud. Los autores muestran estudios que sugieren una relación 1:1

- **Ángulo de la sección divergente del Venturi**: es importante porque está relacionada con la forma de la sección divergente del Venturi, la cual determina la presión final de colapso en el sistema de cavitación (P_2), y el rendimiento del sistema de cavitación. El artículo aclara que en un sistema de cavitación Venturi, la presión se recupera de manera más "suave" que en uno con platina de orificio. Ángulos mayores implican un número de cavitación mayor, y una recuperación de la presión más rápida. Se sugieren ángulos entre 5.5° y 6.5°, para una cavitación óptima.

No obstante, los autores destacan que todos estos parámetros afectan el número de cavitación, por lo que la eficiencia del sistema de cavitación depende de la aplicación deseada, lo cual quiere decir que, su punto óptimo de operación depende también, y en gran medida, de la aplicación para la cual se emplea el sistema de cavitación. Respecto al número de cavitación, el cual caracteriza las condiciones de la cavitación en el reactor, se sugieren valores entre 0.1 y 0.3 para tratamiento de aguas residuales, y se sugieren valores mayores a 0.6 para desinfección microbiana. Otros autores sugieren valores menores para este tipo de aplicación (por ejemplo (L. F., Gutiérrez-Mosquera et al., 2019), que refiere investigaciones que proponen un Cv entre 0.1 y 0.5 para desinfección). El trabajo también reporta, dentro de las aplicaciones físicas, el uso de la HC para la alteración de células microbianas (lo cual tiene una relación directa con el tratamiento de aguas residuales infectadas por *E. Coli*). Los autores presentan una ecuación en la que la

velocidad de afectación de las células microbianas depende de la resistencia de la pared celular, del número de cavitación, del perímetro del orificio, del diámetro del orificio, y de su área. De la ecuación se puede determinar que una mayor afectación de las células ocurre para valores mayores de los parámetros geométricos y para un número de cavitación menor. Por lo que se concluye que, la geometría del sistema de cavitación, la presión de entrada y el Cv controlan la alteración de las células microbianas.

Finalmente, el documento sugiere un sistema de cavitación Venturi para transformaciones químicas como el tratamiento de aguas residuales y la transesterificación. En tanto que, los sistemas de cavitación de orificio son sugeridos para transformaciones químicas o fisicoquímicas, dado que generan intensas condiciones de cavitación (por ejemplo, en reducción de partículas y desinfección microbiana).

La investigación de (Kuimov, 2023), por su parte, es un interesante estudio sobre cómo aumentar la eficiencia de un reactor de cavitación. Refiere las limitantes del uso del parámetro Cv, dado que no está directamente asociado a todos los parámetros que general la HC. Este trabajo realiza experimentos en los que se ensayan reactores de cavitación hidrodinámicos tipo Venturi y reactores de cavitación hidrodinámicos denominados de parte secundaria discreta, los cuales se basan en el principio de transformación de la energía de un campo electromagnético (siendo ésta, otra interesante forma de generar HC, en la que varillas ferromagnéticas entran en movimiento por la acción de un campo giratorio en un estator). El autor concluye que el Cv debe calcularse de manera independiente para cada reactor, a partir de, por ejemplo, regresiones lineales, y de un estudio de las propiedades del medio y de la geometría del reactor.

Publicaciones sobre Tratamiento de Aguas con HC

Aplicaciones de la HC para el tratamiento de aguas (entiéndase remoción o reducción de contaminantes), son, por ejemplo, las de (Sivakumar & Pandit, 2002), donde se estudia el uso de la cavitación hidrodinámica para la degradación del colorante catiónico Rodamina B. En este estudio la cavitación se hace con platinas de orificio, y se exploran los efectos de la geometría de los orificios, al tiempo que se comparan los resultados con la cavitación acústica. Los autores sugieren tener presente diversos parámetros para el sistema de cavitación, entre ellos:

- β_0, relación entre el área de los huecos y el área del tubo.
- α, relación entre el perímetro total de los huecos y el área total de la apertura.
- f_T, frecuencia de la turbulencia, o velocidad media de la turbulencia por la escala de la turbulencia (v'/l), con l igual a 0.08*(diámetro del hueco + diámetro del tubo) /2.
- Cv', número de cavitación modificado (cv/(relación entre el perímetro de los huecos y el perímetro del tubo).

Los autores sugieren que huecos de menor tamaño aumentan la frecuencia y el colapso del contaminante, y que la cavitación hidrodinámica ofrece mejores resultados que la acústica, para la misma cantidad de energía empleada.

En un estudio posterior, (Mishra & Gogate, 2010) indagaron la remoción de Rodamina B por medio de cavitación hidrodinámica. Proceso favorecido por uso de sistemas de cavitación tipo Venturi (de más de un hueco), presiones cercanas a los 71 psi, temperatura de 40°C, combinación de la cavitación con uso de peróxido de hidrógeno y oxidación Fenton (con lo que se alcanzó una remoción del 99.9%).

En (Chakinala et al., 2008) se exploró el tratamiento con cavitación hidrodinámica de aguas residuales de efluentes industriales, cuya investigación se reportó como la primera publicación referente a una aplicación industrial de la cavitación hidrodinámica, concluyendo que altas presiones (1500 psi), adición secuencial de peróxido de hidrógeno (dos ciclos de 1900 ppm, cada una), y bajos niveles iniciales de concentración de contaminantes; favorecen la mineralización de la cantidad total de carbono (entre un 60 y un 70% de la cantidad total de carbono fue removida). Este trabajo fue ampliado en (Chakinala et al., 2009), mediante la investigación de la combinación de cavitación hidrodinámica y oxidación por reacción de Fenton, para el tratamiento de aguas residuales industriales. El método muestra que la cantidad total de carbonos (TOC) puede ser reducida entre un 50 y 60%. Se estudió el efecto de las presiones iniciales (500-1500 psi), la temperatura (20-30°C), y la presencia de partículas de cobre, evidenciándose que el 60% de las partículas TOC, son removidas en ausencia de partículas de cobre, y 40% en presencia de estas.

También en relación con residuos industriales, específicamente sobre el uso de la cavitación hidrodinámica en la remoción de colorante rojo No 88, la investigación de (Saharan et al., 2012) comprueba la eficacia de este método de oxidación, la cual fue mejorada con la adición complementaria de peróxido de hidrógeno. La remoción de colorante fue mayor en condiciones ácidas. Se verificó que la cavitación hidrodinámica es más eficiente energéticamente que la cavitación acústica. El artículo presenta al final una secuencia de pasos lógicos y sencillos para determinar el Cv. Trabajos alternos sobre procesamiento de aguas contaminadas con colorantes son los de (Kumar & Pandit, 2013), para la degradación de tinte Naranja-G, y el de (Rajoriya et al., 2017), que expone los resultados del uso combinado de HC y H_2O_2, y HC y Ozono, para la degradación de una tinta catiónica (Rodamina 6G).

Otra aplicación importante es el manejo de aguas contaminadas con venenos de uso agrícola. Al respecto, (X. Wang & Zhang, 2009) exponen la degradación del *alaclor* (producto químico empleado como herbicida) en solución acuosa, por medio de cavitación hidrodinámica. Se estudiaron los efectos de la presión, la temperatura, el pH, y la concentración del *alaclor*, en el proceso de degradación, lográndose una tasa de degradación de 0.049 (1/min). El estudio concluye que mayor presión y menor concentración favorecen la degradación, y sugiere como temperatura óptima 40°C. También en (P. N. Patil & Gogate, 2012), se reporta la reducción del pesticida Metil Paratión por medio de cavitación hidrodinámica combinada con agregación de peróxido de hidrógeno y reactivo Fenton. Se informa de una reducción de hasta el 76% de TOC. Otro aporte a esta temática es la de (P. N. Patil et al., 2014), que versa sobre el uso de cavitación hidrodinámica para la degradación de un insecticida altamente tóxico, el imidacloprid. El trabajo experimenta con sistemas de cavitación Venturi circulares y planos (Slit Venturi), obteniéndose mejores resultados con los ensayos en Slit Venturi. La degradación del insecticida al usar sólo HC fue del 23.85%. Al combinar la HC con el uso de H_2O_2 y Slit Venturi la degradación fue completa

(100%), así como con el uso combinado de HC y la reacción de Fenton, pero lográndose esta última en un tiempo menor.

En (Gogate, 2011), se estudia el uso de la cavitación para el procesamiento de alimentos (esterilización y extracción de enzimas) y para el tratamiento de aguas residuales industriales. Se destacan tres parámetros para un óptimo funcionamiento de la cavitación hidrodinámica: presión de entrada o velocidad del rotor (se recomienda incrementar la presión hasta su máximo posible, pero sin llegar a producir super cavitación); diámetro de las restricciones (menor diámetro favorece cavitaciones más intensas); relación de áreas (porcentaje de área libre para el flujo, área de los orificios/área del tubo). El autor concluye que la cavitación acústica y la hidrodinámica producen efectos similares, pero destacándose la hidrodinámica por el favorecimiento de implementaciones a mayor escala, siendo además, energéticamente más eficiente respecto a la acústica.

Sobre manejo de aguas contaminadas con medicamentos, (Bagal & Gogate, 2014) realizaron degradación de diclofenaco sódico combinando cavitación hidrodinámica con fotocatálisis heterogénea. La mayor degradación se logró con una presión de entrada de 3 bar, y pH de 4. La cavitación se mejoró agregando óxido de titanio (TiO_2) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2). La dinámica de la degradación fue de primer orden, y se constató una reducción del TOC del 76%. Otros trabajos para el tratamiento de agua contaminada con medicamentos son los de (X. Wang et al., 2017), sobre la degradación de tetraciclina por medio del manejo combinado de cavitación hidrodinámica y fotocatálisis; (Chen et al., 2023), que explora el uso de HC más catalizadores de dióxido de titanio (TiO_2) dopado con fósforo (P), logrando una degradación del 90.63%; (De-Nasri et al., 2023), trabajo focalizado en analizar el uso de HC y fotocatálisis, para el tratamiento de agua contaminada con cumarina, paracetamol y dicloroanilina; (Dixit et al., 2023), que analiza el uso de HC para la degradación de cefalexina y ciprofloxacina, con base en el uso de reactores de cavitación tipo diodo de vórtice, y superficie recubierta de cobre y níquel, recubrimiento que mejora el efecto catalítico cuando la HC se combina con H_2O_2; y (Gawande et al., 2023), que estudió la degradación de Neomicina, fármaco antibacteriano, por medio del uso combinado de HC y H_2O_2 y FENTON, usando cada método por individual, y combinando HC y H_2O_2, y HC y FENTON.

Una aplicación sobre HC para el manejo de aguas residuales se detalla en (Šarc et al., 2017), en donde se estudia la influencia del número de cavitación Cv en el tratamiento de aguas residuales a través de cavitación hidrodinámica. La investigación destaca que el efecto de la HC en el agua contaminada obedece a varios factores, entre ellos la geometría del sistema de cavitación, la velocidad de flujo, o la temperatura del medio. Los autores alertan también sobre la cierta ambigüedad en el uso del Cv, en razón de la existencia de distintas definiciones para el mismo. Otras investigaciones relacionadas con este tema son, por ejemplo, la de (Gągol et al., 2018), en la que se presenta una revisión de trabajos orientados al tratamiento de aguas residuales por métodos de oxidación basados en cavitación, y en el que tanto trabajos a cerca de cavitación acústica como cavitación hidrodinámica son analizados, en combinación con técnicas alternas como proceso Fenton, ozonificación, uso de H_2O_2, UV, entre otros; la de (B. Wang et al., 2021), la cual es una excelente síntesis de los principales tipos de reactores de cavitación empleados para el tratamiento de aguas residuales, y resume las principales características geométricas y físicas de

cuatro tipos de reactores : de orificio, Venturi, rotativo y de vorticidad. Define los reactores de cavitación rotativos como sistemas en los que la cavitación ocurre en una cámara como consecuencia del movimiento relativo entre el rotor y el estator de un motor, y el líquido que fluye entre ellos; la de (Darandale et al., 2023), una publicación que presenta la HC como una técnica eficiente, de bajo costo y escalable para el tratamiento de aguas contaminadas, y en la que la eficiencia se establece en relación a la capacidad de la HC de degradar contaminantes complejos presentes en las aguas, como los ocasionados por el uso de herbicidas; y la de (B. Wang et al., 2021), que explora también el uso combinado de HC y ozonificación para el tratamiento de aguas residuales, mostrando cómo esta combinación puede incrementar la degradación de contaminantes refractarios hasta en un 40% (fenoles, pesticidas, que tienden a resistir más a los tratamientos convencionales), teniendo entre los criterios de comparación, la reducción de la demanda química de oxígeno.

En relación también con el tratamiento de aguas residuales se halla el tratamiento de lixiviados, como el mostrado por (de Melo Franco Domingos et al., 2023), publicación científica en Nature, referente al tratamiento de lixiviados en vertederos, a través de la acción combinada de coagulación/floculación, HC, ozonificación y carbón activado. El método combinado logra una reducción de la demanda química de oxígeno (COD) de 90%, luego de tres horas de tratamiento, para cuyo experimento se usó un reactor de cavitación Venturi, con radio concéntrico de 10 mm. La investigación reporta, así mismo, la reducción del color aparente y de la turbidez.

Publicaciones sobre Desinfección de Aguas con HC

Sobre desinfección de aguas, o reducción de microorganismos contaminantes a través de cavitación hidrodinámica, un trabajo pionero es el de (Jyoti & Pandit, 2004). Los autores mezclan desinfección por medio de ozono con desinfección de agua a través de cavitación hidrodinámica. El método logra reducir bacterias, coliformes totales, coliformes fecales y estreptococos fecales. El estudio muestra que este tipo de desinfección híbrida es energéticamente más eficiente.

Luego, (Gogate, 2007), analiza los sistemas de cavitación químico acústicos y los hidrodinámicos, detallando los principales parámetros que deben tenerse en cuenta para un buen funcionamiento (por ejemplo, el diámetro de las aberturas en un reactor de cavitación tipo Venturi, o la relación entre el área libre para el flujo y el área de tubo). El artículo concluye explorando los requerimientos de futuras investigaciones, de cara a una implementación industrial.

Posteriormente (Dular et al., 2016), expone el uso de cavitación hidrodinámica para tratamiento de agua y de aguas residuales, específicamente para la remoción de residuos farmacéuticos, bacterias, microalgas y virus. Tres configuraciones para la cavitación hidrodinámica son experimentadas: HC por ciclos (que no debe confundirse con recirculación), HC continua, y HC por cizallamiento. En todos los experimentos se buscaron los máximos flujos y presiones posibles. Para la HC por ciclos y continua se emplea un reactor Venturi, con garganta de 1 mm de alto, 5 mm de ancho, y 30 mm de largo, con ángulo de divergencia de 10° (medio ángulo de 5°). En ambos experimentos el Cv estimado fue de 1.24, con presión de entrada de 5 bar. En la HC continua se logró super cavitación con Cv de 0.75 y una velocidad del flujo de 6.7

m/s. Para la HC por cizallamiento se empleó una configuración de dos motores contrapuestos (separados 0.8 mm) de 0.37 kW con ranuras radiales (11 uno y 12 el otro, para evitar resonancia), girando en sentidos opuestos a 2800 r.p.m. (velocidad local de hasta 26 m/s). En la remoción de bacterias (L. pneumophila) se empleó HC continua con y sin super cavitación. Los mejores resultados se alcanzaron para HC con super cavitación. La medición de la cantidad de bacterias se hizo siguiendo el estándar ISO 11731:1998. Un análisis de varianza (ANOVA) mostró diferencias estadísticamente significativas con nivel de confianza de 99.9%, entre cuatro grupos de experimentos, evidenciando la superioridad de la HC con supercavitación. Como métrica de la remoción se calculó la rata de remoción. La investigación también experimentó la remoción de bacterias M. aeruginosa y C. vulgaris, empleando como métrica la tasa de inhibición de crecimiento. No hubo remoción para la C. vulgaris, pero para la M. aeruginosa la remoción alcanzó el 90% cuatro días después del tratamiento.

Sendas revisiones sobre la desinfección de aguas por medio de HC se detallan en (Sun et al., 2020), y (Yadav et al., 2021b). Dichas revisiones muestran reducciones principalmente de *E. coli*, cercanas al 100%, en la mayoría de los casos en condiciones de laboratorio.

Trabajos recientes sobre el tema son los presentados por (Y. Patil et al., 2023a), sobre uso de HC para la desinfección de muestras de agua del lago Padmakshi, en Warangal, India; y el de (Hou et al., 2023), que presenta un sistema de desinfección basado en un novedoso reactor de cavitación diseñado con un rotor acoplado a una ranura radial, entre otros.

Resumen o puntos clave del capítulo

En este capítulo se han detallado los fundamentos teóricos de la cavitación hidrodinámica, destacando sus posibles aplicaciones, entre ellas el tratamiento y la desinfección de aguas. Aspectos como la dinámica de la formación de burbujas, la definición del número de cavitación, el modo en que los microorganismos son reducidos por la acción de las burbujas, y los tipos de reactores más usados comúnmente.

El capítulo finaliza presentando un estado del arte sobre el tema, refiriendo antecedentes de autores que fundamentan el estudio de la HC, y referentes asociados al tratamiento y desinfección de aguas contaminadas.

En el siguiente capítulo, con base en las experiencias desarrolladas por el Departamento de Investigación de la Fundación Universitaria de San Gil-UNISANGIL, se presentarán los componentes de un sistema de cavitación hidrodinámico, a propósito de lo cual se expondrán temas relacionados con el diseño CFD, la automatización del sistema y el desarrollo de pruebas microbiológicas y fisicoquímicas.

Capítulo II: Montaje de un Sistema de HC

Milton Javier Muñoz Neira, Wilson Gamboa Contreras, Frank Carlos Vargas Tangua, Freddy Alexander Jara Mora, Jorge Alberto Neira Tavera, Luis Eduardo Cobos Ramírez, Yuleimy Ramírez Ordoñez, Fabio Andrés Dueñas Bohórquez, Azucena Ayala Ramírez, Sandra Johana Benítez Muñoz, Yeimy Marcela Martínez Santana, Sergio Andrés Peña Perea.

Departamento de Investigación de UNISANGIL, San Gil, Colombia.

*Autor de correspondencia

Email: fjara@unab.edu.co (Freddy Alexander Jara Mora)

Esquema General Automatizado de un Sistema de HC

La estructura general de un sistema de cavitación hidrodinámico se muestra en la figura 23. El sistema se compone de una unidad de pretratamiento, un tanque, una bomba impulsora, y un reactor de cavitación hidrodinámica, además de la instrumentación (válvulas, sensores), y de los elementos de control-automatización (PLC, HMI), que complementan su operación. A continuación, se describe el funcionamiento de cada una de estas partes, y su relevancia dentro del sistema de tratamiento o desinfección de aguas.

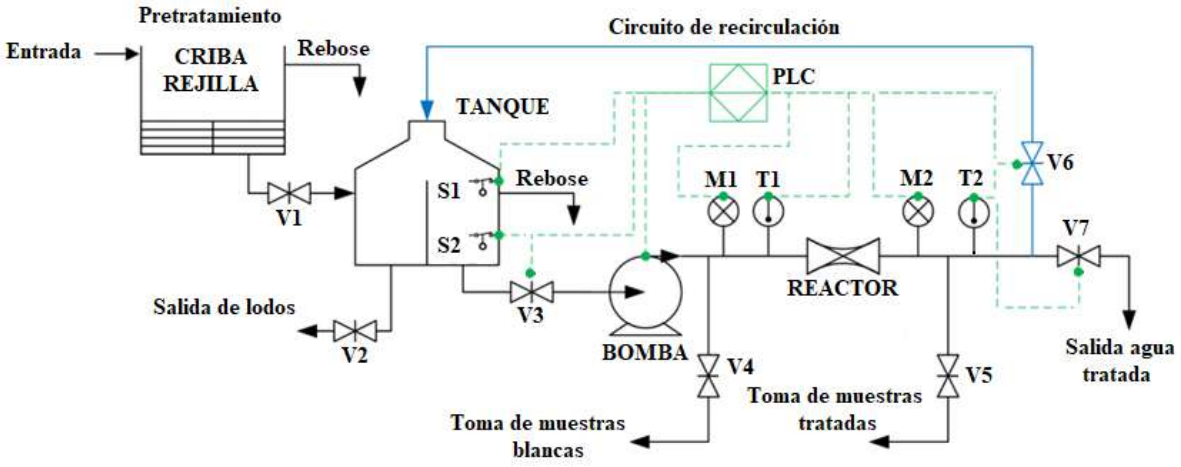


Figura 23. Esquema general de un sistema tratamiento de aguas a través de HC. Fuente: los autores.

- **Pretratamiento**

Dependiendo del tipo de agua a procesar por el reactor, algún tipo de pretratamiento puede ser necesario. En aguas residuales domésticas o industriales, por ejemplo, es recomendable un pretratamiento para la separación de sólidos gruesos a través de una criba o rejilla. Esta criba o rejilla debe tener un nivel de rebose de tal manera que, cuando se supere su nivel, lo cual puede ocurrir por el advenimiento de aguas lluvias, el agua pueda salir sin copar el tanque dispuesto para la criba.

- **Tanque de almacenamiento - aquietamiento**

Una vez pretratadas, las aguas deben pasar al tanque principal del sistema, el cual contendrá el volumen del líquido a tratar, y puede servir, de igual manera, como medio de aquietamiento facilitando la sedimentación de los sólidos que no haya sido posible separar en la rejilla del pretratamiento. Este tanque debe contar también con un sistema de rebose para eventualidades que superen su capacidad volumétrica. Es recomendable, así mismo, que el tanque cuente con una salida de lodos para que, periódicamente, se pueda purgar el sistema de los sólidos que se hayan sedimentado.

Este tanque puede ser dotado de sensores de nivel (en Figura 23, S1 y S2), para poder determinar entre qué niveles del agua a tratar debe trabajar la bomba: si el sensor de nivel S1 se activa, la bomba debe estar encendida, ya que el tanque está en su capacidad máxima, en tanto que, si el nivel S2 se desactiva, la bomba debe estar apagada ya que está llegando a su nivel mínimo.

- **Bomba**

La bomba es el actuador a través del cual se impulsa el agua al reactor de cavitación hidrodinámica, y es fundamental dado que por medio de ella se pueden desarrollar los altos caudales y las presiones necesarias para promover la cavitación en el reactor. Su selección requiere de un análisis hidrodinámico y de las posibilidades comerciales, con el fin de que se garantice, según se ha comentado, el proceso de cavitación. En los prototipos y pilotos experimentados por UNISANGIL, se ha seleccionado, verbigracia, bombas de tipo centrífugo, y del orden de los 10 caballos de potencia, debido a que se determinó su capacidad para procesar niveles de caudal de aproximadamente 10 litros por segundo en cada bache, y para lograr la presión adecuada para que se genere el fenómeno de cavitación (lo cual fue verificado en el proceso de diseño con apoyo de dinámica computacional de fluidos, CFD, según se expondrá algunos ítems más adelante).

- **Reactor de Cavitación Hidrodinámica**

El reactor de cavitación es el elemento físico en el cual a partir de una determinada configuración geométrica y de la acción de leyes físicas (en particular, la conservación de la energía manifestada, por ejemplo, en la ecuación de Bernoulli), ocurre el fenómeno de la cavitación, según se expuso en el capítulo uno, fenómeno a partir del cual se hace posible el tratamiento y/o desinfección de las aguas a tratar. El reactor se constituye generalmente de tres partes:

- Una carcasa o cuerpo, que tiene como propósito resistir y servir de soporte estructural a los demás elementos que hacen la desinfección.

- El propio reactor o elemento de cavitación, el cual puede estar diseñado a partir de diferentes geometrías (ver capítulo uno).

- Un elemento generador de vórtices, que tiene como propósito aumentar la turbulencia y mezclar íntimamente las nano burbujas de cavitación, para dar una mayor probabilidad de encuentro entre las burbujas y el patógeno o bacteria a eliminar, en el caso de los procesos de desinfección.

- **Circuito de recirculación**

La estructura de recirculación es fundamental para la degradación de la materia orgánica y la desinfección, dado que, el ocasionar que las aguas tratadas posean más de un paso por el reactor de cavitación, puede acrecentar los indicadores de descontaminación. La opción de recircular el agua residual tiene otro beneficio adicional, y es el aumento de la temperatura por la transferencia de energía que ocurre en el reactor; esto reduce considerablemente los requisitos de bombeo, ya que la presión de vapor aumenta entre más alta sea la temperatura. Para tener una referencia, la presión de vapor a 20 grados centígrados es de 2300 pascales, en tanto que para 25 grados centígrados es de 3170 pascales.

- **Sensores y válvulas**

Los sensores son los dispositivos que permiten determinar y registrar la medición de una magnitud de particular interés para el sistema. Para el caso de la Figura 23, se han especificado como parte del sistema los sensores de nivel del tanque (S1 y S2), los manómetros o sensores de presión con visualización, y los sensores de temperatura (termocuplas o RTDs, generalmente). Los sensores de nivel facilitan el conocimiento del estado de vaciado o llenado del tanque, en tanto que los sensores de presión y temperatura permiten conocer las presiones y las temperaturas a la entrada y salida del reactor, respectivamente, variables facilitan el análisis de la operación del sistema, y que son útiles para determinar el número de cavitación del reactor. Hoy en día, los sensores son dispositivos dotados de los transductores y acondicionadores electrónicos necesarios para generar señales eléctricas capaces de ser leídas por un sistema de control o automatización tipo PLC o computador industrial.

Las válvulas por su parte son los actuadores que regulan, permiten o impiden el paso del fluido a través del sistema. Pueden ser manuales, de modo que deberán ser activadas y desactivas por un operador humano, o de activación eléctrica (electroválvulas), de modo que pueden ser gobernadas por la acción de sistema automático. En el diagrama de la Figura 23, las válvulas V1, V2, V4 y V5, son válvulas manuales dispuestas para el paso del fluido del tanque de pretratamiento al tanque principal (V1), para la salida de los lodos sedimentados (V2), para la toma de las muestras antes de la cavitación (V4) y para la toma de muestras luego de la cavitación (V5). De Otra parte, las válvulas V3, V6 y V7 son de accionamiento eléctrico, proyectadas para ser gobernadas por el PLC, de modo que se pueda automatizar el paso del fluido por la bomba (V3), la recirculación del fluido (V6) y la salida del agua tratada (V7). Estas válvulas, en especial V3 y V6, pueden proyectarse como servo-válvulas o válvulas de control, que posibiliten la determinación de un porcentaje de recirculación deseado, o el control del flujo en el sistema.

- **Sistema de automatización – control**

Un modo común de implementar la automatización y el control del sistema es la inclusión de un PLC (Programmable Logic Controller), como parte de este. El PLC leerá las señales de los sensores de nivel, de presión y de temperatura, y con base en dichas lecturas determinará las activación o desactivación de las válvulas bajo su gobierno, de modo que la operación del sistema pueda darse. Adicionalmente el PLC podría realizar acciones de control como la regulación del flujo, para lo cual se debería incluir en el sistema un medidor de flujo y servo válvulas de control, o el llenado y vaciado del tanque con base en la lectura de los sensores de nivel, para lo cual podría incluirse dentro de las electroválvulas la válvula V1.

El PLC puede servir también como sistema de protección ante eventualidades. Algunas de las eventualidades que pueden ocurrir durante la operación, son:

- Taponamiento de elemento desinfección (reactor de cavitación). Para contener esta eventualidad, es útil el sensor de presión a la entrada del reactor (M1). Al comparar su lectura con el valor máximo permitido por la bomba, se puede determinar la conveniencia de apagar el motor de la bomba.
- Falla en el sensor de nivel S2. Para contener esta eventualidad, es útil contar con un registro de la presión mínima a la cual trabaja la bomba. Cuando la presión en la línea de ingreso a la bomba sea menor que la presión mínima permitida, el motor de la bomba B1 se debe apagar.

- Falla en el sensor de nivel S1. Para superar este fallo, el sistema debe disponer de un sistema de rebose, tal como se indica en la Figura 23. El PLC deberá tener un temporizador para comparar el tiempo de recirculación de un determinado ciclo, con el tiempo asociado a un ciclo normal (o promedio) de activación y desactivación. Una diferencia significativa entre estos tiempos debería generar una alerta temprana o alarma, que pudiese servir como advertencia, más no necesariamente como un indicador de un error en el sistema.

- **Sistemas de tubería**

Adicional a los elementos anteriormente descritos, es crucial para la operación del mecanismo de manejo de las aguas, el uso de un sistema de tubería adecuado. Todas las tuberías deben ser de un material y espesor tal que resistan las condiciones de presión y temperatura generadas en el proceso, así como para evitar la corrosión. En los sistemas prototipo y piloto desarrollados por UNISANGIL, para la bomba seleccionada de 10 caballos de potencia, y la presión máxima generada de 105 PSI, se empleó tuberías de PVC y de acero inoxidable serie 300.

CFD para el diseño de reactores de cavitación

En el capítulo uno, al explicar a partir de la ecuación de Bernoulli el concepto del número de cavitación, se mencionó que un número de cavitación pequeño está asociado a una cavitación intensa, pero que su minimización conlleva retos de diseño, dado que las variables que pueden garantizar que el C_v alcance su punto mínimo de operación óptimo, esto es el delta de presión $P_2 - P_v$, y la velocidad en la restricción del reactor v_h, al alterarse en procura de minimizar el C_v (reducción del delta de presión y aumento de la velocidad), comprometen el grado de erosión de los elementos que se encuentren aguas abajo del reactor, y el consumo energético en el sistema, respectivamente. Por estos motivos, (Jara-Mora et al., 2024), sugieren que es útil un proceso de diseño del reactor apoyado en la simulación de su funcionamiento con base en un análisis computacional de la dinámica del fluido que fluye a través de él (*computational fluid dynamics*, CFD, por sus iniciales en inglés).

Diversos autores, entre ellos (Abbas-Shiroodi et al., 2021; Hong et al., 2022; Osman et al., 2023; Vilarroig Herrera, 2021), detallan procesos de diseño de reactores de cavitación hidrodinámica a partir de CFD. El CFD está soportado en la solución numérica de un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales relacionadas con las leyes físicas de conservación de la masa, conservación del momento y conservación de la energía (Sobachkin & Dumnov, 2014), (Ashgriz & Mostaghim, 2002), según se expresa en las Ecuaciones 11 - 13.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla.(\rho \boldsymbol{V}) = 0 \tag{11}$$

$$\rho\left(\frac{\partial \boldsymbol{V}}{\partial t} + \boldsymbol{V}.\nabla \mathrm{V}\right) = \nabla.\boldsymbol{\tau} - \nabla p + \rho \boldsymbol{F} \tag{12}$$

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + p(\nabla . \boldsymbol{V}) = \frac{\partial Q}{\partial t} - \nabla . \boldsymbol{q} + \Phi \qquad (13)$$

Las dos primeras ecuaciones corresponden a las ecuaciones de Navier - Stokes, las cuales rigen el movimiento de un fluido, en tanto que la tercera ecuación permite analizar la dinámica del flujo de calor en el sistema, siendo ρ la densidad del fluido, V su velocidad, τ la tensión viscosa, p la presión, F las fuerzas que actúan sobre el flujo por unidad de masa, e la energía interna del fluido por unidad de masa, Q el calor por unidad de volumen, t el tiempo, Φ la disipación de calor (medida en watios por unidad de volumen) y $\nabla . q$ la perdida de calor por conducción (con q medida en watios por unidad de área).

La Ecuación 11 describe matemáticamente que las variaciones temporales y espaciales de la masa asociada a un fluido, deben cumplir con la ley de conservación, es decir, que la masa involucrada en un determinado proceso físico como, por ejemplo, la cavitación hidrodinámica, antes y después del proceso, debe ser la misma. En detalle esto implica que la variación respecto al tiempo de la densidad en un punto, más la divergencia del flujo másico por unidad de área a través de una superficie cerrada que encierre a ese punto, debe ser igual a cero. En el sistema internacional, las unidades de estas variaciones serían kilogramos por metro cúbico por segundo ([Kg]/([m^3].[s])

La Ecuación 12 por su parte, corresponde a la segunda ley de Newton aplicada a un determinado punto del fluido. En ella se expresa que la sumatoria de fuerzas en un punto del fluido debida a la tensión viscosa, a la presión y a las fuerzas internas del fluido, es proporcional a la aceleración local por el cambio de la velocidad en el tiempo, sumado a la aceleración del cambio de la velocidad en el espacio (aceleración convectiva). En el sistema internacional, las unidades de esta ecuación serían newtons por metro cúbico (N/[m^3]).

En la Ecuación 13, la conservación de la energía se expresa estableciendo que la sumatoria de la variación temporal del calor en un punto, la disipación de este y las perdidas por conducción, son proporcionales a las variaciones temporales de la energía interna más las variaciones energéticas debidas al producto de la presión y la divergencia de su velocidad. En el sistema internacional, las unidades de esta variación serían vatios por metro cúbico (W/[m^3]).

Las ecuaciones de Navier – Stokes tienen su origen en los estudios de la dinámica de fluidos que en el siglo XVIII hizo el eminente matemático y físico suizo Leonhard Euler, posteriormente complementados por los trabajos sobre viscosidad en el siglo XIX del ingeniero y físico francés Claude-Louis Navier, quien fuera discípulo de Fourier, y del matemático y físico irlandés George Gabriel Stokes, quién definió a mediados del siglo XIX la denominada Ley de Stokes, que establece que la fuerza de arrastre que experimenta una esfera en un fluido laminar (número de Reynolds < 2300, no turbulento) es proporcional a la viscosidad del fluido y a la velocidad y el radio de la esfera. Un estudio divulgativo muy interesante sobre las ecuaciones de Navier – Stokes puede leerse en (Stewart, 2013), y otro sobre la ley de Stokes puede leerse en (Pickover, 2008).

El proceso de simulación apoyado en CFD sigue siempre los pasos del esquema de la Figura 24 (Ashgriz & Mostaghim, 2002). La primera fase, también conocida como fase de preprocesamiento, se compone de la definición y construcción de la geometría del problema (volúmenes, áreas, longitudes del reactor), a partir de la cual se establece un mallado, el cual será clave para la siguiente fase. En esta primera etapa del diseño se deben definir las condiciones iniciales y de frontera, y los objetivos de ingeniería. Las condiciones iniciales son justamente los valores que requiere el simulador para la primera iteración, en tanto que las condiciones de frontera se refieren a los valores que toman ciertas paredes en los límites del dominio computacional, y son condiciones que generalmente están impuestas por una condición de diseño como, por ejemplo, una bomba o una temperatura, pero también, son elementos que el software calcula automáticamente como, por ejemplo, la presión de salida del sistema. Los objetivos de ingeniería, por su parte, son parámetros o valores de medida de las variables en estudio, que se desea que calcule el software o que se someten a un cálculo manual por parte del investigador, para determinar si el fenómeno que se espera se está evidenciando en la simulación.

La segunda fase, por su parte, consiste en la aplicación de un método numérico específico para dar solución a las ecuaciones diferenciales parciales que rigen la dinámica del fluido. Entre los métodos numéricos más usados en CFD están el Método de Diferencias Finitas (MDF), y el Método de Elementos Finitos (MEF). Este último ha ganado popularidad y relevancia en el CFD, dado que permite trabajar un mallado con elementos de distintos tipos de formas (triángulos, cuadrados, rombos), y de tamaños irregulares, lo cual define lo que se denomina como el "elemento finito" de simulación, característica que lo hace computacionalmente más costoso, pero más versátil para simular geometrías complejas, permitiendo abordar de un mejor modo las condiciones de frontera. El MDF, en cambio, trabaja con mallados regulares (cuadrícula), que son computacionalmente menos costosos, pero que dificultan el abordaje de las condiciones de frontera y los problemas con geometrías de mediana y alta complejidad. En uno u en otro caso, las ecuaciones diferenciales parciales son discretizadas y transformadas en sistemas de ecuaciones algebraicas que son resueltas a través de métodos numéricos iterativos. La tercera y última fase consiste en el acondicionamiento de los resultados numéricos obtenidos para poder presentarlos de manera gráfica y responder a los análisis solicitados por el usuario final. Todo software de diseño y simulación aborda sistemáticamente estas tres etapas. Entre los más conocidos y empleados se encuentran Solidworks® y ANSYS®.

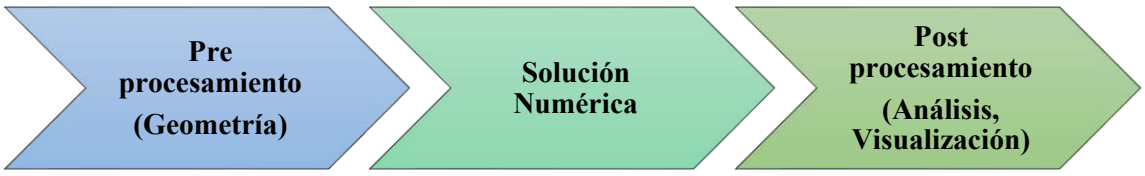


Figura 24. Esquema proceso de simulación a través de CFD. Fuente: los autores.

Ejemplo del uso de CFD para el diseño de un reactor de cavitación

Con base en los experimentos diseñados e implementados por UNISANGIL, se detallan a continuación los aspectos más relevantes que se consideraron para el diseño de los reactores de cavitación hidrodinámica que fueron posteriormente empleados en el tratamiento y desinfección de aguas. Los diseños fueron implementados en Solidworks®

Preprocesamiento - Geometría

Acorde con lo comentado en el apartado anterior, el primer paso en el proceso de diseño y simulación con CFD parte de la definición de la geometría del problema a tratar. La Figura 25 muestra el ejemplo de la geometría establecida para un reactor con un diseño geométrico de doble aleta.

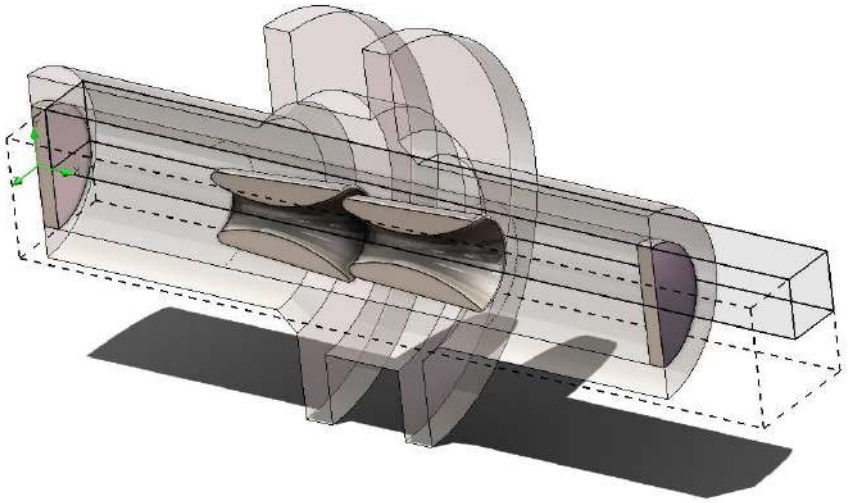


Figura 25. Geometría de un reactor de cavitación de doble aleta. Fuente: los autores.

Al establecer la geometría, se debe determinar también el dominio computacional para la simulación. En la Figura 25, el dominio computacional corresponde al marcado por las líneas punteadas. Esta geometría en particular posee simetría respecto al eje Y y al eje Z, lo cual reduce el costo computacional de la simulación, dado que su desarrollo requiere sólo uno de los cuatro cuadrantes que forman la figura. Una geometría más compleja se aprecia en la Figura 26, la cual corresponde a un reactor que se ha complementado con un sistema de generación de vorticidad. Esta geometría conlleva un coste computacional de simulación mayor, dado que, globalmente, ya no posee simetrías.

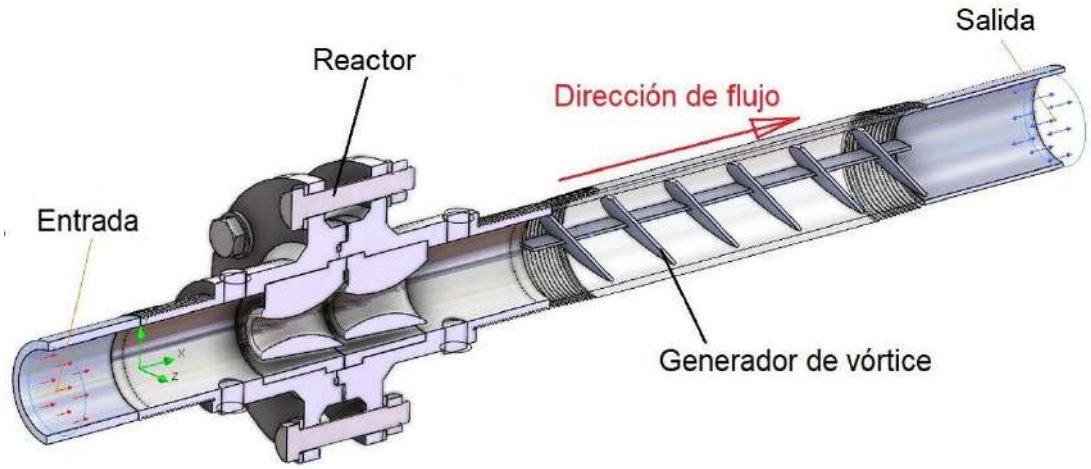


Figura 26. Geometría Reactor Doble Aleta y Generador de Vorticidad. Fuente: Los Autores.

Preprocesamiento – Condiciones Iniciales

Las condiciones iniciales establecidas para la simulación son mostradas en Tabla 1:

Tabla 1. Condiciones Iniciales Simulación Reactor Doble Aleta. Fuente: Los Autores

Parámetro	Magnitud y Valor
Parámetros termodinámicos	Presión estática: 101325.00 Pa Temperatura: 293.20 K
Parámetros de velocidad	Vector velocidad Velocidad en dirección X: 0 m/s Velocidad en dirección Y: 0 m/s Velocidad en dirección Z: 0 m/s
Parámetros de turbulencia	Intensidad y longitud de la turbulencia Intensidad: 2.00 %

Preprocesamiento – Condiciones de Frontera

Para un sistema reactor más elemento de vorticidad, es fundamental establecer condiciones de frontera tanto para el flujo de entrada, el cual tiene una relación directa con la operación de la bomba que impulsa el flujo, como para el flujo de salida. Las Tablas 2 y 3 sintetizan las condiciones de frontera del ejemplo analizado, y la Figura 27 muestra la curva característica de las bombas de 6 y 10 HP propuestas para el sistema de cavitación.

Tabla 2. Condiciones de Frontera a la Entrada del Reactor. Fuente: Los Autores.

Tipo	Flujo de volumen de entrada
Parámetros de flujo	Dirección de los vectores de flujo: Normal a cara Caudal volumétrico: Según bomba BARNES 6 HP y 10 HP (ver Figura 27). Flujo completamente desarrollado: No Perfil de entrada: 0
Parámetros termodinámicos	Tipo de temperatura: Temperatura de los componentes iniciales Temperatura: 293.20 K
Parámetros de turbulencia	Intensidad y longitud de la turbulencia Intensidad: 2.00 % Longitud: 0.001 m
Parámetros de capa límite	Tipo de capa límite: Turbulenta

Tabla 3. Condiciones de Frontera a la Salida del Sistema Reactor más Generador de Vorticidad. Fuente: Los Autores

Tipo	Presión ambiental
Parámetros termodinámicos	Presión ambiente: 101325.00 Pa Tipo de temperatura: Temperatura de los componentes iniciales Temperatura: 293.20 K
Parámetros de turbulencia	Intensidad y longitud de la turbulencia Intensidad: 2.00 % Longitud: 0.001 m
Parámetros de capa límite	Tipo de capa límite: Turbulenta

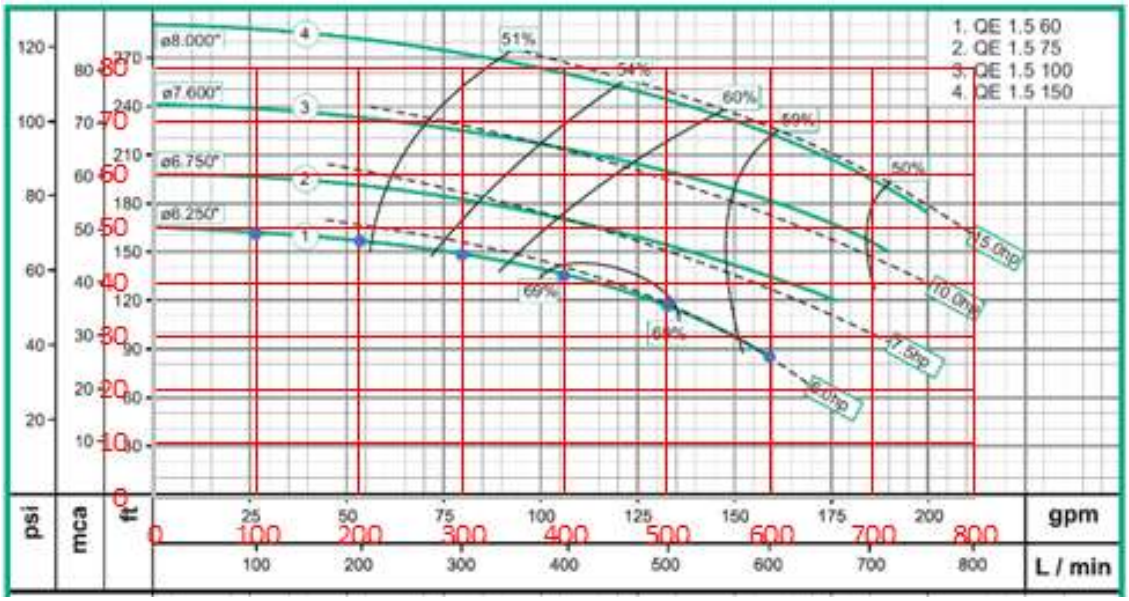


Figura 27. Curva de la bomba como condición de frontera a la entrada del reactor. Fuente: Adaptación catálogo de BARNES.

En la Figura 27, los puntos azules son un ejemplo de los valores que se ingresan en el simulador como condiciones de frontera a la entrada del reactor.

Preprocesamiento – Objetivos de Ingeniería

Algunos de los objetivos de ingeniería serán tratados como valores de convergencia en las iteraciones de la simulación, empleando para ello un método numérico adecuado. En CFD los objetivos que se definan como valores de convergencia son importantes, porque dicha convergencia hace referencia a que tan cercana es la solución numérica de la solución real. Estos parámetros o valores de las medidas de las variables en estudio serán iterados por el método numérico empleado (elementos finitos, por ejemplo), hasta que se determine que los cambios entre un cálculo y otro es menor a una determinada tolerancia establecida. Este valor de tolerancia define si el cambio de valor entre iteración e iteración es insignificante o no.

La Tabla 4 detalla para el caso de estudio (reactor más generador de vorticidad), los objetivos globales, los cuales son evaluados en todo el dominio computacional, es decir en todas las celdas de simulación; los objetivos de superficie, los cuales se evalúan sólo en ciertas caras o superficies del dominio computacional, y que pueden estar íntimamente relacionados con las condiciones de frontera establecidas en la configuración de la simulación CFD; y los denominados objetivos de ecuación, que corresponden a aquellos parámetros que no son ordinarios de una simulación CFD, como, por ejemplo, el número de cavitación σ. En este caso, el software permite hacer un cálculo a partir de otros parámetros o medidas de variables que sí han sido calculados con la simulación. Todos los objetivos de ingeniería se programaron para ser calculados teniendo en cuenta las coordenadas globales del problema.

Tabla 4. Objetivos de Ingeniería. Fuente: Los Autores.

Objetivo	Cálculo (valor buscado)	Uso en convergencia
	Objetivos Globales	
v_h, Velocidad	Máximo	Sí
Densidad promedio del fluido, ρ_m	Promedio	Sí
Densidad mínima del fluido, ρ_{min}	Mínimo	No
Fracción másica de vapor $(masa\ vapor/masa\ total)$	Máximo	No
Fracción volumétrica de vapor $(Vol.vapor/\ Vol.total)$	Máximo	No
Longitud media de la turbulencia (metros)	Promedio	No
Intensidad media de la turbulencia (%)	Promedio	No
Energía turbulenta (Julios/Kg)	Promedio	No
Disipación turbulenta (W/kg)	Promedio	No
Presión máxima, p_{max}	Máximo	No
Presión mínima, p_{min}	Mínimo	No
Presión promedio, p_m	Promedio	No
Velocidad promedio, v_m	Promedio	No
	Objetivos de Superficie	
Presión a la entrada del reactor, p_1	Promedio	Sí
Presión ponderada a la entrada del reactor, p_{1B}	Promedio	No
Presión a la salida del reactor, p_2	Promedio	Sí
Presión ponderada a la salida del reactor, p_{2B}	Promedio	No
Flujo promedio, Q_m (Deber ser igual a la entrada y a la salida)	Promedio	Sí
	Objetivos de Ecuación	
Número de cavitación σ_v calculado con densidad mínima	$\frac{p_2 - p_{min}}{0.5\ \rho_{min} {V_h}^2}$	No
Número de cavitación σ_v calculado con densidad promedio	$\frac{p_2 - p_{min}}{0.5\ \rho_m {V_h}^2}$	No
Potencia	$(p_1 - p_2)Q_m$	No

Cabe destacar que la presión mínima debe estar por debajo de la presión de vapor del agua, a la temperatura a la cual se encuentre el fluido, para que el fenómeno de la cavitación se esté presentando.

En las simulaciones se encontró que el número de cavitación calculado con la densidad mínima no concuerda con los parámetros generales que se encuentra en la literatura internacional, por lo que se ignoró este cálculo y se usó para los estudios posteriores el valor del σ_v determinado a partir de la densidad promedio, de la presión promedio a la salida del reactor

(p_2) y de la velocidad máxima (V_h). Alternativamente, el número de cavitación se puede calcular también a través de la Ecuación 5, usando p_1 como la presión promedio determinada por la simulación a la entrada del reactor.

Solución Numérica

La solución numérica se realizó a través de elementos finitos en Solidworks® en un computador con procesador Intel(R) Core (TM) i7-3960X, de 3.30GHz, memoria RAM de 16307 MB / 11567 MB, y sistema operativo Windows 10 (Versión 10.0.19045).

En el diseño experimental del reactor sin generador de vorticidad (ver Figura 25), dada su simetría, fueron empleados 19.827 volúmenes. Este diseño fue empleado para optimizar puntualmente la geometría del reactor. Cada iteración duró 1.505 segundos (25 minutos), con un total de 2.745 corridas por iteración hasta la convergencia luego de 200 iteraciones.

En la simulación del sistema de reactor más generador de vorticidad, dado que por sus características no era posible hacer uso de la simetría para simplificar el proceso de simulación, se emplearon 708.943 volúmenes (celdas), con 344 687 celdas sólidas y 5 501 celdas parciales. Con la bomba de 6 HP, la simulación duró 84.090 segundos (23.35 horas) y para la bomba de 10 HP duró 67.090 segundos (18.6 horas) hasta la convergencia. Se ensayaron dos escenarios, uno con un mecanismo generador de vórtices con 6 aletas (*flaps*) y otro con 2. En el experimento con 6 *flaps* la simulación se detuvo prematuramente, dado que la cavitación no se presentaba, probablemente como consecuencia del número de aletas empleadas. En el segundo ensayo (con 2 *flaps*) la simulación mostró un buen desempeño, según los parámetros que se describirán en los resultados.

Las características activas fueron la cavitación y el flujo (laminar y turbulento), en tanto que el análisis estructural, la conducción, el electromagnético, y los efectos gravitacionales, fueron desactivados. La fracción de masa de gas disuelto fijada fue de 0.0001, la rugosidad predeterminada de 80.0 micrómetros y el sistema de unidades el SI (m-kg-s).

De este modo, las simulaciones fueron empleadas para dos tipos de análisis. El primero correspondió a unas simulaciones orientadas a perfeccionar el diseño del reactor, y el segundo a evaluar el sistema reactor – generador de vorticidad, en cuanto su generación de cavitación y número de cavitación característico. Los detalles de los resultados de las simulaciones fruto de las soluciones numéricas son detalladas a continuación.

Post procesamiento – Análisis Diseño Reactor

Para el diseño del reactor, se realizó un diseño experimental con iteraciones aleatorias de cuatro parámetros en 200 escenarios: diámetros internos de cada copa (2 parámetros) y espacios que hay desde la superficie externa de cada aleta al diámetro interno de la tubería (2 parámetros). En la Figura 28, se detallan las áreas y diámetros internos de cada aleta (A1.1, A1.2, d1, d2), junto con las áreas externas (A1.2, A2.2), y los espacios entre cada aleta y el borde interno de la tubería.

A partir de estos cuatro parámetros se calcularon dos parámetros geométricos adicionales, referidos a las relaciones entre áreas:

- **β, betha**: Área de la restricción dividida entre el área de flujo de la tubería. **β1** para la primera aleta, y **β2** para la segunda aleta.

- **φ, phi**: Área interna dividida entre el área externa en cada restricción o aleta. **φ1** para la primera aleta, y **φ2** para la segunda aleta.

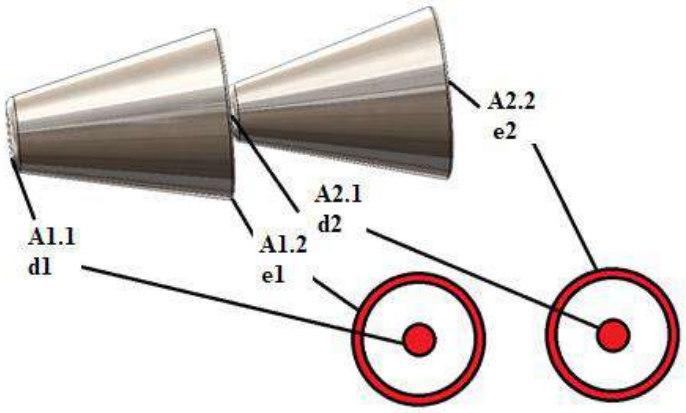


Figura 28. Geometría de las aletas en un reactor con dos aletas. Fuente: Los Autores

Una vez determinados por medio del simulador, estos datos se pasan por un software especializado para determinar gráficos de contorno y establecer si hay puntos óptimos en los cuales el número de cavitación sea menor en comparación con los demás puntos. Las Figuras 29 y 30 muestra estos gráficos de contorno, obtenidos de los resultados para *betha* y para *phi*. En general, se puede observar que sí hay puntos óptimos, aproximadamente en *bethas* iguales a 0.46 y 0.48, y *phis* iguales a 0.15 y 0.19.

A partir de los cuatro parámetros de beta y fi (**β1, β2, φ1**, **φ2**) se establece una asociación con los cuatro parámetros geométricos (diámetros y espacios para las aletas), y se recurre a la solución de un sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas para determinar dichos parámetros geométricos, los cuales optimizan (minimizan) el número de cavitación y reducen también la potencia requerida.

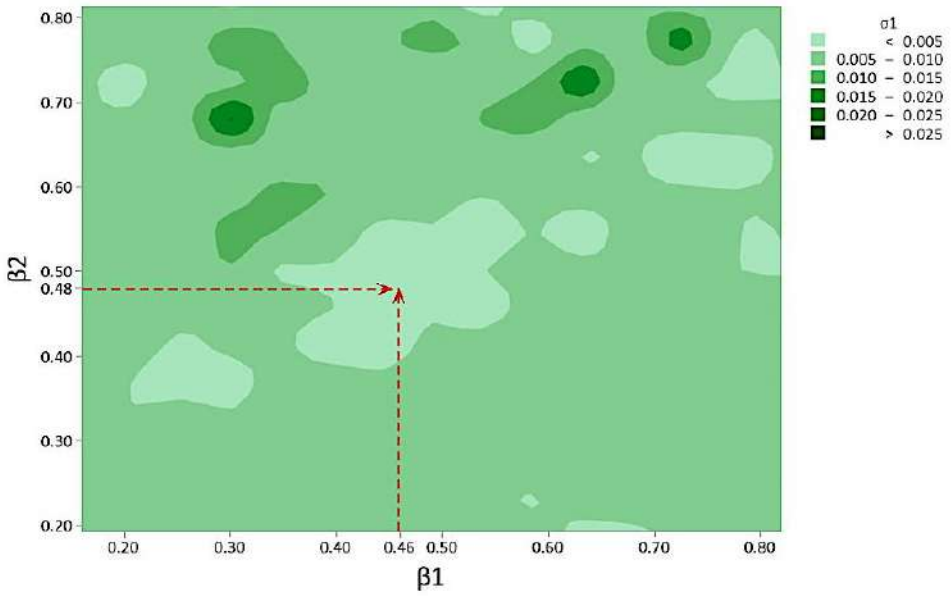


Figura 29. Contorno del número de cavitación para β1 y β2. Fuente: Los Autores

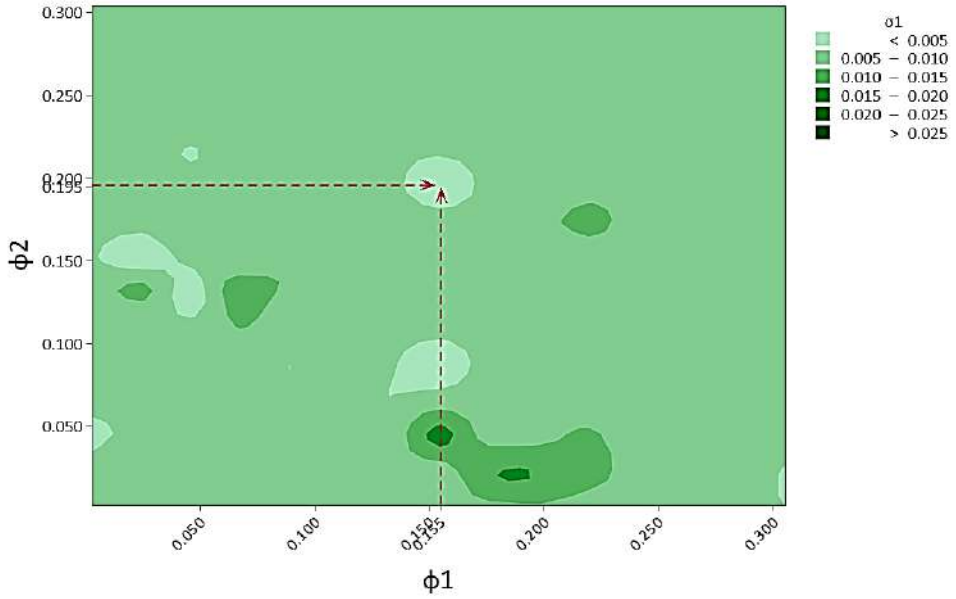


Figura 30. Contorno del número de cavitación para φ1, φ2. Fuente: Los Autores

Luego de determinadas las cotas geométricas, se procede a completar el diseño asistido por computador (CAD, por sus iniciales en inglés) del modelo, buscando que sea construible y fabricable. En esta parte es importante tener en cuenta todo lo referente a piezas de tipo comercial, sellos para evitar fugas, y opciones de anclaje a la estructura general del sistema. La Figura 31 muestra una imagen de esta parte del diseño.

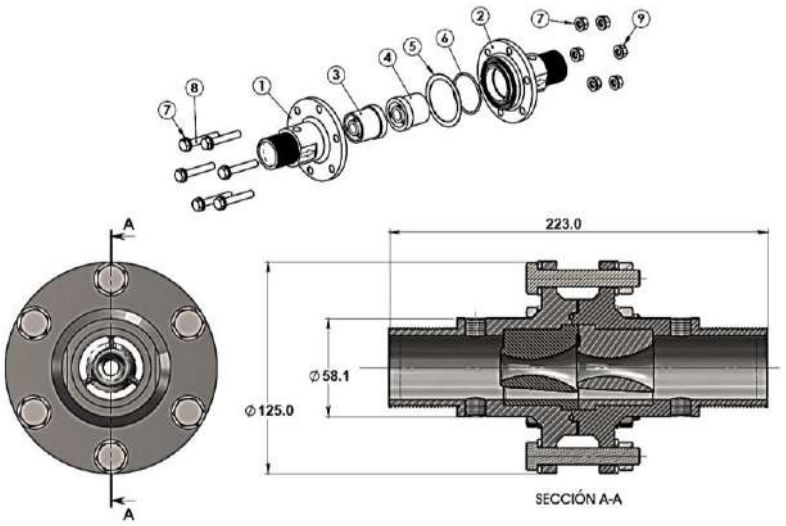


Figura 31. CAD del reactor con doble aleta, diseño para evaluar fabricación. Fuente: Los Autores

Post procesamiento – Análisis Desempeño del Reactor

La Tabla 5 y las Figuras 32 y 33 muestran los resultados de simulación con CFD para el sistema reactor más generador de vorticidad, con bomba de 10 HP.

Tabla 5. Resultados de Simulación con Bomba de 10 HP

Nombre	Unidad	Valor	Delta
v_h, Velocidad máxima	m/s	159.932	64.5792637
Densidad promedio del fluido, ρ_m	kg/m^3	1176.71	0.465599803
Densidad mínima del fluido, ρ_{min}	kg/m^3	5.74	2.22664929
Fracción másica de vapor	NA	1.0000000	0
Fracción volumétrica de vapor	NA	0.9999378	1.07008546e-09
Longitud media de la turbulencia	m	8.157e-04	2.80682308e-05
Intensidad media de la turbulencia	%	19.05	1.80231871
Energía turbulenta media	J/kg	2.547	0.662265176
Disipación turbulenta	W/kg	1600.84	502.501609
Presión máxima, p_{max}	Pa	795065.99	488462.488
Presión mínima, p_{min}	Pa	0	0
Velocidad promedio, v_m	m/s	7.853	1.63781243
Presión promedio, p_m	Pa	282407.22	39558.48
Presión promedio a la entrada del reactor, p_1	Pa	525929.52	53143.4404
Presión ponderada a la entrada del reactor, p_{1B}	Pa	525929.52	53143.4404
Presión a la salida del reactor, p_2	Pa	122589.59	12440.121
Presión ponderada a la salida del reactor, p_{2B}	Pa	123533.84	12882.516
Flujo promedio, Q_m	m^3/s	0.0076	0.0018526826
Potencia	W	3080.31	1226.5622
σ_v calculado con densidad promedio	NA	0.010	**0.105038616**

De los resultados de simulación se observó que los valores de velocidad máxima logrados con la bomba de 10 HP comparados con los de la bomba de 6 HP son prácticamente el triple, a pesar de que no se utiliza una bomba de doble potencia. Esto es deseable puesto que a mayor velocidad el número de cavitación es menor y el fenómeno es más intenso.

De otra parte, los valores de potencia obtenidos en simulación son bajos, ya que la simulación con el escenario de bomba de 6 HP consume 1.5 kilovatios (energía puesta en el fluido), en tanto que con la bomba de 10 HP el consume es de 3.08 kilovatios (energía puesta en el fluido). Si se divide este consumo entre la eficiencia eléctrica que tiene cada una de las bombas, estas potencias a nivel eléctrico serían de 2.3 y 5.13 kilovatios respectivamente.

Para el caudal, los resultados de simulaciones mostraron para la bomba de 6 HP un valor de 6.7 litros por segundo, y de 7.6 litros por segundo para la bomba de 10 HP.

Obtener esta información a partir de un proceso de simulación es una ventaja enorme, dado que, por ejemplo, a partir de ella se puede determinar si son valores adecuados o no para abordar el procesamiento de aguas residuales provenientes de un vertedero sobre una determinada fuente hídrica (como un rio o un lago), siendo necesario, no obstante, tener presentes factores adicionadles como las pérdidas por las tuberías, tanques, desniveles, obstrucciones, entre otros elementos.

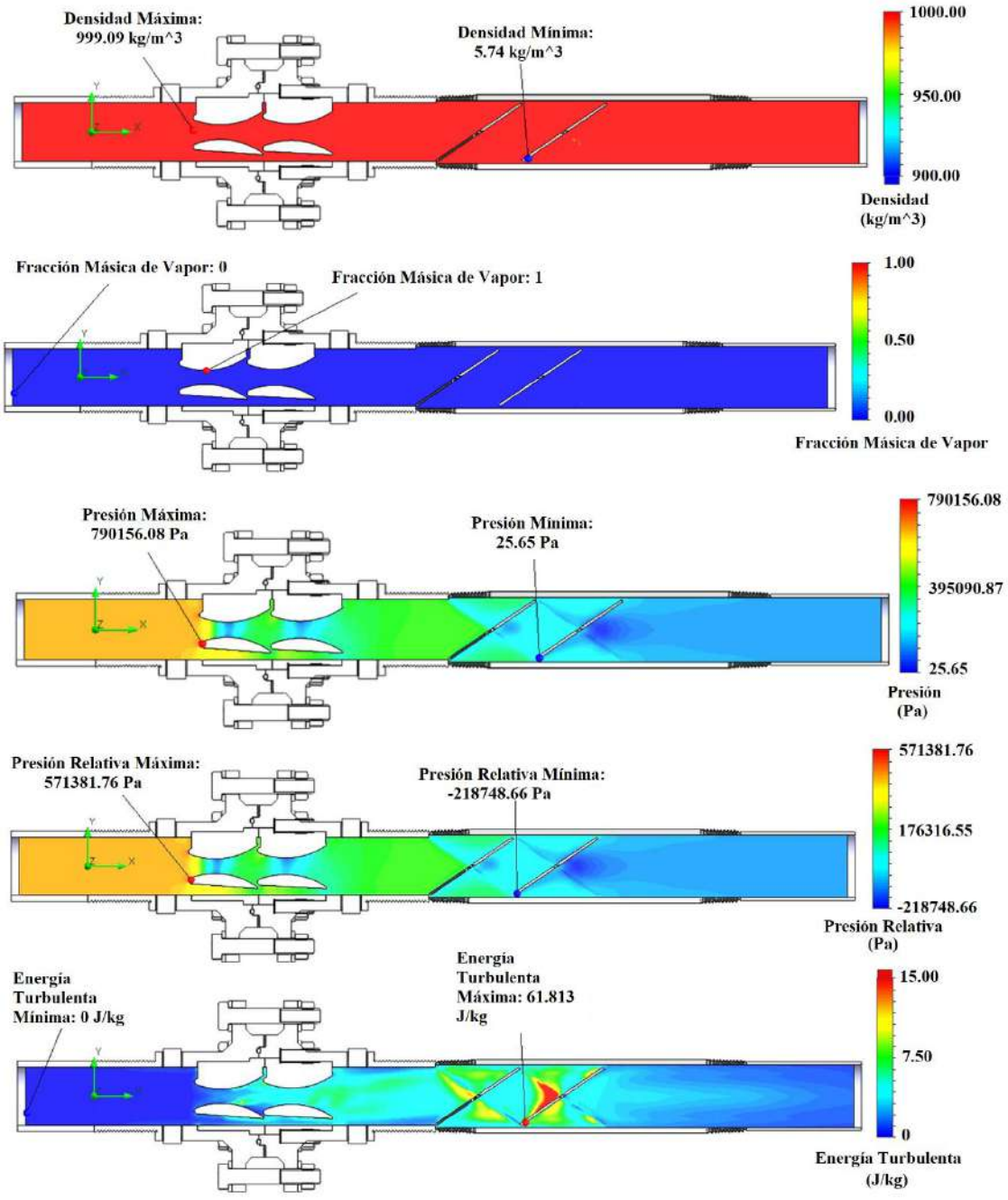


Figura 32. Resultados simulación con CFD – Bomba de 10 HP. Fuente: Los Autores

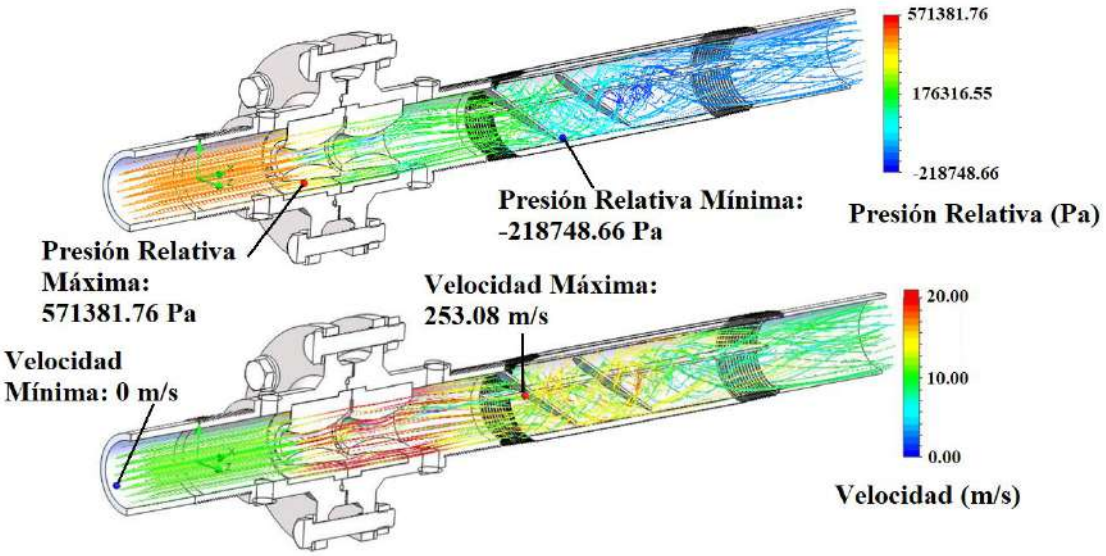


Figura 33. Resultados de Simulación CFD para la Presión Relativa y la Velocidad del Flujo.
Fuente: Los Autores

Validación de la simulación

Validar el modelo analizado por simulación requiere considerar nueve condiciones implicadas en el mismo:

1. Presión a la entrada, p_1.
2. Presión a la salida, p_2.
3. Velocidad a la entrada, v_1.
4. Velocidad a la salida, v_2.
5. Relación de áreas, β.
6. Energía Disipada, E_D.
7. Densidad a la entrada, ρ_1.
8. Densidad a la salida, ρ_2.
9. Calidad de la mezcla vapor-líquido, x.

La calidad de la mezcla vapor – líquido está definida por la Ecuación 14, y gráficamente es representada en la Figura 35.

$$x = \frac{masa_{vapor}}{masa_{vapor} + masa_{líquido}} \tag{14}$$

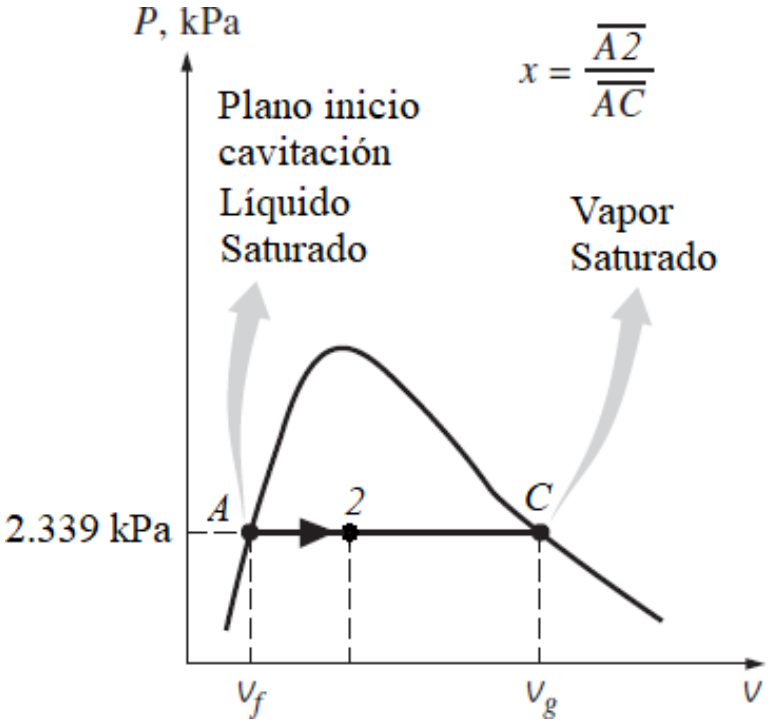


Figura 34. Definición de la calidad del vapor, x, en el fenómeno de la cavitación. Fuente: *(Cengel & Boles, 2015)*

De esas nueve condiciones, cuatro pueden ser asumidas según el proceso físico y las características propias del sistema bajo prueba. Estas son, la presión de salida, que puede ser tomada como igual a la presión de vapor, la densidad de entrada del fluido, la calidad de la mezcla vapor líquido, y la relación de áreas, la cual puede asumirse como una condición de diseño del reactor. Como ejemplo se detallan a continuación los valores para estas condiciones, asumidas en los experimentos diseñados en UNISANGIL:

- Presión p_2, establecida como igual a la presión de vapor, Pv = 2300 Pa.
- Densidad de entrada del fluido, ρ_1 = 1000 kg/m^3.
- Calidad de la mezcla líquido-vapor, x = 15% (asumida).
- Parámetro de diseño del reactor, β = 0.24 (criterio de diseño).

Las otras cinco condiciones pueden determinarse con base en formulaciones teóricas:

- La ecuación de Bernoulli.
- La ecuación de continuidad (conservación de la masa).
- La ecuación (ajuste polinómico) de la curva de la bomba de la bomba, (la cual relaciona la presión de entrada y la velocidad de entrada).
- La ecuación de la calidad vapor-líquido a una temperatura determinada (20°C, por ejemplo), que establece una relación entre la densidad de salida, $\rho_{2,}$ en función de la calidad de la mezcla vapor – líquido, x y la temperatura.

- La relación entre la presión requerida en el reactor y el caudal de entrada, y la relación entre la potencia y el caudal de entrada, a partir de las cuales se puede estimar la energía disipada.

A partir de las condiciones asumidas, y de la solución de las ecuaciones asociadas al modelo, se puede determinar cualquier otro valor desconocido. Como prueba de ello, la Figura 34 muestra una gráfica que relaciona la variación de presión en función de la variación del caudal, en la que visualmente puede verificarse la correlación entre los resultados que se obtienen por simulación CFD y los que se obtienen a partir de la solución de las ecuaciones que modelan el sistema. Esta correlación determina una validación reciproca entre los resultados de simulación y los de las ecuaciones que se emplean para modelar el sistema.

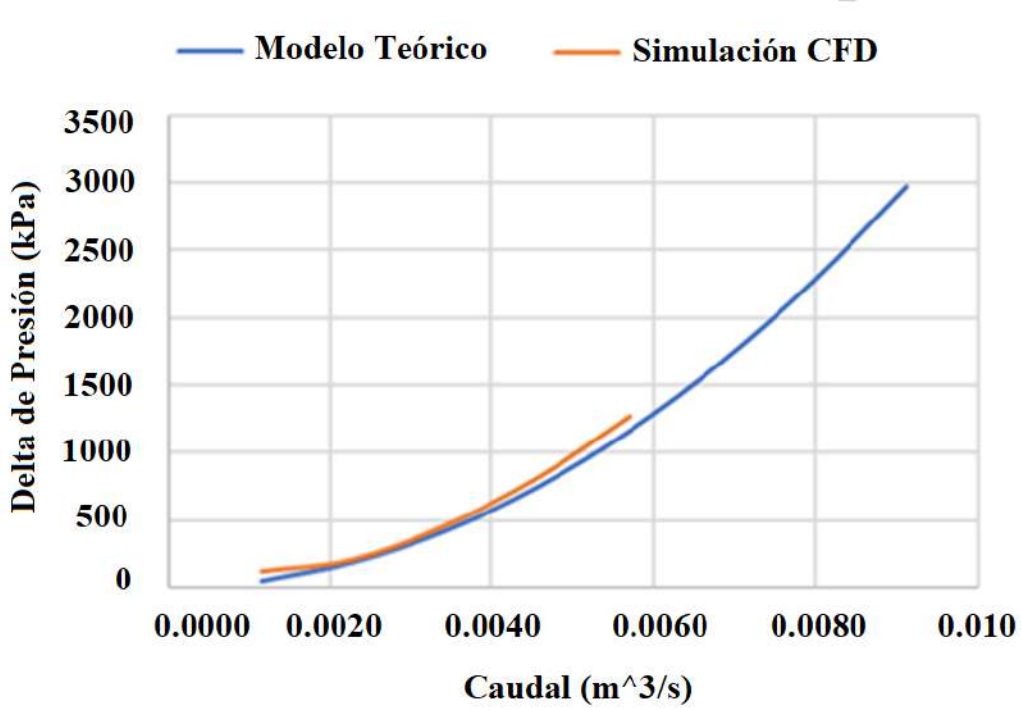


Figura 35. Relación entre el delta de presión y el caudal obtenida por simulación CFD y por modelado teórico.

Diferencias entre el σ_v simulado y el σ_v calculado en pruebas reales

La simulación a partir de CFD es una herramienta poderosa que permite determinar con precisión en qué parte del reactor ocurre efectivamente el fenómeno de la cavitación, al tiempo que hace posible calcular una aproximación al valor del σ_v. No obstante, es importante tener presente que la simulación omite detalles del sistema que harían el proceso de solución numérica computacional extremadamente complejo. Así, por ejemplo, en simulación se considera que la bomba está conectada directamente al reactor, omitiendo una serie de accesorios que sí están presentes en los sistemas reales, verbigracia válvulas, codos, tes, entre otros. Esto hace que el número de cavitación que se obtiene por simulación se desvié del dato real, dado que no es posible

considerar en simulación la totalidad de las fuentes de pérdidas y cambios de dirección de flujo, los cuales influyen directamente en el número de cavitación, el cual es función del inverso del cuadrado de la velocidad del fluido. Sin embargo, siempre existirá una relación entre los valores de σ_v calculados por simulación y los que se obtengan a partir de mediciones in situ reales.

De otra parte, el número de cavitación que se determina con base en simulación sí considera el cambio de fase que existe en el fluido al cambiar de líquido a vapor como consecuencia de la cavitación. Esta consideración ocasiona que la velocidad del fluido en el orificio del reactor se incremente, lo cual, según se ha comentado, tiene como consecuencia una reducción en el cálculo del número de cavitación, por lo que es de esperar que la simulación reporte números de cavitación con valor menor que los que se obtengan de mediciones reales. En efecto, en los cálculos que se elaboran a partir de las pruebas sobre un sistema real, ese cambio de fase no es considerado, de hecho, es común que se siga tomando la densidad del agua con un valor igual al de la densidad del agua líquida (1000 Kg/m^3), cuando en realidad, por el fenómeno de la cavitación dicha densidad debe ser menor.

En síntesis, cabe esperar que los valores de σ_v calculados en simulación tengan valores menores a los cálculos de σ_v realizados in situ o en laboratorio, dadas las consideraciones expuestas en los párrafos previos. Así, por ejemplo, en los trabajos de UNISANGIL, para reactores tipo Venturi y Aleta, a partir de simulación se hallaron valores de σ_v de 0.07 y 0.17, respectivamente, en tanto que en las pruebas reales dichos valores fueron estimados en 0.56 y 0.3132, respectivamente.

Consideraciones para las Pruebas Microbiológicas y Fisicoquímicas

Normas consultadas

Los experimentos realizados por UNISANGIL incluyeron análisis de aguas residuales domésticas vertidas sobre un río, aguas residuales de plantas de beneficio animal, aguas residuales producto del beneficio del café, aguas residuales tratadas en plantas de tratamiento, y lixiviados de un relleno sanitario. En Colombia, un referente para analizar los resultados es la resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, la cual establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, entre otras disposiciones. La resolución establece en su artículo 6 que se debe realizar el análisis y el reporte de valores en número más probable (NMP/100 ml) de los coliformes termo colorantes presentes en los vertimientos puntuales de agua residual doméstica y no doméstica (ARD y ARnD), mediante los cuales se gestionen excretas humanas y/o animales a cuerpos de aguas superficiales, cuando la carga másica en las aguas residuales antes del sistema de tratamiento sea mayor a 125,00 kg/día de DBO5. En la práctica esto significa que

no hay un límite permisible frente a la presencia de microrganismos patógenos en aguas residuales domésticas o no domésticas.

En la recolección de las muestras, una guía básica es el instructivo para la toma de muestras de agua residuales del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. De otra parte, para la determinación de la concentración de los diferentes grupos microbianos a analizar en la muestra de lixiviados, se útil emplear el método estandarizado de filtración por membrana según la norma ISO: 9308-1, y el método descrito en el "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" de la Asociación Americana de Salud Pública (APHA).

Descripción del paso a paso del proceso de las pruebas

Previo a la realización de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos de los distintos tipos de aguas residuales, es fundamental realizar el montaje de los equipos, la preparación y esterilización de materiales, soluciones y medios de cultivo necesarios para llevar cabo los análisis de laboratorio. Posterior a esto se puede iniciar los análisis, cuyo objetivo es la caracterización fisicoquímica y microbiológica de las muestras de agua. Esta caracterización sirve para evaluar la eficiencia que tiene cada reactor de cavitación. Los parámetros fisicoquímicos medidos a las muestras fueron: Demanda Biológica de Oxigeno (DBO_5), Demanda Química de Oxigeno (DQO), Alcalinidad, pH, conductividad, turbiedad, solidos suspendidos totales, solidos totales, solidos sedimentables y solidos disueltos. Los parámetros microbiológicos analizados fueron: Coliformes Fecales (*E. coli*) Coliformes Totales, Aerobios Mesófilos, y Mohos y levaduras. Con el fin de minimizar la influencia de la composición de una muestra sobre la detección y cuantificación de microorganismos, es necesario que en cada prueba llevada a cabo se realice un análisis de muestras blanco, y que de igual modo se examine la esterilidad de los medios de cultivo y de los materiales. Así mismo es importante elaborar pruebas con una concentración conocida de microrganismos, siguiendo las normas estándar para este tipo de pruebas, con el objetivo de disminuir al mínimo las posibles interferencias que se puedan causar por los métodos analíticos (Jara-Mora et al., 2024).

Definición de los criterios de análisis

En microbiología, la Reducción Logarítmica es una medida de la eficacia de un proceso para reducir los patógenos. Cuanto mayor sea la reducción logarítmica, más eficaz será el proceso para eliminar los patógenos. 'Log' es la abreviatura de logaritmo, el cual es una operación matemática inversa a la potenciación. Sí, por ejemplo, $b^n = a$, entonces $\log_b a = n$. Es decir, en la operación logaritmo, conocida la base y el resultado, se determina el exponente. Si b es igual a diez, se dice que el logaritmo es base 10. Por esto, cada aumento 'log' es un aumento de 10 veces. Una reducción logarítmica lleva la potencia en la dirección opuesta. Por ejemplo, una reducción logarítmica de 1 es equivalente a una reducción de 10 veces o el recuento final es 1/10 del recuento original. Entonces, para este caso, el porcentaje de reducción sería igual a: $(1 - 1/10)\, x\, 100 = 90\%$.

Para determinar la reducción logarítmica, los laboratorios de microbiología cuentan el número de unidades formadoras de colonias (UFC/g) de un patógeno determinado antes del tratamiento de desinfección y después del tratamiento de desinfección. El resultado de la diferencia

entre el 'antes' y el 'después' se expresa como una Reducción Logarítmica. En este proceso se aplican las siguientes ecuaciones:

$$LR = log10\ (N/No) \tag{15}$$

$$Rr\ (\%) = \frac{Co - Ct}{Co} x\ 100 \tag{16}$$

En la reducción logarítmica (Ecuación 14), No es el número inicial de microorganismos, y N es el número final de microorganismos después del proceso de eliminación o inactivación.

En la tasa de reducción de la concentración microbiana, Rr, (Ecuación 15) Co es la concentración inicial de microorganismos en el medio o solución, y Ct es la concentración de microorganismos después de un cierto período de tiempo o proceso de tratamiento.

Resumen o puntos clave del capítulo

En este capítulo se han detallado aspectos relevantes para la implementación de sistemas de cavitación hidrodinámica, proyectados para el tratamiento y desinfección de aguas residuales. Los fundamentos de la dinámica computacional de fluidos aplicada al diseño de reactores de cavitación han sido expuestos con base en las experiencias de UNISANGIL.

El capítulo culmina especificando elementos importantes para tener en cuenta en los análisis microbiológicos y fisicoquímicos.

En el siguiente capítulo se describirán experiencias de cavitación hidrodinámica desarrolladas por el Departamento de Investigación de la Fundación Universitaria de San Gil-UNISANGIL, especificando los experimentos con aguas vertidas directamente sobre el río Fonce, con lixiviados del relleno sanitario El Cucharo, con aguas residuales de la planta de beneficio animal del municipio de Villanueva, y con aguas residuales del beneficio del café.

Capítulo III: Experiencias de Tratamiento de Aguas Residuales con HC

Milton Javier Muñoz Neira, Wilson Gamboa Contreras, Frank Carlos Vargas Tangua, Freddy Alexander Jara Mora, Jorge Alberto Neira Tavera, Luis Eduardo Cobos Ramírez, Yuleimy Ramírez Ordoñez, Fabio Andrés Dueñas Bohórquez, Azucena Ayala Ramírez, Sandra Johana Benítez Muñoz, Yeimy Marcela Martínez Santana, Sergio Andrés Peña Perea.

Departamento de Investigación de UNISANGIL, San Gil, Colombia.

*Autor de correspondencia

Email: vargastanguaf@gmail.edu.co (Frank Carlos Vargas Tangua)

HC en el Manejo de Aguas Residuales Vertidas en el Río Fonce

El río Fonce es una importante fuente hídrica del sureste del departamento de Santander en Colombia (ver Figura 36, con círculo rojo marcando la zona de influencia del río), cuyo cause fluye en medio de la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos. Nace de la unión de los ríos Riachuelo y Pienta, cuyas aguas provienen a su vez del parque natural denominado Santuario de Fauna y Flora Guanentá Alto Río Fonce[5]. Este río desemboca en el río Suarez, el cual, al unirse con el río Chicamocha forma el río Sogamoso, que a su vez desemboca en el gran río Magdalena. El Fonce tiene una longitud aproximada de 98 Km, una pendiente de 3.6%, un caudal promedio cercano a los 80 m^3/s, y precipitaciones promedio de 2224mm, con un área de influencia cercana a los 700 Km^2. En su recorrido beneficia a diversos municipios, entre ellos San Gil, Charalá, Valle de San José, Páramo y Socorro. Sus aguas son fundamentales para el desarrollo agrícola de la región, como fuente alterna de abastecimiento de agua para el municipio de San Gil, y, desde hace unas décadas, se ha convertido también en medio para el despliegue de diversos deportes de aventura, entre ellos el rafting, atractivo turístico muy significativo que dinamiza en gran modo la economía de la provincia de Guanentá, de la cual San Gil es su centro. Más de 70.000 habitantes se benefician directa e indirectamente del río, por lo que su contaminación es un problema de vital importancia que afecta directamente la situación socio económica de la región de influencia.

Diversas fuentes contribuyen a la contaminación del río, entre las cuales se destaca el vertimiento de aguas residuales urbanas. En la actualidad, el río no cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales, que trate, por ejemplo, los diez puntos de vertimiento directo que San Gil le deposita. No obstante, a partir de las investigaciones adelantadas por UNISANGIL, una alternativa emergente y factible para el tratamiento de estas aguas residuales es su procesamiento a partir de la tecnología de cavitación hidrodinámica, que al ser una técnica física posee la ventaja de no generar residuales eventualmente peligrosos, como puede ocurrir en los tratamientos basados exclusivamente en procesos químicos (Von Gunten, 2018), (Vizioli & Montagner, 2023), y quizá, resultar energética y estructuralmente más viable que otros métodos físicos (como el tratamiento con radiación ultravioleta) .

Experimento en Laboratorio

En un primer estudio, muestras de aguas residuales depositadas sobre el río fueron recolectadas directamente del vertimiento ubicado en predios de la Empresa Electrificadora de Santander, ESSA, en el barrio El Porvenir del Municipio de San Gil, para su posterior tratamiento en un sistema prototipo para la reducción de microorganismos en aguas por cavitación hidrodinámica. Las aguas recolectadas fueron caracterizadas en el laboratorio de aguas de UNISANGIL, antes de ser procesadas, tanto en aspectos orgánicos como microbiológicos, según se detalla en la siguiente tabla (ver Tabla 6).

[5] La página de los Parques Nacionales Naturales de Colombia describe las características de este parque en el siguiente enlace: https://www.parquesnacionales.gov.co/nuestros-parques/sff-guanenta-alto-rio-fonce/

Tabla 6. Caracterización Orgánica y Microbiológica Muestras de Agua Residual Urbana Vertida al Río Fonce. Fuente: Los Autores.

Parámetro	Valor Medido
DQO (mgO_2/L)	850
DBO_5 (mgO_2/L)	373
SST (mg/L)	905
SS (mg/L)	338
SSD (ml/L)	5.2
Conductividad (S/m)	1169
Turbiedad (NTU)	377
pH	7.68
T (°C)	28.4
Coliformes Totales (UFC/100ml)	1.890.000
E. coli (UFC/100ml)	4.880.000
Mesófilos (UFC/100ml)	6.780.000

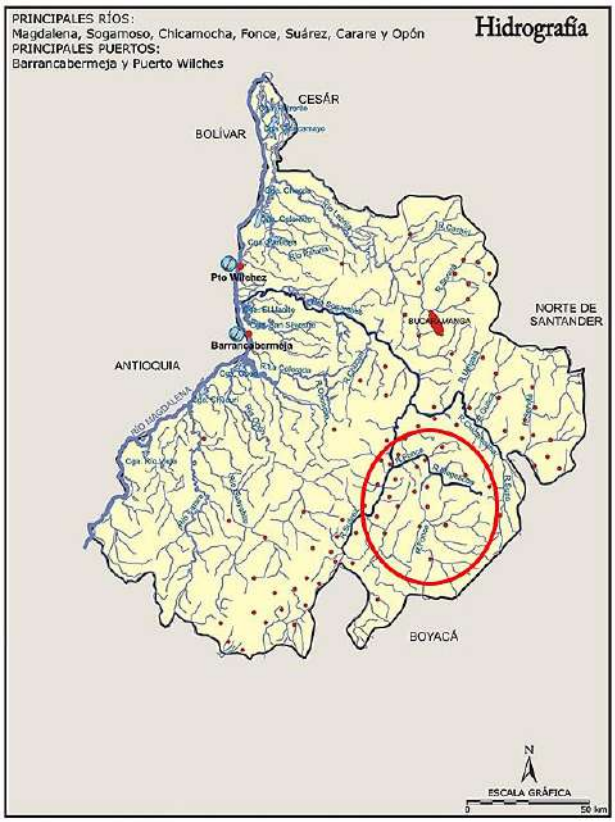


Figura 36. Hidrografía del departamento de Santander, Colombia. Fuente: Sociedad Geográfica de Colombia.

Los parámetros de la Tabla 6 corresponden a:

- Demanda química de oxígeno (DQO), que indica la cantidad total de oxígeno necesario para oxidar toda la materia orgánica presente en una muestra de agua, tanto biodegradable como no biodegradable. La DQO es un indicativo de la cantidad total de contaminantes orgánicos presentes en el agua. Un mayor DQO indica una mayor contaminación del agua.

- Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO_5**)**, que indica la cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos (bacterias, principalmente) para descomponer la materia orgánica biodegradable presente en una muestra de agua durante un período de 5 días. Dicho de otro modo, la DBO_5 da una idea de la cantidad de alimento orgánico disponible para los microorganismos y, por tanto, de la contaminación orgánica del agua. Un mayor DBO_5 implica una mayor contaminación del agua.

- Sólidos Suspendidos Totales (SST). Mide la cantidad de material sólido (partículas, sedimentos) que está en suspensión en el agua. Estos sólidos, que pueden ser de origen orgánico o inorgánico, están suspendidos en una muestra de agua y son retenidos por un filtro de tamaño de poro específico (generalmente 2 micrómetros). Los SST pueden afectar la turbidez del agua, su aspecto y su capacidad para transmitir la luz.

- Sólidos Suspendidos (SS), término más general que incluye a los SST, y que se refiere a cualquier sólido presente en el agua, sin una especificación de tamaño o tipo de partícula.

- Sólidos Sedimentables (SSD**).** Son aquellos que se depositan en el fondo de un recipiente después de un tiempo determinado, que generalmente corresponde a una hora. Miden la cantidad de material sólido más pesado que se encuentra en suspensión en el agua.

- Unidades Formadoras de Colonias (UFC), hace referencia a una medida microbiológica para cuantificar el número de microorganismos viables presentes en una muestra, para lo cual se toma una muestra de agua, se cultiva en un medio específico para tal fin y posteriormente se cuentan las colonias de microorganismos que crecen en un plazo determinado. Cada colonia se considera que proviene de un único microrganismo original.

- Turbidez. Es una medida de la claridad del agua, y por tanto de la cantidad de material particulado en suspensión que hace que el agua pierda transparencia. Su medida se indica en unidades nefelométricas de turbidez (NTU). Un nefelómetro es un instrumento que mide la luz dispersada por las partículas en suspensión. Una mayor turbidez afecta la penetración de la luz en el agua, lo que a su vez afecta la vida acuática, la eficacia de los tratamientos de desinfección, y el aspecto del agua.

- Conductividad eléctrica de una solución, que es una medida de su capacidad para conducir corriente eléctrica. En el caso del agua, la conductividad está relacionada con la presencia de iones disueltos (sales minerales, ácidos, bases). Se mide en Siemens por metro (S/m) y proporciona una indicación de la concentración total de sales disueltas en el agua, lo cual implica un riesgo para el consumo. La conductividad es, por tanto, un indicador de la mineralización del agua. Aguas con alta conductividad pueden ser también más corrosivas para las infraestructuras.

Para el experimento se procesó un volumen de 200 litros de agua, en el que por cada 15 litros de agua no residual, se añadió un litro de agua residual doméstica, de modo que en total 12.5 litros de agua residual doméstica proveniente del vertimiento fue diluida en el tanque. Se ensayaron tres recirculaciones del agua por el sistema (n_p): de un paso, de diez y de 20, con un flujo de 6.25 L/s, de modo que cada recirculación demoró alrededor de 32s. Para cada n_p se efectuaron tres ensayos. El reactor empleado para este ensayo fue de tipo Venturi, con un σ_v obtenido en simulación de 0.07, y real calculado en 0.56.

Luego del tratamiento, y para cada tipo de recirculación, se realizó un análisis microbiológico a muestras del agua tratada, para contar las UFC correspondientes a coliformes totales (bacterias gramnegativas, no formadoras de esporas) y coliformes totales (Escherichia coli, *E. coli*), siguiendo el método de filtración de membrana. Las pruebas realizadas se filtraron sobre una membrana y se cultivaron en agar de cromo cultivo durante 24 horas a 36,5°C, con volúmenes de filtrado para tubos seriados de 9ml con diluciones de 10^{-4} y 10^{-5}, siguiendo las indicaciones de los estándares establecidos para tal fin por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), y el estándar SM 9222 J (Detección simultánea de coliformes totales y *E. Coli* mediante el procedimiento de filtro de membrana cromógeno dual). La Figura 37 presenta los resultados de los promedios de los tres ensayos para cada paso de la tasa de reducción microbiana, y la Figura 38 los resultados promedio de la reducción logarítmica, para los coliformes totales.

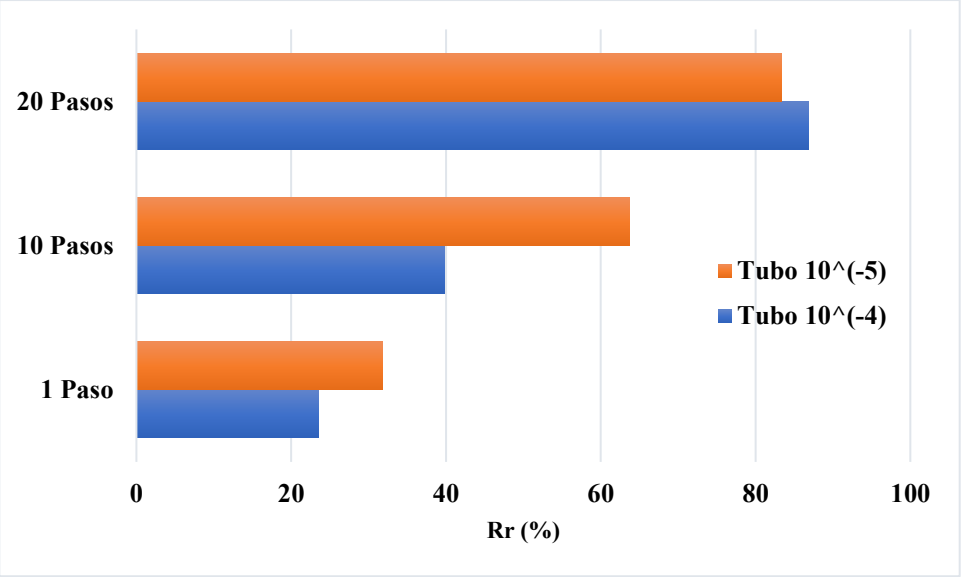


Figura 37. Resultados Rr de Coliformes Totales con HC en muestras de aguas residuales del río Fonce. Fuente: Los Autores

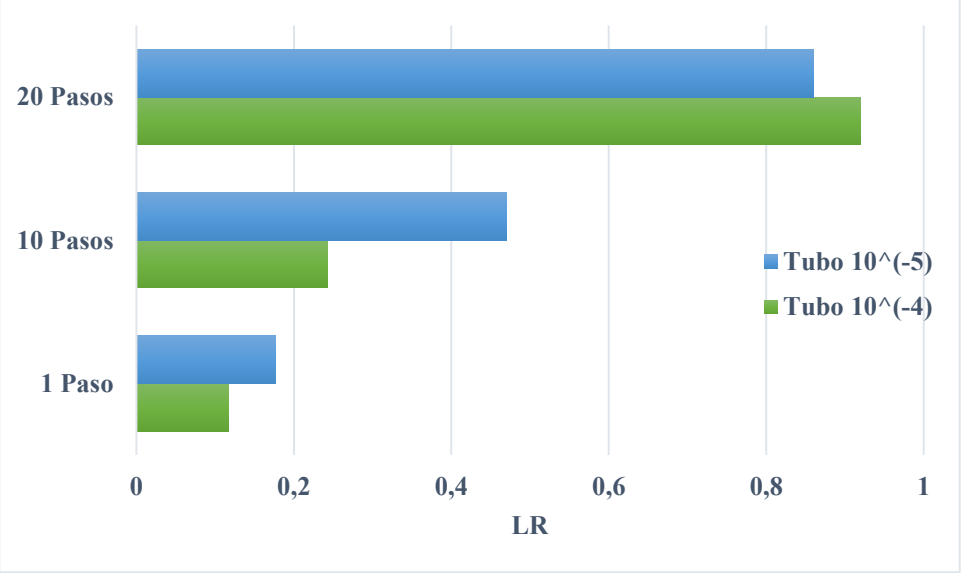


Figura 38. Resultados LR de Coliformes Totales con HC en muestras de aguas residuales del río Fonce. Fuente: Los Autores

Las Figuras 39 y 40, por su parte, muestran los resultados para *E. coli*, de los promedios de los tres ensayos para cada paso de la tasa de reducción microbiana, y de la reducción logarítmica.

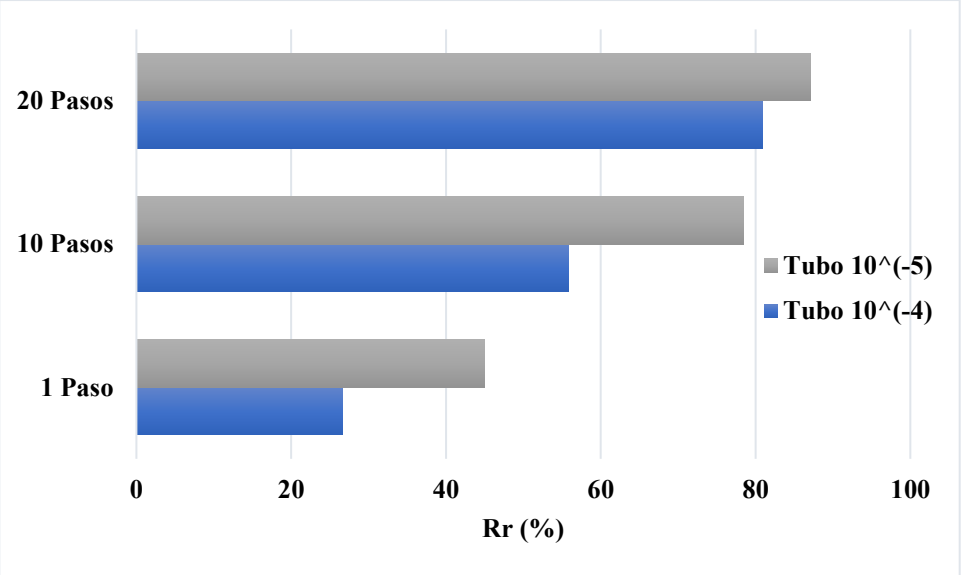


Figura 39. Resultados Rr de *E. coli* con HC en muestras de aguas residuales del río Fonce. Fuente: Los Autores

El uso de diluciones se hace necesario para poder contar las colonias de microorganismos presentes en las muestras. La técnica consiste en tomar una muestra original del agua residual procesada, en este caso con HC, y diluirla en determinado factor, de modo que de esa "siembra" de pequeñas cantidades de microorganismos se obtengan placas de Petri con un número de colonias que sea contable. Una dilución de 10^{-4} significa que la muestra a analizar se ha diluido 10000 veces. Esto se puede lograr tomando primero 1mL del agua a analizar y diluyéndolo en 99mL de agua destilada, lo cual sería una dilución de 10^{-2}, es decir una dilución de 100 veces, para luego, de esta dilución, tomar nuevamente 1 ml de agua a analizar y volverlo a diluir en 99mL de agua destilada, lo cual sería una nueva dilución de 10^{-2}. Así, dos diluciones consecutivas 10^{-2}, implican una dilución 10^{-4} (dado que 10^{-2} x 10^{-2} es igual a 10^{-4}). Una dilución 10^{-5} significa, por tanto, que la muestra se ha diluido 100000 veces, lo cual podría lograrse realizando primero una dilución 10^{-2}, seguida de una dilución 10^{-3} (1mL de muestra diluido en 999mL de agua destilada). Luego de la siembra y la incubación, las colonias de bacterias son contadas, y el resultado se multiplica por el factor de dilución para obtener el número de UFC por milímetro de la muestra original (es decir, de la muestra sin diluir).

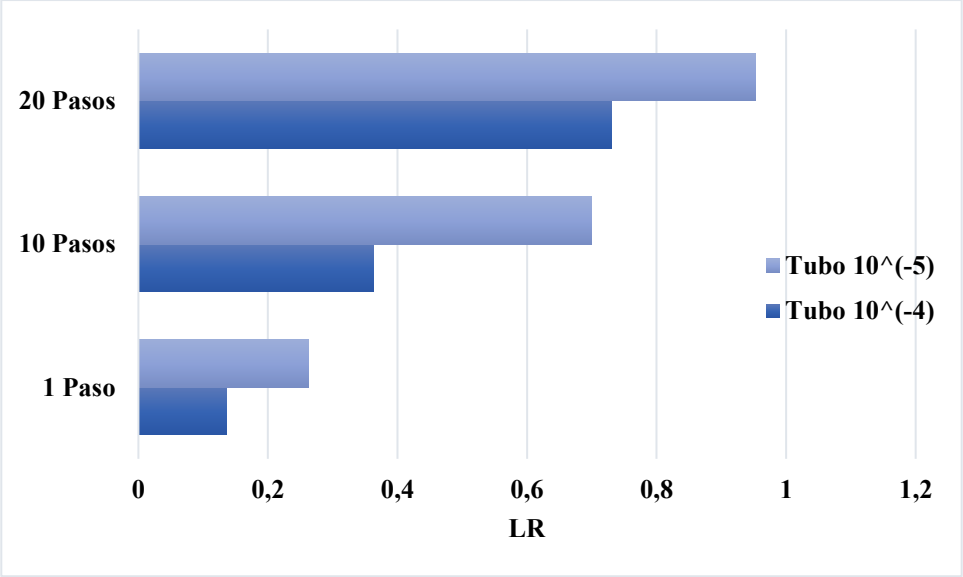


Figura 40. Resultados LR de *E. coli* con HC en muestras de aguas residuales del río Fonce. Fuente: Los Autores

En general, se aprecia que en diluciones 10^{-5} se obtuvieron mejores resultados que en diluciones 10^{-4}, excepto para los Coliformes Totales en los ensayos con 20 recirculaciones. Así mismo, es evidente que el aumento del número de recirculaciones del agua a tratar por el sistema de HC, mejora sensiblemente los resultados, vistos tanto como tasa de reducción microbiana y como reducción logarítmica. Estos valores son aproximadamente cuatro veces superiores comparados con los ensayos de reducción de microorganismos realizados con una sola recirculación. Es destacable también, que, para la carga microbiana presente en las muestras originales sin procesar, la cual fue cuantificada en 4.88×10^6 UFC, el sistema muestra siempre reducciones superiores al 20%, incluso para una sola recirculación del agua por el reactor.

Otro importante análisis es el referido al consumo energético del sistema, con relación a las colonias de microorganismos muertas. Así, los KFU/J hacen referencia a las UFC muertas por julio de energía. La Ecuación 17, permite calcular las KFU/J, a partir del conocimiento de las unidades formadoras de colonias iniciales por cada 100mL (CFU_{100mL}), de los litros de agua residual doméstica procesada (L_{udw}), del porcentaje de reducción de microorganismos promedio obtenida en una sola recirculación (Rr_{avg}), y de los Julios consumidos (J_c). La ecuación se multiplica por 10 para realizar un ajuste dimensional, de modo que las dimensiones finales sean, en efecto, unidades formadoras de colonias muertas por Julio:

$$10x\frac{\left[\frac{CFU}{0.1L}\right][L]\left[\frac{Rr_{avg}}{100}\right]}{[J]} = \frac{KFU}{J}$$

$$\frac{KFU}{J} = \frac{10 * CFU_{100mL} * L_{udw} * Rr_{avg}}{J_c} \quad (17)$$

Para un experimento como el previamente descrito, los J_c pueden calcularse teniendo en cuenta los datos de la operación eléctrica de la bomba. Para el caso en cuestión, la bomba funcionó en modo trifásico, con un voltaje de línea de 220 V*rms*, una corriente de 11 A*rms*, y un factor de potencia, f_p, de 0.89, por lo que la potencia eléctrica consumida fue de 3730.4 W ($W = \sqrt{3}(f_p)(Vrms)(Irms)$). Ahora bien, un flujo de 6.25 L/s desocupa un tanque de 200L en 32 segundos, por lo que la energía consumida, definida como potencia por tiempo ($J_c = Wt$) (J_C) puede estimarse en 119.375,7 J. La Tabla 7 sintetiza los valores considerados en el experimento para el cálculo de las KFU/J.

Tabla 7. Parámetros para el Cálculo de las KFU/J. Fuente: Los Autores

Parámetro	**Valor**
CFU_{100mL}	4.88x10^6
L_{udw} (L)	200
Rr_{avg} (%)	35.77
V*rms* (V)	220
I*rms* (A)	11
f_p	0.89
W	3730.49
Flujo (L/s)	6.25
Volumen Tanque (L)	200
Tiempo vaciado (s)	32
J_c	119375.71
KFU/J	**2924,51**

Estas KFU/J son mayores que las reportadas por (Kumar & Pandit, 2013), que especifican un valor de 1038 KFU/J para un sistema de desinfección solamente por medio cavitación hidrodinámica (sin complemento de tratamientos químicos), a partir de un reactor diseñado con una placa con orificios. Estos resultados son coherentes con las referencias citadas en el capítulo uno, las cuales resaltan la viabilidad de la HC en términos de consumo energético, para un sistema proyectado a nivel industrial.

Experimento in situ en un vertimiento en tiempo real

Luego del ensayo realizado con muestras del vertimiento sobre el río Fonce, ubicado según se ha comentado, en el barrio El Porvenir en terrenos de la Electrificadora de Santander ESSA, el Departamento de Investigación de UNISANGIL proyectó el montaje de un sistema piloto para reducción de microorganismos in situ, para capturar y procesar las aguas vertidas sobre el río en el vertedero antes mencionado. Para esto, una cabina (ver Figura 41) dotada con todos los elementos requeridos para adelantar el proceso de reducción, fue instalada en el lugar del vertimiento, y acondicionada a un tanque de recepción de aguas residuales con capacidad de 1800L. Para este sistema, se organizaron pruebas de HC en tiempo real, realizando un solo paso del agua por el sistema. La restricción de no recirculación obedeció a las características propias de la prueba, dado que este primer piloto experimental no contó con un sistema de depósito que posibilitase la recirculación del flujo de agua a tratar. El experimento, al momento de ser realizado (finales del 2023 y comienzos del año 2024), destaca un trabajo pionero en el mundo en el tratamiento directo de aguas residuales urbanas vertidas sobre un río.

Así, las condiciones del experimento obedecieron a las siguientes características:

- Ensayo con tres tipos diferentes de reactores de cavitación: reactor tipo aleta con una sola aleta (CAV-A, $\sigma_v = 0.3132$), reactor tipo aleta con doble aleta (CAV-2A, $\sigma_v = 1.4317$), y reactor tipo Venturi (CAV-V, $\sigma_v = 0.5639$). Todos los reactores fueron diseñados y analizados con CFD por el equipo de investigación. Los cálculos de σ_v fueron obtenidos a partir de las pruebas reales. La Figura 42 muestra detalles del diseño de los reactores empleados.

- Cuatro grupos de microorganismos analizados: Coliformes Totales, *E. coli*, Aerobios Mesófilos, y Mohos – Levaduras.

- Tres pruebas de HC para cada reactor.

- Las pruebas fueron realizadas en periodos secos de no lluvia, para evitar la mezcla de las aguas lluvias con las aguas residuales, y tomadas en diferentes días de manera aleatoria.

- En cada prueba, se tomaron muestras antes y después del proceso de cavitación, las cuales fueron refrigeradas y transportadas al laboratorio de aguas de UNISANGIL, donde se realizaron los análisis fisicoquímicos y microbiológicos respectivos.

Figura 41. Foto cabina con sistema HC para procesamiento in situ de aguas residuales vertidas al río Fonce. Fuente: Los Autores.

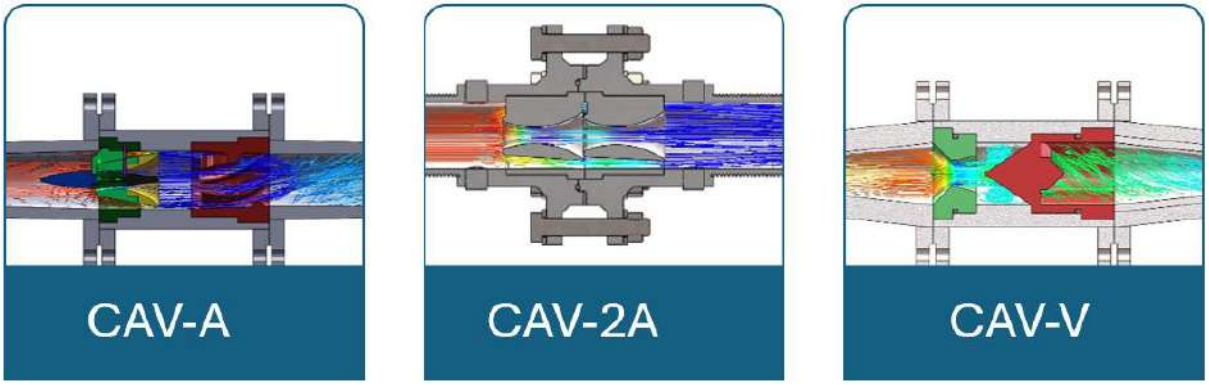


Figura 42. Detalle reactores de cavitación experimentados en proceso de reducción de microorganismos in situ. Fuente: Los Autores.

Por las características propias del experimento (HC in situ, en tiempo real), las variaciones de los resultados fueron altas de prueba a prueba. No obstante, fue posible identificar tendencias de operación, la principal, que el mejor desempeño se logró con el reactor tipo Venturi, aunque estadísticamente, al realizar una prueba Kruskal-Wallis, no se encontraron diferencias entre la operación de los tres reactores. La prueba Kruskal-Wallis es una prueba no paramétrica que permite determinar diferencias estadísticas entre dos eventos cuando se posee un número limitado de datos, siempre y cuando estos eventos sean independientes, tal como es el caso de los ensayos realizados con cada reactor. Esta no diferencia estadística entre los reactores, puede entenderse

como una tendencia de respuesta similar ante las variaciones de concentración inicial de microorganismos que ocurren entre una prueba y otra, dada la característica de reducción de microorganismos in situ del experimento, lo cual no implica, según se ha explicado, que uno de los reactores se desempeñe mejor que los otros.

La Tabla 8 muestra las presiones de entrada y de salida para las tres pruebas realizadas, y obtenidas para el reactor Venturi, así como el detalle del caudal de operación y de las concentraciones iniciales de microorganismos encontradas en laboratorio. Por su parte, las Figuras 43 y 44, muestran los resultados del proceso con HC, expresados como tasa de reducción y como reducción logarítmica, para los cuatro tipos de microorganismos estudiados. Los análisis se hicieron por triplicado para diluciones 10^{-3}, 10^{-6}, 10^{-9} y se determinaron las CFU por cada 100mL, reportándose los resultados de la dilución óptima para conteo, procedimiento igual al que se siguió para los otros experimentos.

Tabla 8. Presiones, Caudal y Concentraciones Reactor Venturi - Proceso de HC in situ

Parámetros	**TEST 1**	**TEST 2**	**TEST 3**
Presión de entrada (psi)	75	46	26
Presión de salida (psi)	11,6	6,6	4,2
Caudal de operación (L/s)	11,29	12,5	12,5
Concentración inicial			
Parámetros	**TEST 1**	**TEST 2**	**TEST 3**
E. coli	$6{,}33\text{x}10^{7}$	$5{,}66\text{x}10^{7}$	$1{,}30\text{x}10^{8}$
Coliformes Totales	$8{,}0\text{x}10^{7}$	$1{,}06\text{x}10^{8}$	$2{,}16\text{x}10^{8}$
Aerobios Mesófilos	$1{,}06\text{x}10^{1}$	$7{,}0\text{x}10^{7}$	$1{,}96\text{x}10^{8}$
Mohos y Levaduras	$6{,}33\text{x}10^{5}$	$2{,}60\text{x}10^{4}$	$3{,}30\text{x}10^{4}$

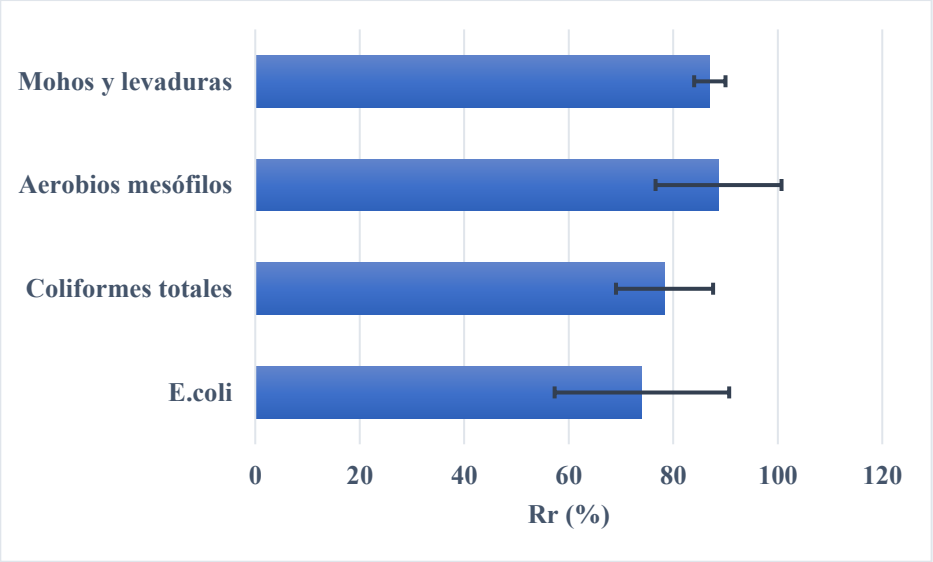


Figura 43. Resultados Promedio Rr (%) Reactor Venturi – Reducción microbiana in situ de un solo paso. Fuente: Los Autores.

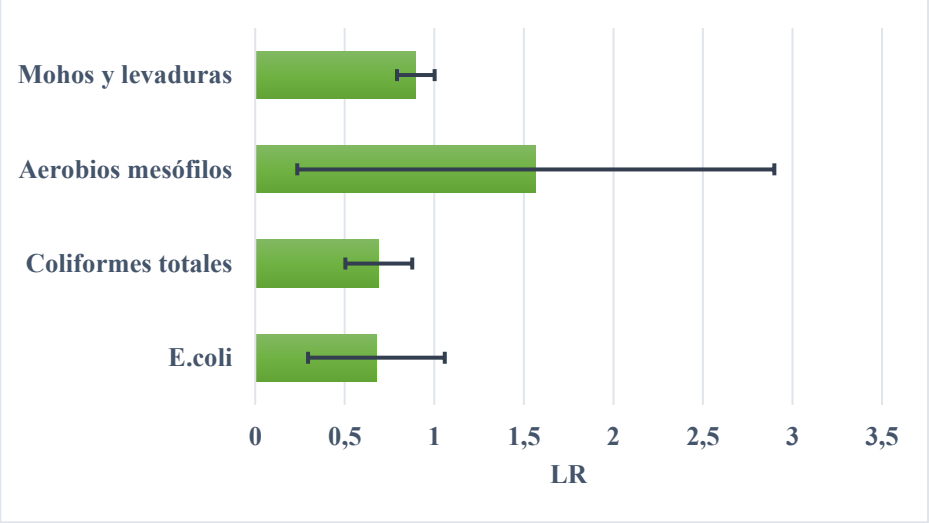


Figura 44. Resultados Promedio LR Reactor Venturi – Reducción microbiana in situ de un solo paso. Fuente: Los Autores.

Es evidente que las altas variaciones de concentración de microorganismos que se encontraron en las diferentes pruebas realizadas influyeron directamente en los resultados, causando variaciones porcentuales mayores al 10%, por ejemplo, en las tasas de reducción de microorganismos. Sin embargo, es muy significativo que se hayan logrado porcentajes de reducción de microorganismos superiores al 70% en un ensayo realizado in situ y en tiempo real, y que hubiese pruebas con valores de reducción logarítmica superiores a 1, como fue el caso para las representativas bacterias *E. coli.* De hecho, en una de las pruebas, según se infiere de las figuras anteriores, los Aerobios Mesófilos fueron totalmente removidos. Un análisis similar de las UFC

reducidas por julio al realizado en el apartado anterior, considerando el mayor número de *E. coli* halladas en el conteo inicial de UFC, y la tasa de reducción promedio para los tres ensayos realizados, muestra también un dato importante: **322343713.56 KFU/J.** Estos resultados indican claramente que la HC es una tecnología viable para el tratamiento in situ de aguas residuales urbanas, que podría ser potenciado a través de la combinación con otras técnicas de desinfección y con eventuales sistemas que contemplasen recirculación de las aguas a tratar.

La siguiente tabla muestra un comparativo de los resultados obtenidos por UNISANGIL, respecto a otros trabajos similares en el mundo.

Tabla 9. Comparativo Entre Resultados de Tratamiento de Aguas Residuales por HC Obtenidos por UNISANGIL y por Otros Trabajos Similares. Fuente: Los Autores.

Autor	**Ambiente**	**Microorg. Reducidos**	**Orden C_0 (CFU/mL)**	**Max. Rr (%) LR**	**Reactor/ Vol (L)**	**Tiempo Recir. (min)**
UNISANGIL	Natural: Vertimiento Directo sobre un río.	*E. coli* Coliformes Totales	10^7	Rr:92 LR:1.11 Rr:86 LR:0.86	Venturi 1800	Direct. Sin recircul.
UNISANGIL	Lab. Muestras de aguas vertidas sobre un río.	*E. coli* Coliformes Totales	10^7	Rr: 95.2 LR:1.31 Rr: 93.4 LR:1.18	Venturi 200	10.6
(Mane et al., 2020)	Lab.	*E. coli* S. aureus	10^4	Rr:100 LR: Nr Rr: 90 LR: Nr	Diodo Vórtice y Aceites Naturales 20	90 60
(Sun et al., 2021)	Lab.	*E. coli*	10^6	Rr: 100 LR: 6.57	Rotativo 15	4
(Zezulka et al., 2020)	Lab. Muestras de agua de un lago	Cianobacteria	Nr	Inhibi-ción: 60	Indirecto: Chorro de Agua y H_2O_2 10	120
(Patil et al., 2023)	Lab. Muestras de agua de un lago	No se especifica	Nr	Rr: 95 LR: Nr	Orificio 5	60

HC en el Manejo de Lixiviados

Los lixiviados son líquidos residuales contaminantes, que se generan por la descomposición de materia orgánica y la interacción de esta materia descompuesta con el agua. Los desechos orgánicos pueden absorber, por ejemplo, las aguas lluvias, y en su proceso de descomposición liberan sustancias químicas y biológicas que se disuelven en el agua, contaminándola. Estos líquidos tóxicos se filtran en los vertederos de desechos por percolación, es decir, por su difusión a través de un medio poroso.

Existe por tanto una relación directa entre los lixiviados y los rellenos sanitarios, que son instalaciones diseñadas para recibir, operar, confinar y cubrir los residuos sólidos urbanos. En los rellenos sanitarios se depositan y acumulan un número significativo de desechos orgánicos, que son un medio idóneo para la proliferación de microorganismos anaerobios (aquellos que pueden sobrevivir en ambientes sin oxígeno), los cuales descomponen la materia orgánica, propiciando la formación de lixiviados.

Por su origen, los lixiviados pueden contener:

- Contaminantes orgánicos: amoniaco, nitratos, metano, dióxido de carbono, entre otros.
- Contaminantes inorgánicos: metales pesados como plomo o mercurio, sales minerales, entre otros.
- Contaminantes biológicos: bacterias y virus.

Un manejo inadecuado de los lixiviados puede ocasionar que estos líquidos se infiltren en el suelo y contaminen cuerpos de agua superficiales y subterráneos, con la consecuente afectación de la flora, la fauna, y las poblaciones humanas que puedan estar en relación con dichas fuentes de agua. De igual manera, los lixiviados pueden ocasionar la degradación del suelo, contaminándolo y aumentando su acidez, lo cual puede, a su vez, reducir la capacidad de estos para retener agua. Los líquidos lixiviados, al provenir de la descomposición de materia orgánica son también una posible fuente de metano, uno de los gases de invernadero de mayor impacto.

Los lixiviados se pueden clasificar atendiendo a la edad del relleno sanitario que los genera, en:

- Lixiviados jóvenes, rellenos menores de cinco años.
- Lixiviados intermedios, rellenos entre cinco y diez años, y
- Lixiviados maduros, rellenos de más de diez años.

Tratar adecuadamente los lixiviados es un reto ambiental muy importante, que implica el diseño y la implementación de sistemas de recolección para evitar que los líquidos contaminantes se dispersen, y, además, para facilitar su tratamiento, mismo que puede abordarse por medios

biológicos (Smaoui et al., 2020), químicos (Zaki & Zaher, 2022), físicos o fisicoquímicos (Jaradat et al., 2022), (Guvenc et al., 2023). En este sentido, una alternativa interesante para el tratamiento de lixiviados es el uso de cavitación hidrodinámica, con sus ventajas ya mencionadas de escalabilidad y no generación de residuos químicos peligrosos. La HC en el manejo de lixiviados ha sido explorada por diversos autores como (L. F. Gutiérrez-Mosquera et al., 2022), (Bis et al., 2015), (Qiao et al., 2023), (de Melo Franco Domingos et al., 2023), entre otros.

Para el experimento de tratamiento y desinfección de lixiviados con HC, UNISANGIL tomó muestras del relleno sanitario El Cucharo, ubicado en la zona rural del mismo nombre, en el municipio de San Gil, Colombia. El relleno es administrado por la empresa de acueducto y alcantarillado del municipio, ACUASAN. Las muestras se obtuvieron de una piscina que trabaja por recirculación y evaporación, y es alimentada por una celda de relleno sanitario joven (menor de cinco años), con capacidad para manejar un volumen de 45000m^3 de material inerte.

Cuatro pruebas de procesamiento de muestras de lixiviados con un volumen de 270L fueron llevadas a cabo. Las muestras fueron obtenidas del relleno sanitario, y transportadas en tanques esterilizados a UNISANGIL en un tiempo menor a 30 minutos, para reducir al mínimo el riesgo de alteración de la muestra. Siguiendo los estándares establecidos para tal fin (ISO 9308-1 y, el "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" de la American Public Health Association, APHA), los análisis fisicoquímicos y microbiológicos fueron realizados antes de la cavitación, a los 30 minutos de cavitación, y a los 60 minutos, esta última por duplicado. El reactor empleado para la cavitación fue uno de tipo aleta (diseño original de UNISANGIL), con $\sigma_v = 0.17$ en simulación, y $\sigma_v = 0.31$ a partir de las medidas in situ. Los mejores resultados se obtuvieron para una cavitación con recirculación de 60 minutos, y con un flujo circulante de 10.11L/s. La Tabla 10 muestra las presiones de entrada y de salida para las cuatro pruebas realizadas con recirculación de 60 minutos, así como el detalle del caudal de operación y de las concentraciones iniciales de microorganismos encontradas en laboratorio.

Tabla 10. Presiones de Entrada – Salida y Concentración Inicial de Microorganismos en el Procesamiento de Lixiviados.

Parámetros	**TEST 1**	**TEST 2**	**TEST 3**	**TEST 4**
Presión de entrada (psi)	84.00	82.00	81.00	66.00
Presión de salida (psi)	15.28	19.11	14.70	11.90
Concentración inicial				
Parámetros	**TEST 1**	**TEST 2**	**TEST 3**	**TEST 4**
E. coli	93 x 10^4	3.3 x 10^4	71.6 x 10^4	11.3 x 10^4
Coliformes Totales	18.2 x 10^8	21.86 x 10^5	16 x 10^8	98.3 x 10^4
Aerobios Mesófilos	13.53 x 10^5	10.1 x 10^5	43 x 10^7	11.6 x 10^5
Mohos y Levaduras	43.3 x 10^3	10 x 10^4	43.3 x 10^3	43.3 x 10^3

La Tabla 11, por su parte, muestra el comparativo de los resultados de los análisis fisicoquímicos antes y después del procesamiento con HC de 60 minutos, mientras que las Figuras 45 y 46 muestran los resultados promedio de las tasas de reducción de microorganismos y la reducción logarítmica asociada.

Tabla 11. Resultados Fisicoquímicos Tratamiento Lixiviados con HC

Parámetros	Valor Inicial	Reducción (%) a los 60 minutos
DBO_5 (mgO_2/L)	241	12.12%
DQO (mgO_2/L)	6141	11.39%
SS (mg/L)	14534.75	8.99%
SSD (ml/ L)	0.62	100%
SST (mg/L)	219.25	23.88%

Para el análisis de UFC reducidas por julio (KFU/J), se tuvo en cuenta el mayor número de *E. coli* iniciales (93 x 10^4) y la tasa de reducción promedio calculada (95.33), para un tiempo de operación de 3600 segundos (una hora), lo cual dio como resultado **17824,11 KFU/J**. Este resultado, junto con el de los análisis fisicoquímicos y de reducción microbiana, validan el uso de la HC como tecnología viable para el tratamiento y reducción de microorganismos en lixiviados, susceptible de ser implementada en entornos reales de operación.

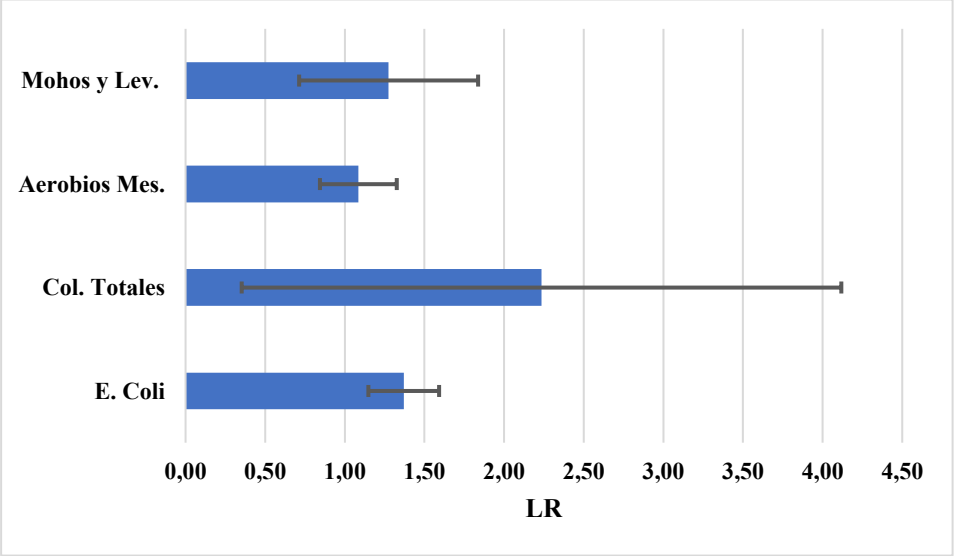


Figura 45. Reducción Logarítmica promedio para reducción microbiana con HC en lixiviados. Fuente: Los Autores.

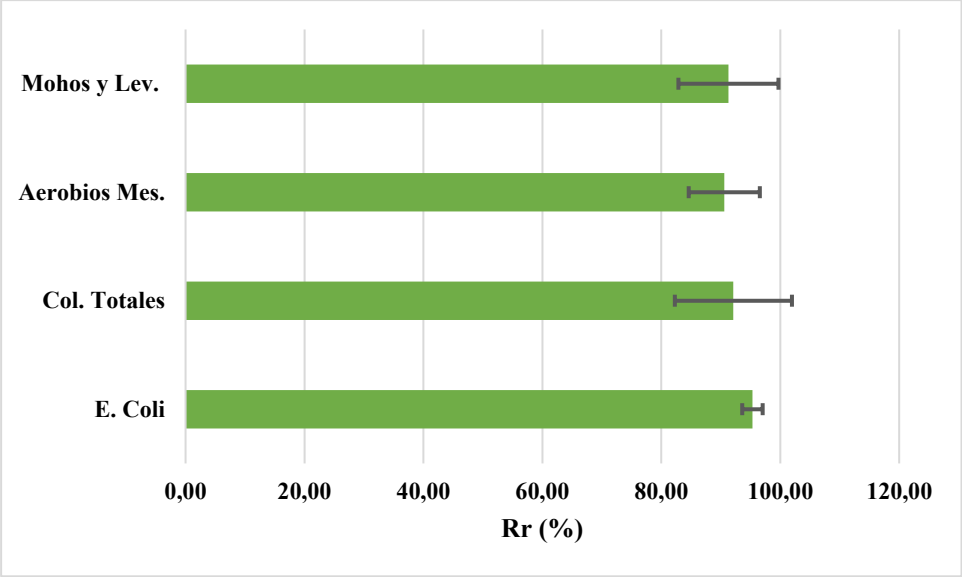


Figura 46. Porcentaje de reducción de microorganismos con HC en lixiviados. Fuente: Los Autores.

HC en el Manejo de Aguas Residuales en una Planta de Beneficio Animal

Una planta de beneficio animal es una instalación agroindustrial en la que se sacrifican animales para el consumo humano. Su operación conlleva la recepción de los animales, su alistamiento para el sacrificio, el sacrificio propiamente dicho, la extracción de vísceras, lavado, corte, empacado y refrigeración, entre otros aspectos. Por su naturaleza, una planta de beneficio animal genera una gran cantidad de aguas residuales (Dos Santos Pereira et al., 2024), (Lopes et al., 2022), (Elsaidy et al., 2022), de las cuales una mínima parte corresponde a los residuos de agua que se desprenden de las carnes tratadas, y una gran cantidad está asociada a los volúmenes de agua implícitos en el beneficio animal, como por ejemplo el lavado de recipientes, equipos y pisos.

Estas aguas residuales contienen, como consecuencia del proceso que las genera, una alta carga orgánica, así como grasas, solidos en suspensión y agentes patógenos. Son, por ejemplo, un medio proclive al crecimiento exponencial de la *E. coli*, entre otras posibles bacterias (Stošić et al., 2016), (Zarei et al., 2018). El vertimiento sin tratamiento previo de estas aguas contaminadas sobre otras fuentes de agua (ríos o quebradas), ocasiona, además de los olores desagradables propios de la materia en descomposición, la disminución del oxígeno disuelto en la fuente receptora, dado el alto contenido orgánico de los vertimientos, y la proliferación de agentes patógenos. Si estas aguas entran en contacto con fuentes dedicadas al consumo humano, podrían ocasionar serios problemas de salud pública.

Generalmente, el tratamiento de estas aguas alcanza hasta los tratamientos primario (eliminación de sólidos en suspensión grandes y de materia orgánica sedimentable), y secundario (eliminación de materia orgánica disuelta y en suspensión no removida en el tratamiento primario). Sin embargo, por sus características, un tratamiento terciario es altamente recomendable. El tratamiento terciario de aguas residuales busca reducir o eliminar nutrientes (como nitrógeno y fósforo), patógenos (como bacterias y virus) y otros contaminantes específicos, con el fin de generar un vertimiento con la calidad necesaria para no afectar las fuentes receptoras, especialmente cuando estas son empleadas para consumo humano, animal y/o producción agrícola.

Precisamente para este tratamiento terciario, UNISANGIL planteó un experimento aplicado a las aguas residuales producidas en la planta de beneficio animal del municipio de Villanueva, Santander, Colombia, una planta que genera alrededor de 39000 litros de agua residual por semana, los cuales son usados en el proceso de sacrificio de cerca de 260 bovinos. Para esto, muestras de 270 litros fueron procesados en el sistema prototipo de HC diseñado e implementado por UNISANGIL, con un reactor tipo aleta como el ensayado en el tratamiento de lixiviados, en ciclos de 30 y 60 minutos, lográndose los mejores resultados para el procesamiento de una hora. El flujo promedio en el procesamiento fue de 5.65L/s.

La Tabla 12 presenta las presiones de entrada y de salida para las cinco pruebas realizadas con recirculación de 60 minutos, así como el detalle del caudal de operación y de las concentraciones iniciales de microorganismos encontradas en laboratorio. Por su parte, las Figuras 47 y 48 muestran los resultados promedio de las tasas de reducción de microorganismos y la reducción logarítmica asociada.

Tabla 12. Presiones de Entrada – Salida y Concentración Inicial de Microorganismos en el Procesamiento de Aguas Residuales de Una Planta de Beneficio Animal. Fuente: Los Autores.

Parámetros	**TEST 1**	**TEST 2**	**TEST 3**	**TEST 4**
Presión de entrada (psi)	96.67	96.5	99.0	99.0
Presión de salida (psi)	7.73	7.6	7.15	7.1
Parámetros	**TEST 1**	**TEST 2**	**TEST 3**	**TEST 4**
E. coli	$1.23x10^8$	$8.22x10^7$	$1x10^7$	$1.5x10^7$
Coliformes Totales	$1.23x10^8$	$8.22x10^7$	$6.67x10^7$	$1x10^7$
Aerobios Mesófilos	$4x10^7$	$2x10^7$	$3.33x10^7$	$6.67x10^7$
Mohos y Levaduras	$1.78x10^4$	$4x10^4$	$6.67x10^4$	$6.67x10^4$

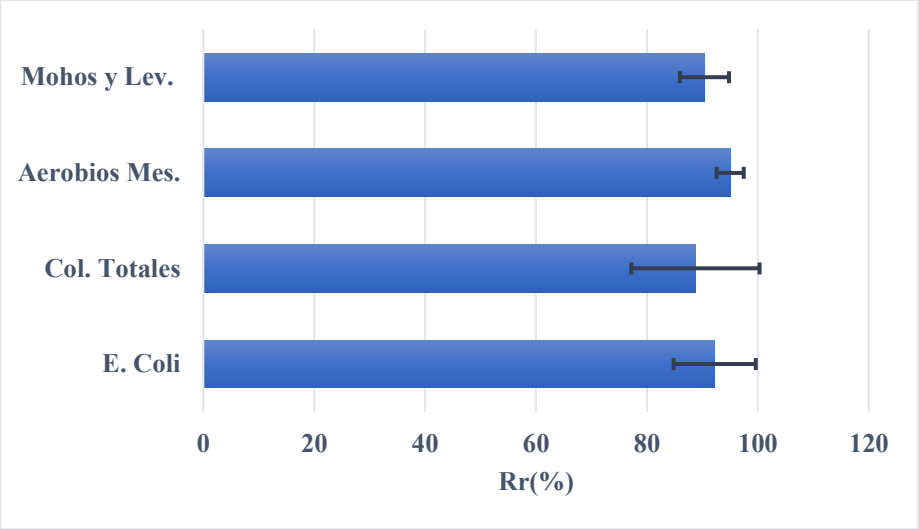


Figura 47. Porcentaje de reducción de microorganismos con HC en aguas residuales de una planta de beneficio animal. Fuente: Los Autores.

En el respectivo análisis de las UFC reducidas por julio (KFU/J), tomando en cuenta el mayor número de *E. coli* iniciales ($1.23x10^8$) y la tasa de reducción promedio (92.21), para un tiempo de operación de 3600 segundos (una hora), se halló una significativa relación de **2280229.27 KFU/J**. Los resultados evidencian, de manera equivalente con los experimentos anteriormente expuestos, la aplicabilidad de la HC para la reducción de microorganismos en las aguas residuales de las plantas de beneficio animal.

A continuación, y como muestra final de los experimentos desarrollados, se exponen los resultados del tratamiento de aguas residuales generadas en el beneficio del café.

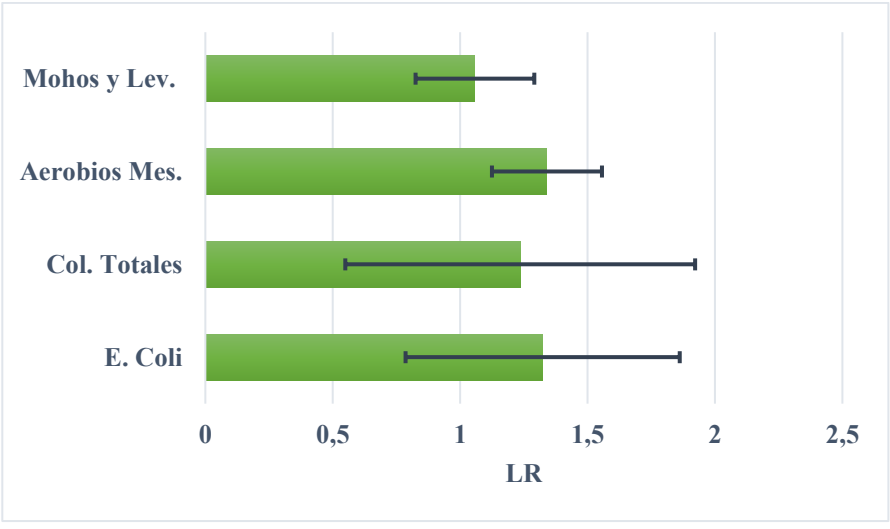


Figura 48. Reducción Logarítmica de microorganismos con HC en aguas residuales de una planta de beneficio animal. Fuente: Los Autores.

HC en el Manejo de Aguas Residuales del Beneficio del Café

El procesamiento de los frutos del café puede realizarse a través de tres métodos, denominados: vía seca, vía semi húmeda y vía húmeda. La vía seca es la que menos agua emplea antes del secado, utilizándola solo en la fase inicial del lavado para la separación de granos defectuosos, verdes y maduros (CWW). En la vía semi húmeda, por su parte, además del lavado inicial de selección, se emplea agua para el despulpado de los frutos (CPW), pasándose luego de ello directamente al secado. En la vía húmeda, luego del despulpe, se procede a una fase de fermentación (CFW) y remoción del mucílago (CMW), las cuales generan también aguas residuales. En países como Colombia, la gran mayoría del proceso de los frutos del café se realiza por vía húmeda, en razón a que dicho método favorece las características de suavidad y aroma del producto final. La siguiente figura (Ver Figura 49), sintetiza los tipos de residuos sólidos y líquidos (aguas residuales) generados durante el procesamiento de los frutos, a través de las tres vías previamente expuestas.

Es la vía húmeda, por tanto, la que genera un mayor volumen de aguas residuales a tratar. Se estima, por ejemplo, que el consumo regular de agua en el procesamiento post cosecha del café, durante la etapa inicial de separación de granos, está entre 0.1 y 0.3 litros por cada 1000 cm^3 de grano a procesar, y entre 3 y 5 litros de agua durante la fase de despulpado, fermentación y remoción del mucilago (Campos et al., 2021). Considerando una densidad aparente de los frutos de 616,5 Kg/m^3 (Montilla-Pérez et al., 2008), esto implica que, para procesar un kilogramo de fruto de café, se podrían emplear entre 5.03 y 8.60 litros de agua. Ahora bien, de un kilogramo de fruto, una vez secado pueden obtenerse 0.56 kilogramos de café seco, asumiendo una humedad inicial del 50% en base húmeda (Álvarez & Roa, 1999), por lo que es posible estimar que para lograr un kilo de café seco podrían llegarse a usar en su procesamiento previo al secado, entre 9 y 15.4 litros de agua, lo cual representa un volumen significativo de aguas residuales a tratar.

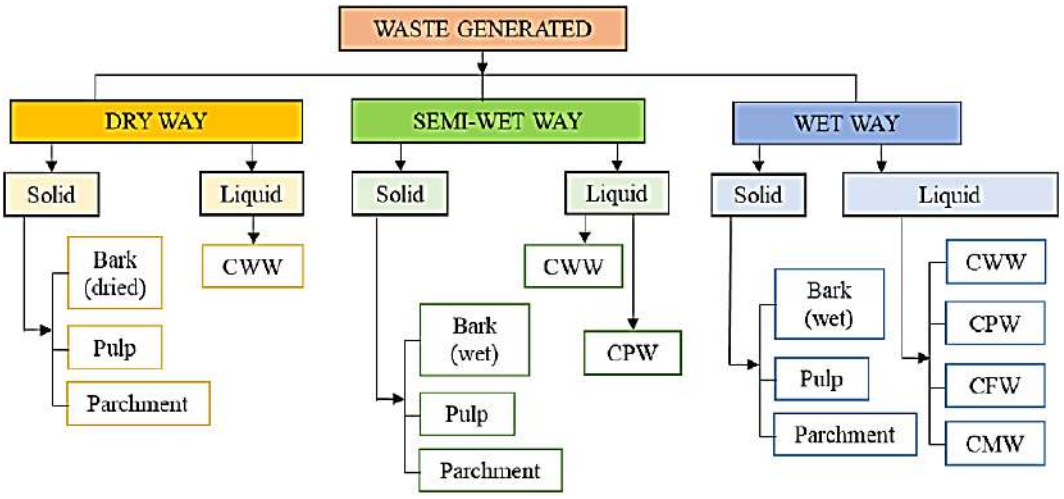


Figura 49. Residuos generados en el proceso del café. Fuente: (Campos et al., 2021)

Aunque existen alternativas tecnológicas que propenden por una reducción significativa de la cantidad de agua empleada en el procesamiento post cosecha del grano (Oliveros et al., 2013), que logran relaciones óptimas de menos de un litro de agua por kilogramo de café pergamino seco, no todos los productores hacen uso de ellas, y aún es necesario garantizar un tratamiento adecuado de estas aguas residuales, las cuales, bien sea por medios tradicionales u optimizados, poseen una alta carga orgánica que debe ser tratada para disminuir su impacto ambiental (Zuluaga-Vasco & Zambrano-Franco, 1993).

El experimento desarrollado hizo uso de muestras de aguas residuales del beneficio del café, provenientes de la finca Villa Delicias del municipio del Páramo Santander, Colombia, con el fin de realizar un análisis microbiológico para la determinación de la concentración de coliformes fecales (*E. coli*), coliformes totales, aerobios mesófilos y mohos y levaduras, antes y después del proceso con HC, empleando para ello el modelo de reactor de una aleta, similar al usado para lixiviados y para las aguas de la planta de beneficio animal.

Los análisis previos por triplicado con diluciones 10^{-3}, 10^{-6}, 10^{-9}, dieron como resultado los siguientes valores iniciales para las UFC/100ml:

- *E. coli*: $36.3x10^{7}$
- Coliformes Totales: $43.6x10^{7}$
- Mohos y Levaduras: $47.3x10^{7}$
- Aerobios Mesófilos: $86.3x10^{7}$

Las siguientes figuras muestras los resultados de la reducción de microorganismos, para experimentos con una sola circulación, y con una recirculación durante 60 minutos con un flujo promedio de 10 L/s, y con muestras de un volumen aproximado de 270 L, para un reactor tipo aleta como el ensayado en las pruebas con lixiviados.

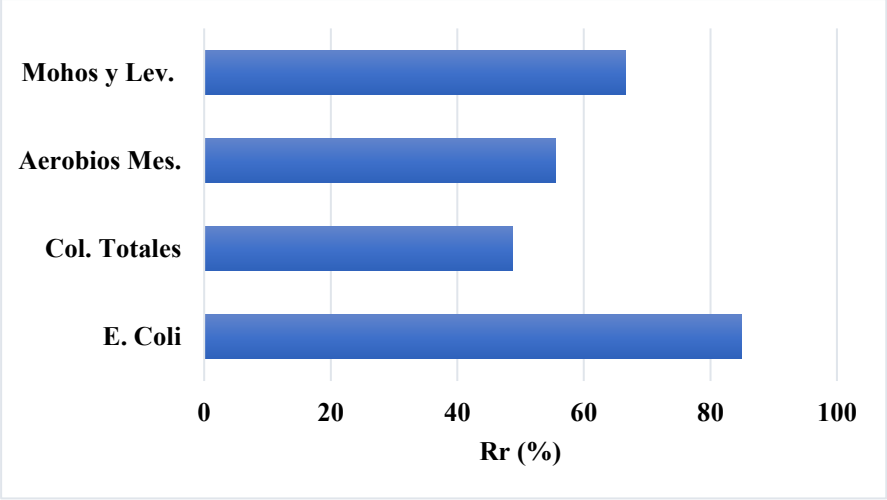


Figura 50. Porcentaje de reducción en aguas residuales del café con HC de un solo paso. Fuente: Los Autores.

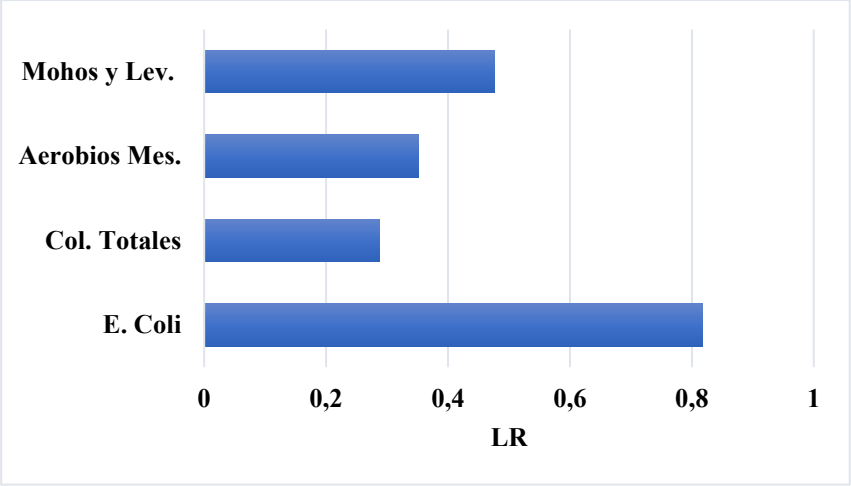


Figura 51. Reducción Logarítmica en aguas residuales del café con HC de un solo paso. Fuente: Los Autores.

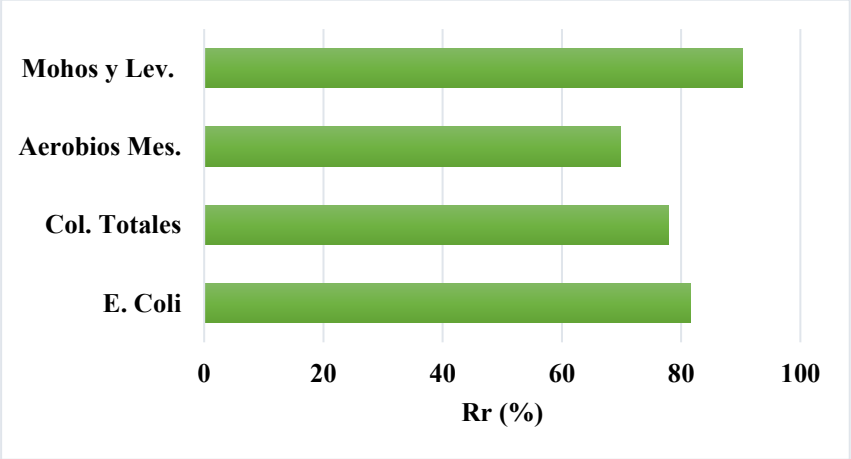


Figura 52. Porcentaje de reducción en aguas residuales del café con HC de 60 minutos. Fuente: Los Autores.

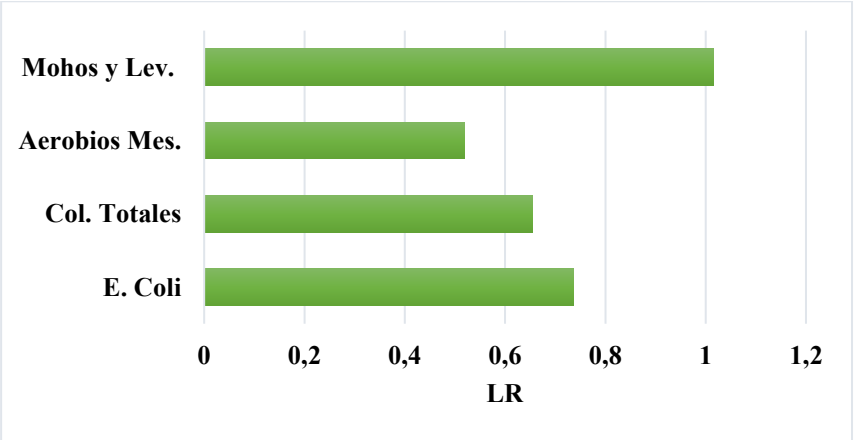


Figura 53. Reducción Logarítmica en aguas residuales del café con HC de un solo paso. Fuente: Los Autores.

Para los parámetros de este experimento, las KFU/J al cabo de 60 minutos de proceso fueron de 13.429.764.

Los resultados de los procesos de HC experimentados en distintos tipos de aguas residuales, son prometedores, toda vez que muestran la posibilidad de una reducción importante de microorganismos patógenos en dichas aguas (en general superior al 70%), que si bien, técnicamente no alcanza para ser considerado como desinfección (lo cual implicaría LR superiores a 3), es significativo de cara a reducir la afectación de estas aguas al ser vertidas sobre otras fuentes que son usadas para el consumo humano. De estos se sigue la necesidad de más estudios que puedan consolidar la técnica y aprovechar al máximo sus principios de operación.

Resumen o puntos clave del capítulo

En este capítulo se han sintetizado experiencias de cavitación hidrodinámica desarrolladas por el Departamento de Investigación de la Fundación Universitaria de San Gil-UNISANGIL, en específico las pruebas efectuadas con aguas vertidas directamente sobre el río Fonce, con lixiviados del relleno sanitario El Cucharo, con aguas residuales de la planta de beneficio animal del municipio de Villanueva, y con aguas residuales del beneficio del café. Los análisis se mostraron en términos del porcentaje de reducción de microrganismos, de la reducción logarítmica, y, para lo lixiviados también en términos de parámetros fisicoquímicos como la DQO o la DBO_5. El texto expone también la relación entre UFC eliminadas y consumo energético.

En el siguiente capítulo se presenta la influyente visión de tres investigadores expertos, de gran relevancia mundial, sobre los desafíos y las perspectivas futuras para la cavitación hidrodinámica: el Dr. Aniruddha B. Pandit, el Dr. Chandrakant Holkar, y el Dr. Ananda Jadhav, todos del Institute of Chemical Technology de Mumbai, con una especial mirada a las aplicaciones futuras orientadas al manejo de aguas residuales.

Chapter IV: Future Perspectives

Chandrakant R. Holkar [a] Ananda J. Jadhav [a], Aniruddha B. Pandit[b*]

[a] Department of Biological Sciences and Biotechnology, Institute of Chemical Technology, Mumbai 400019, Maharashtra (India)

[b] Department of Chemical Engineering, Institute of Chemical Technology, Mumbai 400019, Maharashtra (India)

*Author to whom correspondence should be addressed

Email: ab.pandit@ictmumbai.edu.in (Aniruddha B. Pandit)

Introduction

With the development of cavitation technology, hydrodynamic cavitation has been applied in various fields as reviewed in the previous chapters. Especially in the field of water treatment, it has been proven to have a great potential of success. At present, the research on water treatment mainly focuses on the cavitation principle, factors affecting hydrodynamic cavitation, combined use of hydrodynamic cavitation with advance oxidation processes (AOPs), other water treatment methods along with the optimization of cavitation reactor. Hydrodynamic cavitation inactivates bacteria, microalgae and degrade organic substances based on thermal effect, mechanical effect and chemical effect produced by cavitation (N V et al., 2024). Hydrodynamic cavitation cannot completely degrade the pollutants in wastewater, so it should always be coupled with chemical or physical methods to achieve a higher conversion leading to process intensification (Holkar et al., 2019).

The persistent organic pollutants (POPs) in wastewater and its negative concerns on terrestrial and aquatic ecosystem is vast. The conventional wastewater treatment facilities have failed to mineralize all the pollutants present in wastewater. However, advanced water treatment options such as activated carbons, membrane bioreactors and advanced oxidation processes (AOPs) are well researched but are found to be capital-intensive treatment of the refractory pollutants. Environmentally sound and economic feasibilities are important conditions in the choice of the best technology for wastewater treatment. The combination of hydrodynamic cavitation with the suitable advanced oxidation process (AOPs) has demonstrated the synergistic effect for degradation of pollutants in wastewater. Most of the hybrid wastewater treatments are cost effective, easy to operate and energy efficient. The associated limitations of a single oxidation process such as narrow operational pH range can completely be removed in the hybrid technologies (Mumtaz et al., 2024). The future of mineralisation of pollutants in wastewater may be represented by hybrid technologies based on hydrodynamic cavitation and AOPs.

In the recent years, several new configurations of hydrodynamic cavitation reactors have been proposed and researched, which has improved the degradation efficiency of hydrodynamic cavitation. The proposed efforts required to effectively promote the industrialization of cavitation technology are discussed in the subsequent sections.

New Proposed Research Work in UNISANGIL Colombia

The following two sections expose a novel proposed research work, presented at UNISANGIL, in San Gil, Colombia, by Dr. Aniruddha Pandit, in the context of his participation in the Knowledge Transfer Seminar “Technological Innovation in Wastewater Treatment,” which was developed at UNISANGIL during April 24, 25, and 26 of 2024.

Combination of Hydrodynamic Cavitation and New Wastewater Treatment Methods

Hydrodynamic cavitation generates free radicals and allows the maximum contact between the generated radicals and the pollutants in the shortest possible time. But the energy efficiency of hydrodynamic cavitation is highly dependent on experimental conditions and pollutant characteristics. The maximum degradation can only be optimum conditions which needs multiple parameters to be optimised. The combination of hydrodynamic cavitation with other advanced oxidation processes ensures efficient mineralisation of micro-pollutants with better synergistic effects compared to stand-alone advanced oxidation processes (Wang et al., 2021). One or more of the popular AOPs such as ozone oxidation, Fenton process, photo catalytical oxidation, UV oxidation can be combined in hybrid AOPs for the elimination of associated disadvantages of a single treatment method. Its various advantages such as low operational cost, no chemical addition, low energy utilisation and treatment of large volume of polluted waters makes it a very efficient procedure for the mineralisation of pollutants in wastewater. The proposed schematic representation of the various AOPs along with hydrodynamic cavitation set up to be used in the future work has been shown in the following Figure 54.

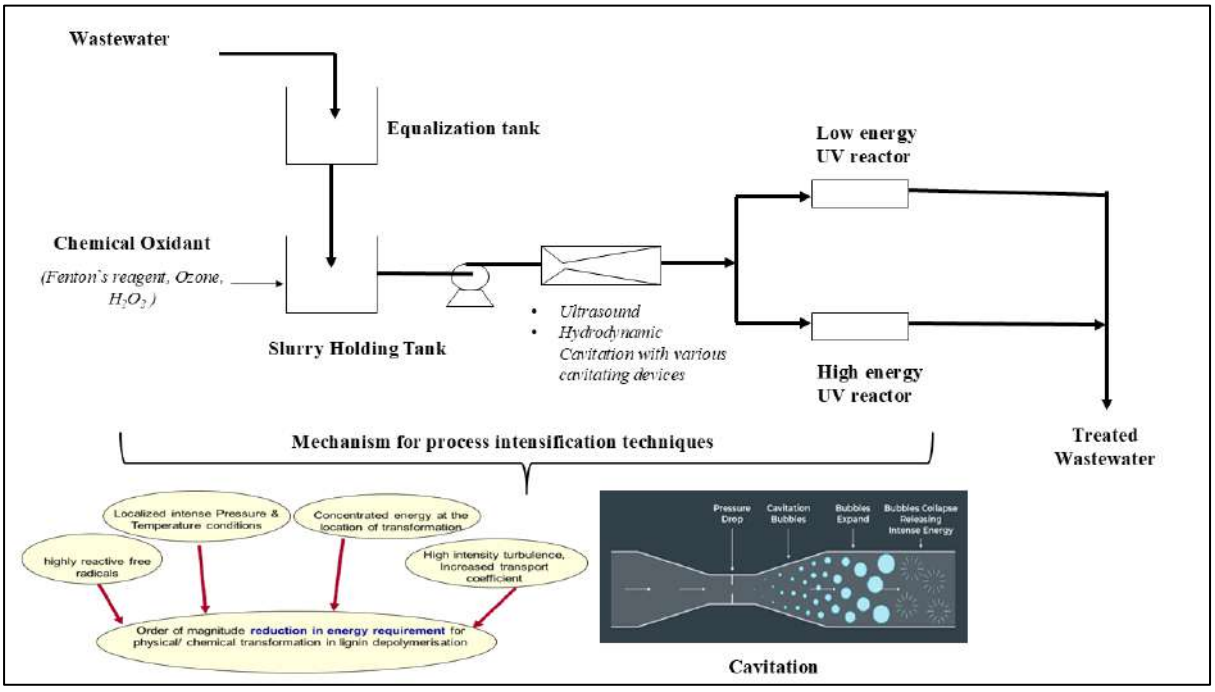


Figure 54. Process Demonstration: Combination of cavitation and UV irradiation and chemical oxidants (Hydrogen Peroxide, Ozone and Fenton`s reagent). Source: The Authors.

The detailed description of the various cavitation devices can be found in earlier work (Carpenter et al., 2022; Katiyar et al., 2021; Panda et al., 2020). A single UV tube with different power rating and dominant emitting wavelength of 254 nm can be used as a source of ultraviolet irradiation. Here, different UV tubes can be used with the objective of studying the dependency of the pollutant degradation on the power dissipation. The UV tubes should be placed inside the holding tank and the top of the holding tank should be covered using black cover to avoid the diffusion of the irradiation outside the holding tank of hydrodynamic cavitation set up. Ozone can be generated from air using a laboratory-scale oxygen generator and continuously bubbled into the wastewater in the holding tank using a ceramic diffuser. Different flow rates of ozone such 100, 200, 300, and 400 mg/h can be used in future work to investigate the effect of ozone loading on the treatment of wastewater from various industries. Here, ozone can degrade and oxidize large organic molecules into smaller, biodegradable materials without the addition of disinfection chemicals. The reaction with pollutant can be via a direct pathway or indirect pathways. Direct pathway includes the direct reaction between ozone molecule and the dissolved pollutant at pH < 4. The indirect pathway is the generation of the OH radical through the decomposition of ozone molecule in water and then the subsequent reaction of the generated OH radicals with the pollutant (Parag R Gogate and Pandit, 2004). As a result, direct ozone oxidation and an unselective oxidation process by radicals, ozonation can effectively degrade several pollutants compared to other types of individual AOPs. Ozone can also be used in combination with other AOPs for a better wastewater treatment option. The combination of ozone and hydrodynamic cavitation can enhance the degradation of pollutants, which may result in the reduction of ozone amount used, and hence lowering the cost of treatment along with energy demand. The combination of hydrodynamic cavitation and ozone oxidation can synergistically remove the disadvantages associated with stand-alone processes and significantly improve the degradation efficiency (Parag R. Gogate and Pandit, 2004).

Use of Existing Static Pressure in Dam Water to Create Cavitation: Proposed Case Study in San Gil Colombia

As discussed in the previous chapters, Cavitation is the formation, growth, and collapse of vapor-filled cavities or bubbles in a liquid, occurring due to changes in pressure. These rapid pressure fluctuations lead to high-energy events that can induce chemical and physical changes in the liquid (Parag R. Gogate and Aniruddha B. Pandit, 2001). This phenomenon occurs when the local pressure in a liquid drop below its vapor pressure, causing the liquid to vaporize and form gas-vapour filled bubbles. As these bubbles collapse, they release concentrated energy in the form of shock waves, generate high temperatures locally, and localized turbulence. This process, which is sometimes destructive in hydraulic systems, has been harnessed for a variety of beneficial applications in controlled cavitation. Cavitation is commonly observed in hydraulic systems such as pumps, turbines, and propellers. In such systems, uncontrolled cavitation can lead to material damage, reduced operation efficiency, and noise. However, when controlled, cavitation becomes a powerful tool for chemical, physical and biological transformation for enhancing chemical reactions, breaking down pollutants, and improving water quality. In water treatment systems, for

example, cavitation-induced reactions can degrade organic contaminants, disinfect microorganisms, and facilitate the removal of dissolved gases.

Dams provide a unique opportunity to harness the natural static pressure of stored water. This static pressure, resulting from the height of the water column and gravitational force, represents a substantial energy resource. Unlike dynamic pressure generated by flowing water, static pressure remains constant and can be utilized without the need for additional energy input. By designing systems that capitalize on this natural pressure, it is possible to generate controlled cavitation for eco-friendly applications. The energy efficiency of static pressure utilization is a key advantage. Conventional cavitation systems often rely on external pumps or mechanical devices to create the necessary pressure differentials, consuming significant amounts of energy. In contrast, leveraging the inherent static pressure in dam reservoirs eliminates this energy demand, making the process more sustainable. Additionally, the scalability of such systems allows for their adaptation to various dam sizes and capacities, ensuring broad applicability in water resource management.

The proposed case study for a potential dam at San Gil aims to demonstrate how the static pressure available in this facility can be leveraged to create a sustainable cavitation-based water treatment system. Located in a region where water quality and resource management are critical concerns, a dam at San Gil, serves as an ideal test site for this innovative approach. The system design should focus on achieving multiple objectives: improving water quality, controlling algae growth, and exploring renewable energy potential. By addressing these goals, the study aims to highlight the broader implications of cavitation technology for sustainable water management. For instance, cavitation-induced chemical reactions can break down organic pollutants and disinfect harmful microorganisms; thereby enhancing the quality of water supplied to downstream users. Similarly, the physical effects of cavitation can disrupt algae and biofouling, reducing maintenance requirements for dam infrastructure. This initiative underscores the potential for eco-friendly water resource management by demonstrating the practical applications of cavitation technology. Beyond the immediate benefits of water treatment and algae control, the study can also explore the integration of cavitation systems with renewable energy production. By coupling cavitation-induced processes with hydroelectric power generation, it is possible to enhance the overall efficiency and sustainability of dam operations.

In a dam setup, static pressure from the stored water provides the driving force to induce cavitation as water flows through strategically designed nozzles or constrictions. The Figure 55 demonstrates how static pressure can be harnessed through sequential stages, with water descending progressively across intermediate reservoirs. Each stage includes a cavitation zone induced by constrictions like nozzles, which are crucial for creating localized low-pressure zones.

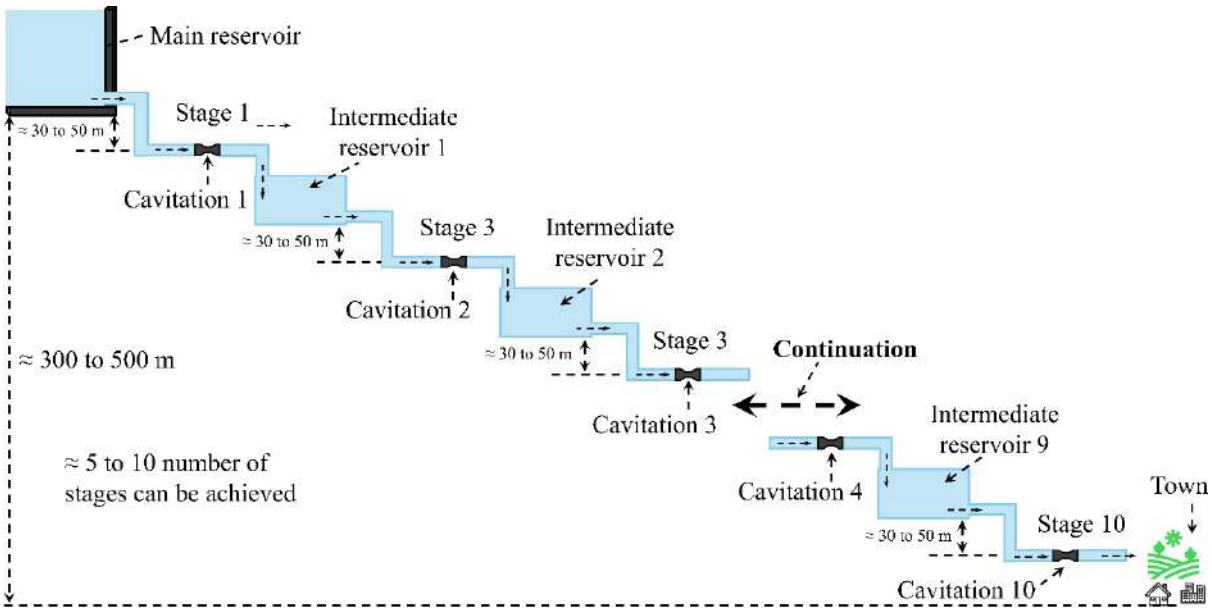


Figure 55. Harnessing the existing static pressure of water in dam to create cavitation. Source: The Authors.

Static pressure in the main reservoir as shown in Figure 55 is determined by the water column height (approximately 300 to 500 meters, as depicted in the schematic). The pressure at the base of the dam can reach up to 5 MPa, based on a water column height of 500 meters, calculated using the hydrostatic pressure equation, as follows:

$$P = \rho \times g \times h \tag{18}$$

where, P is static pressure, ρ is water density, g is gravitational acceleration, and h represents the height of water.

The multi-stage cavitation system illustrated in the Figure 55 effectively utilizes the static pressure of dam water to generate cavitation at each stage while maintaining system stability. At each stage, the static pressure decreases incrementally by 30–50 meters of hydrostatic head, ensuring an adequate pressure drop across the constrictions to induce cavitation without causing flow instability. This process begins with static pressure driving water through cavitation nozzles, where the pressure drops below the vapor pressure of water, triggering the formation of vapor bubbles. These bubbles form in the low-pressure zones created by the sharp constrictions in the nozzles, where increased velocity leads to pressure reduction. The vapor bubbles subsequently collapse in recovered high-pressure zones downstream, releasing significant energy that can be harnessed for applications such as water disinfection, renewable energy (using water turbines), and biofouling control.

As shown in Figure 55, the system is designed as a cascade of 5–10 stages, each separated by intermediate small size reservoirs or holding tanks, holding only an hour of water supply. These reservoirs serve multiple purposes, including stabilizing pressure, dissipating energy, and reconditioning water flow before it enters the next cavitation stage. Each stage operates independently, facilitating controlled cavitation and ensuring system integrity. The high-pressure zones, represented by the reservoirs with a static head of 30–50 meters, alternate with low-pressure zones at the cavitation nozzles, optimizing the pressure gradient for maximum cavitation efficiency while minimizing erosion risks. The geometry and flow rate of each nozzle should be meticulously engineered to withstand high velocities and localized pressure drops. The intermediate reservoirs also function as sedimentation zones, preventing particulate matter from advancing into subsequent stages, thereby enhancing the durability and performance of the system. These reservoirs can also serve as additional equalization tanks, where other supplementary chemicals may be added

This stage-wise design not only amplifies the effects of cavitation but also distributes energy dissipation across multiple stages, which prolongs the lifespan of structural components and enhances operational efficiency. The sequential nature of cavitation ensures effective water treatment and energy harnessing, while the stepwise utilization of the 300–500-meter pressure head aligns with sustainable and scalable applications. This integrated approach demonstrates how a cascade system can optimize static pressure gradients for diverse industrial and environmental purposes.

Thus, the significance of this case study extends beyond the San Gil dam, providing valuable insights and methodologies that can be applied to other dam sites worldwide. As global water demand rises and environmental concerns intensify, the need for energy-efficient and sustainable technologies becomes increasingly critical. The findings of this study could serve as a model for integrating cavitation systems into existing water management infrastructure, offering innovative solutions to urgent environmental challenges.

Design and Optimization Procedure for Cavitation Reactors by the Combining of CFD and other State-of-Art Technologies such as Artificial Intelligence and Machine Learning

Computational Fluid Dynamics (CFD), Artificial Intelligence (AI), and Machine Learning (ML) have become transformative tools in the optimization of cavitation reactors, offering profound insights and enabling significant advancements in design and operational efficiency. These technologies are instrumental in understanding the complex dynamics of cavitation, creating predictive models, and enhancing reactor performance to meet industrial demands effectively. Through the synergy of these cutting-edge methods, the process of designing and optimizing cavitation reactors has evolved into a more precise, cost-effective, and scalable endeavour.

CFD represents a cornerstone technology in this domain. It utilizes numerical analysis to simulate fluid flow dynamics by solving the Navier-Stokes equations (Sheng, 2020) which govern

the motion of fluid substances. In cavitation reactors, CFD is pivotal for visualizing intricate fluid flow interactions, particularly the interplay of velocity, pressure, and turbulence. Turbulence models, such as *k-ε*, *k-ω*, and Large Eddy Simulation (LES), allow CFD to capture detailed phenomena like bubble formation, growth, and collapse. These phenomena are fundamental to understanding cavitation, the rapid formation and implosion of vapor bubbles in a liquid, and its effects on reactor performance. CFD also facilitates the analysis of pressure and velocity profiles, enabling the identification of cavitation inception points and optimizing reactor components for enhanced performance.

Applications of CFD in reactor design are diverse and impactful. Pressure drop analysis (Bouras et al., 2022), for example, is used to determine the precise pressure drop necessary to induce cavitation while minimizing energy losses. Geometry optimization is another crucial area, involving the design of reactor components such as orifice plates and Venturi tubes to maximize cavitation efficiency. CFD is also instrumental in predicting erosion caused by bubble collapse, thereby informing material selection and component design to extend reactor`s operational lifespan. Furthermore, it provides insights into heat and mass transfer dynamics, enabling improved chemical reaction efficiency and better process outcomes.

The utility of CFD is well-illustrated in various case studies. In wastewater treatment, CFD simulations have been used to optimize reactor configurations for improved pollutant degradation rates (Hong et al., 2022). In nanoparticle synthesis, the technology helps refine rotor-stator designs to achieve uniform nanoparticle size distribution (Leybros et al., 2012). Similarly, in chemical synthesis via hydrodynamic cavitation, CFD has enabled significant reductions in energy consumption while maintaining high reaction yields (T. Armstrong et al., 2019). These examples underscore CFD’s capability to drive innovation and efficiency across multiple applications.

AI further complements CFD by introducing automation, pattern recognition, and predictive capabilities into reactor design and optimization processes (Wang & Wang, 2021). AI systems can analyse extensive datasets generated from simulations and experiments, streamlining decision-making and parameter optimization (Soori et al., 2024). For instance, AI algorithms can automatically fine-tune operational parameters such as flow rates, pressure drops, and reactor geometries to achieve optimal performance metrics. Predictive maintenance is another critical application, where AI-driven systems utilize real-time sensor data to forecast maintenance needs, thereby preventing unexpected downtime and reducing the overall costs. Adaptive control systems, powered by reinforcement learning models, enable reactors to dynamically adjust to changing operating conditions, such as variations in feedstock composition or environmental factors.

Real-world applications of AI in reactor optimization highlight its transformative potential. In one scenario, AI algorithms have been employed to optimize cavitation reactors in chemical industries by adjusting operational parameters in real-time. In another, AI has been used to predict material failure points due to cavitation-induced erosion, enabling proactive interventions and enhancing reactor reliability. These applications demonstrate AI’s role in driving operational excellence and extending the operational lifespan of cavitation reactors. ML, a subset of AI, adds another layer of sophistication to the optimization process (Soori et al., 2023). It focuses on developing algorithms that learn from data and make predictions, excelling in analysing

multidimensional and nonlinear relationships, inherent in cavitation phenomena. Regression models, support vector machines, and neural networks are among the key ML techniques applied to cavitation reactor optimization (Zhou et al., 2022). Regression models predict relationships between input parameters, such as flow rate and pressure, and output metrics like cavitation intensity. Support vector machines classify operational conditions, distinguishing between optimal and suboptimal performance scenarios. Neural networks, with their ability to model complex nonlinear relationships, are particularly effective in predicting cavitation dynamics and informed reactor design decisions.

ML's contributions are evident in various applications, such as predictive modelling, where ML models trained on CFD data predict cavitation behaviour and reactor performance with remarkable accuracy. This enables engineers to evaluate multiple design scenarios without the need for exhaustive simulations. Surrogate modelling is another area where ML shines, providing approximations of CFD simulation which results in reduction in computational costs and expedite design iterations. Multi-objective optimization, facilitated by ML, allows engineers to balance competing goals, such as maximizing cavitation intensity while minimizing erosion and energy consumption. Hybrid ML-CFD workflows further illustrate ML's value, leveraging ML models to refine CFD simulations for faster and more accurate reactor design. Additionally, anomaly detection systems powered by ML identify and mitigate performance issues in industrial cavitation reactors, ensuring consistent and efficient operation.

The integration of CFD, AI, and ML creates a synergistic framework for reactor optimization, combining the physical insights provided by CFD with the computational efficiency and adaptability of AI and ML. This hybrid approach enables rapid prototyping, real-time adaptation to operational changes, and comprehensive optimization of reactor performance metrics. Typical workflows involve conducting CFD simulations to generate detailed flow data, training ML models on CFD outputs to predict performance under varied conditions and using AI algorithms for multi-objective optimization. These workflows exemplify how these technologies can be harmonized to accelerate innovation and achieve superior reactor designs. State-of-the-art technologies further amplify the potential of CFD, AI, and ML in cavitation reactor design. High-performance computing (HPC) resources are critical for conducting large-scale CFD simulations, allowing for accurate modelling of complex cavitation phenomena and industrial-scale reactors under real-world conditions. Digital twin technology, which integrates real-time data with predictive models, offers continuous monitoring and optimization of reactor performance. This technology bridges the gap between experimental and simulation data, enhancing accuracy and reliability. Advancements in AI and ML algorithms, including reinforcement learning, generative models, and federated learning, promise to revolutionize reactor optimization. Reinforcement learning facilitates adaptive control in dynamic environments, while generative models enable the creation of novel reactor designs. Federated learning, on the other hand, allows for training ML models on distributed datasets, improving their generalizability and robustness.

Despite these advancements, challenges remain. Computational costs associated with large-scale simulations and complex algorithms are significant barriers. Ensuring access to high-quality experimental and simulation datasets is another critical issue. Scalability is also a concern,

as extending optimized designs to industrial-scale reactors often requires significant adaptation and validation. However, these challenges present opportunities for further research and innovation. The development of efficient algorithms to reduce simulation runtimes, the establishment of comprehensive data-sharing frameworks, and the adaptation of optimization techniques for industrial applications are promising avenues for progress. Looking ahead, emerging technologies such as quantum computing and Internet of Things (IoT)-enabled sensors, a physical device that monitors and collects data from the environment around it, hold the potential to transform cavitation reactor design further. Quantum computing offers unprecedented computational capabilities for simulating cavitation dynamics, enabling more accurate and detailed analyses. IoT-enabled sensors facilitate real-time data acquisition and analysis, enhancing monitoring and control. These advancements, combined with the continued integration of CFD, AI, and ML, promise to usher in a new era of intelligent, efficient, and scalable cavitation reactors. These reactors will not only meet the growing demands of industries ranging from water treatment to pharmaceuticals but also contribute to sustainability and environmental stewardship.

In conclusion, the integration of CFD, AI, and ML has revolutionized the design and optimization of cavitation reactors. By addressing current challenges and leveraging emerging technologies, these tools have enabled the development of intelligent and efficient reactor designs suited for diverse industrial applications. As computational power and data analytics continue to advance, the future of cavitation reactor design holds immense promise, ensuring that these technologies remain at the forefront of industrial innovation and progress.

Challenges

Proper Parametric Characterization of Cavitation Effect at Scaled up Level

Though HC based hybrid methods present a good overlook in the wastewater treatment; it still has a long way to go. The most important bottleneck issue is how to get the real and large scaled use of the HC technique. In the existing literature, we may find that the result of scale-up studies on HC based treatment was not satisfactory enough. Sarvothaman et al. (Sarvothaman et al., 2018) studied the effect of reactor scale on the degradation performance. In this study, they had used two geometrically similar vortex-based cavitation devices having a scale-up factor of 4 and a characteristic dimensions ratio of 2. The authors presented that the degradation performance and the per-pass degradation factors of the smaller device were better than those of the larger device, though they were run at the same characteristic throat velocity. They attributed this phenomenon to the change of bubble collapse intensity as a result of changed pressure history and fluctuations experienced by cavities at different scales.

Explore the Optimal Operating Conditions for each HC Configuration

As seen in previous book chapter, HC lowers the pollutant load of various wastewaters, despite of whether it is used alone or combined with other advanced oxidation processes. Since the operation and geometric parameters of different types of cavitation devices are varied, it is challenging to definitively evaluate which cavitation reactor is the winner. For a specific cavitation reactor, the degradation efficiency is the result of the combined effects of various operating parameters. Therefore, it is always necessary to further study the optimal operating conditions for each configuration of cavitation devices. Response surface methodology is one of the viable options as it simultaneously considers the relevant decision-making factors that are significant to the degradation performance. For different kinds of pollutants, the optimal combinations of AOPs are also different. Therefore, it is crucial to explore the best combination for degradation of various target pollutants using cavitation-based techniques.

Challenges to Expand the HC Technique to an Industrial Scale

The operation and maintenance of HC devices like orifice, venturi tube, and vortex diode are convenient as their construction and installation is simple. It is also possible to create a allocated HC system to get the efficient wastewater treatment. This can be described as installing simple HC devices wherever the sewage flows through, for example, household sewer pipes. Here, the HC devices connected in the sewer pipe work as the first step of pre-treatment to wastewater. After that, the pre-treated wastewater can be sent to the sewage treatment plant for further post-treatment. In this way, the content of pollutants in wastewater can be reduced to a certain extent, which can lighten the workload of subsequent processing in common effluent treatment plant (CETP). However, to explore this concept, a lot many problems need to be resolved, such as HC device installation, sewer pipe design, the control of cavitation reactor inlet pressure, and so on. To execute the practical application of the HC treatment, energy efficiency and economics assessment based on the concentration and type of the pollutant need to be carried out. The economics assessment should consider various aspects such as the construction cost of the HC system, electricity, dosage expenditure, and the maintenance cost.

Future

In the future, further studies should focus on cost analysis of various advanced wastewater treatment methods, including advanced oxidation processes (AOPs), photocatalysis, and combined treatments with cavitation technology. These studies should specifically address wastewater from key Colombian industries such as textiles, pharmaceuticals, food production, oil, and mining.

The operating costs of combination techniques for pollutant degradation in wastewater can be reduced by optimizing the mineralization percentage in the pre-treatment or post-treatment stages, thereby minimizing unnecessary chemical and energy consumption (Holkar et al., 2016). To further optimize wastewater treatment costs, it is essential to identify the most expensive

treatment components and either minimize or replace them with more cost-effective and efficient alternatives.

Figure 56 outlines the steps for selecting a suitable combination of AOPs, biological treatments, and hydrodynamic cavitation (HC) for wastewater treatment. The costs and toxicity of intermediates produced by these treatment combinations should be thoroughly evaluated and compared. Ultimately, the most cost-effective and least toxic combination should be prioritized for wastewater treatment applications.

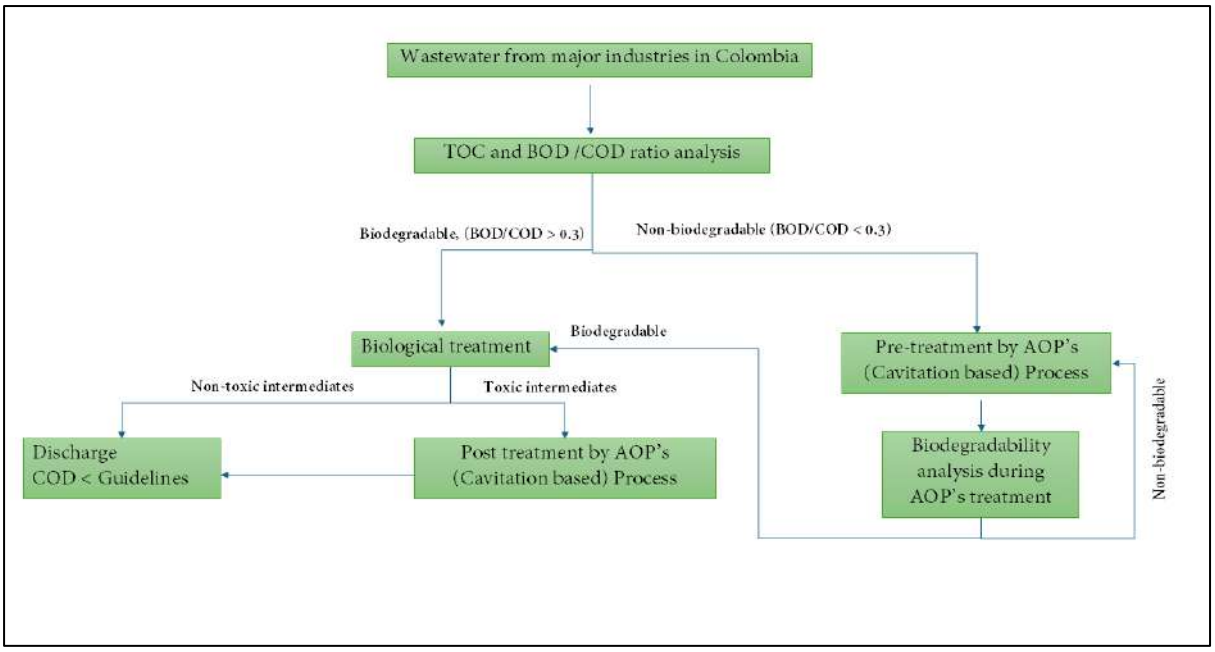


Figure 56. Proposed Process Intensification in wastewater treatment. Source: The Authors.

However, no single treatment method is universally suitable for all types of wastewaters. Therefore, wastewater treatment should involve a combination of physical, chemical, and biological methods, depending on the type and pollutant load.

In most cases, wastewater that has undergone biological treatment does not fully meet discharge standards. To ensure compliance and minimize the impact of toxic intermediates on bacterial ecosystems, refractory pollutants should first be oxidized using cavitation, either alone or in combination with advanced oxidation processes (AOPs). This step converts pollutants into biodegradable constituents, which can then undergo bacterial treatment. Additionally, cavitation technology can be used to eliminate microbial contaminants from water. Once microbial removal is complete, the treated water can be safely recycled for industrial cleaning purposes.

In summary, this book has explored various case studies and outlined future research directions for implementing cavitation technology in wastewater treatment for major industries in Colombia.

Epílogo o conclusión

El presente libro ha sido escrito con fines divulgativos, con el objeto de dar a conocer parte de las experiencias de UNISANGIL en el desarrollo de una tecnología para el tratamiento y desinfección de aguas residuales, basada en la implementación de sistemas de cavitación hidrodinámica. El texto ha servido también para exponer los fundamentos de esta tecnología, su estado del arte y relación con la dinámica computacional de fluidos, así como sus retos y perspectivas futuras, de acuerdo con la opinión de tres reconocidos investigadores mundiales sobre el tema, el Dr. Aniruddha B. Pandit, el Dr. Chandrakant Holkar, y el Dr. Ananda Jadhav.

Al concluir su redacción, algunos aspectos son destacables, entre ellos el hecho de que la HC versa sobre una tecnología ampliamente estudiada, y que, si bien, esto no significa que no existan aspectos puntuales del fenómeno físico y del desarrollo tecnológico que deban seguir siendo explorados, si es válido afirmar que, con el estado actual de conocimiento sobre la materia, es factible el diseño e implementación de prototipos y pilotos de prueba, orientados a la solución de problemas específicos, como la desinfección in situ de aguas residuales urbanas, que amplíen el espectro de las posibles aplicaciones.

El uso de la dinámica computacional de fluidos para el estudio previo del diseño de reactores de cavitación, esto es, de sus geometrías y estructuras asociadas, es fundamental para determinar el funcionamiento de cada nuevo reactor, sus condiciones de variación de velocidad del fluido, de la presión, de la temperatura, entre otras variables del sistema. La solución numérica de las ecuaciones de Navier – Stokes, permite caracterizar de forma detallada la operación del reactor de manera previa a su construcción física, de modo que ningún nuevo desarrollo debería obviar este paso en el proceso de diseño. UNISANGIL, al respecto, cuenta con el diseño en proceso de patentado de un nuevo reactor con geometría en forma de aleta, experimentado con resultados prometedores en diversos tipos de aguas residuales.

Pero quizá el aporte más significativo de los trabajos expuestos en este libro ha sido mostrar la viabilidad del uso de la cavitación hidrodinámica en entornos naturales, como los experimentos realizados en tiempo real sobre un vertimiento directo de aguas residuales al río Fonce, o el ensayo de procesos de cavitación con volúmenes de agua superiores a los doscientos litros, para el manejo, por ejemplo, de lixiviados o aguas residuales de una planta de beneficio animal. Pasar de la experimentación de esta tecnología en laboratorio a la experimentación de prototipos in situ, es una proyección necesaria que acerca la puesta en marcha de estructuras de tratamiento y desinfección de aguas residuales en entornos industriales y agroindustriales.

Finalmente, esta experiencia de divulgación científica y tecnológica deja en claro la vigencia de la cavitación hidrodinámica, así como la necesidad de nuevas investigaciones e innovaciones que exploren la efectividad de su uso en combinación con otras tecnologías de avanzada, que viabilicen cada vez más su proyección a escalas adecuadas para la industria y la

agroindustria. Al respecto, la exploración de las posibilidades del uso de inteligencia artificial para optimizar los procesos de diseño es altamente apropiada y deseable. De igual manera, ahondar en el detalle de la eficiencia energética de los sistemas de cavitación hidrodinámica es clave de cara a potenciar todas sus posibles aplicaciones, las cuales son susceptibles de ser aprovechadas en diversos sectores como el textil, el farmacéutico, el de alimentos, o el minero energético, en el que el procesamiento de aguas residuales es de suma importancia, para garantizar la sostenibilidad de su desarrollo. Sólo una vocación de trabajo dedicada y multidisciplinaria logrará consolidar los desarrollos proyectados, en beneficio de las poblaciones locales, y a partir de ellas del mundo entero.

Bibliografía

Abbas-Shiroodi, Z., Sadeghi, M. T., & Baradaran, S. (2021). Design and optimization of a cavitating device for Congo red decolorization: Experimental investigation and CFD simulation. *Ultrasonics Sonochemistry*, *71*. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105386

Agarkoti, C., Gujar, S. K., Gogate, P. R., & Pandit, A. B. (2023). Pilot scale degradation of Sulfamerazine using different venturi based hydrodynamic cavitation and ultrasound reactors in combination with oxidation processes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *11*(3). https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109857

Álvarez, G. , J., & Roa, M. , G. (1999). *Rendimiento del café cereza al café pergamino*. https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/882/6/5.%20Rendimiento%20caf%C3%A9%20cereza.pdf

Arrojo, S., & Benito, Y. (2008). A theoretical study of hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, *15*(3), 203–211. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2007.03.007

Ashgriz, N., & Mostaghim, J. (2002). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: Chapter 20 in Fluid Flow Handbook*. University of Toronto: Department of Mechanical & Industrial Eng. https://www2.mie.utoronto.ca/labs/MUSSL/cfd20.pdf

Ashokkumar, M. (2011). The characterization of acoustic cavitation bubbles - An overview. *Ultrasonics Sonochemistry*, *18*(4), 864–872. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.11.016

Ashokkumar, M., Lee, J., Kentish, S., & Grieser, F. (2007). Bubbles in an acoustic field: An overview. *Ultrasonics Sonochemistry*, *14*(4), 470–475. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2006.09.016

Bagal, M. V., & Gogate, P. R. (2014). Degradation of diclofenac sodium using combined processes based on hydrodynamic cavitation and heterogeneous photocatalysis. *Ultrasonics Sonochemistry*, *21*(3), 1035–1043. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.10.020

Bis, M., Montusiewicz, A., Ozonek, J., & Pasieczna-Patkowska, S. (2015). Application of hydrodynamic cavitation to improve the biodegradability of mature landfill leachate. *Ultrasonics Sonochemistry*, *26*, 378–387. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.03.003

Bouras, H., Haroun, Y., Fortunato Bodziony, F., Philippe, R., Fongarland, P., Augier, F., 2022. Use of CFD for pressure drop, liquid saturation and wetting predictions in trickle bed reactors for different catalyst particle shapes. Chemical Engineering Science 249, 117315. https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117315

Bulychev, N. A. (2021). Application of intensive hydrodynamic cavitation in liquids for synthesis of hydrogen and nanoparticles. *International Journal of Hydrogen Energy*, *46*(41), 21298–21302. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.019

Campos, R. C., Pinto, V. R. A., Melo, L. F., Rocha, S. J. S. S. da, & Coimbra, J. S. (2021). New sustainable perspectives for "Coffee Wastewater" and other by-products: A critical review. In *Future Foods* (Vol. 4). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100058

Carpenter, J., Pinjari, D.V., Kumar Saharan, V., Pandit, A.B., 2022. Critical Review on Hydrodynamic Cavitation as an Intensifying Homogenizing Technique for Oil-in-Water Emulsification: Theoretical Insight, Current Status, and Future Perspectives. Ind. Eng. Chem. Res. 61, 10587–10602. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c00754

Carpenter, J., Badve, M., Rajoriya, S., George, S., Saharan, V. K., & Pandit, A. B. (2017). Hydrodynamic cavitation: An emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry. *Reviews in Chemical Engineering*, *33*(5), 433–468. https://doi.org/10.1515/revce-2016-0032

Castro-Muñoz, R., Boczkaj, G., & Jafari, S. M. (2023). The role of hydrodynamic cavitation in tuning physicochemical properties of food items: A comprehensive review. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 134, pp. 192–206). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.03.010

Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Thermodynamics An Engineering Approach* (8th ed.). McGraw-Hill Education.

Chakinala, A. G., Gogate, P. R., Burgess, A. E., & Bremner, D. H. (2009). Industrial wastewater treatment using hydrodynamic cavitation and heterogeneous advanced Fenton processing. *Chemical Engineering Journal*, *152*(2–3), 498–502. https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.05.018

Chakinala, A. G., Gogate, P. R., Burgess, A. E., & Bremner, D. H. (2008). Treatment of industrial wastewater effluents using hydrodynamic cavitation and the advanced Fenton process. *Ultrasonics Sonochemistry*, *15*(1), 49–54. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2007.01.003

Chen, M., Zhuang, K., Sui, J., Sun, C., Song, Y., & Jin, N. (2023). Hydrodynamic cavitation-enhanced photocatalytic activity of P-doped TiO2 for degradation of ciprofloxacin: Synergetic effect and mechanism. *Ultrasonics Sonochemistry*, *92*. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106265

Darandale, G. R., Jadhav, M. V., Warade, A. R., & Hakke, V. S. (2023). Hydrodynamic cavitation a novel approach in wastewater treatment: A review. *Materials Today: Proceedings*, *77*, 960–968. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.075

de Melo Franco Domingos, J., de Alencar Neves, T., de Sousa Maia, D. L., Carvalho Siqueira, R., Araújo Marques, M. V., Alves, O. L., Guimarães, J. R., Antunes Nolasco, M., & Rosa, A. H. (2023). Effect of the association of coagulation/flocculation, hydrodynamic cavitation, ozonation and activated carbon in landfill leachate treatment system. *Scientific Reports*, *13*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-023-36662-8

De-Nasri, S. J., Sarvothaman, V. P., Kelly, C., Nagarajan, S., Manesiotis, P., Robertson, P. K. J., & Ranade, V. V. (2023). Hydrodynamic cavitation and photocatalysis for effluent treatment: Key operating parameters and synergistic effects. *Chemical Engineering Journal*, *473*. https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.145241

Dixit, D., Thanekar, P., & Bhandari, V. M. (2023). Improving hydrodynamic cavitation using newer surface-coated cavitation reactors. *Chemical Engineering Research and Design*, *199*, 238–251. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.10.002

Dos Santos Pereira, A. K., Teixeira, K. C., Pereira, D. H., & Cavallini, G. S. (2024). A critical review on slaughterhouse wastewater: Treatment methods and reuse possibilities. *Journal of Water Process Engineering*, *58*(December 2023), 104819. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104819

Du, J., & Chen, F. (2021). Cavitation dynamics and flow aggressiveness in ultrasonic cavitation erosion. *International Journal of Mechanical Sciences*, *204*. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106545

Dular, M., Griessler-Bulc, T., Gutierrez-Aguirre, I., Heath, E., Kosjek, T., Krivograd Klemenčič, A., Oder, M., Petkovšek, M., Rački, N., Ravnikar, M., Šarc, A., Širok, B., Zupanc, M., Žitnik, M., & Kompare, B. (2016). Use of hydrodynamic cavitation in (waste)water treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, *29*, 577–588. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.10.010

Elsaidy, N. R., Elleboudy, N. S., Alkhedaide, A., Abouelenien, F. A., Abdelrahman, M. H., Soliman, M. M., & Shukry, M. (2022). Enhancement Effects of Water Magnetization and/or Disinfection by Sodium Hypochlorite on Secondary Slaughterhouse Wastewater Effluent Quality and Disinfection By-Products. *Processes*, *10*(8). https://doi.org/10.3390/pr10081589

Franc, J.-P. (2007). The Rayleigh-Plesset equation: a simple and powerful tool to understand various aspects of cavitation. In *Fluid Dynamics of Cavitation and Cavitating Turbopumps, CISM Courses and Lectures* (pp. 1–41). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-211-76669-9_1

Gągol, M., Przyjazny, A., & Boczkaj, G. (2018). Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes based on cavitation – A review. *Chemical Engineering Journal*, *338*, 599–627. https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.049

Gawande, G. D., Pinjari, D. V., & Chavan, P. V. (2023). Degradation of neomycin using hydrodynamic cavitation based hybrid techniques. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, *193*. https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109543

Ghorbani, M., Oral, O., Ekici, S., Gozuacik, D., & Kosar, A. (2016). Review on Lithotripsy and Cavitation in Urinary Stone Therapy. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, *9*, 264–283. https://doi.org/10.1109/RBME.2016.2573381

Gode, A., Madane, K., & Ranade, V. V. (2023). Design of vortex-based cavitation devices/reactors: Influence of aspect ratio, number of inlets and shape. *Ultrasonics Sonochemistry*, *101*. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106695

Gogate, P. R. (2011). Hydrodynamic Cavitation for Food and Water Processing. *Food and Bioprocess Technology*, *4*(6), 996–1011. https://doi.org/10.1007/s11947-010-0418-1

Gogate, P. R. (2007). Application of cavitational reactors for water disinfection: Current status and path forward. *Journal of Environmental Management*, *85*(4), 801–815. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.07.001

Gogate, P. R., Tayal, R. K., & Pandit, A. B. (2006). Cavitation: A technology on the horizon. *CURRENT SCIENCE*, *91*(1), 35–46. https://www.jstor.org/stable/24094173

Gogate, Parag R, Pandit, A.B., 2004. A review of imperative technologies for wastewater treatment I: oxidation technologies at ambient conditions. Advances in Environmental Research 8, 501–551. https://doi.org/10.1016/S1093-0191(03)00032-7

Gogate, Parag R., Pandit, A.B., 2004. A review of imperative technologies for wastewater treatment II: hybrid methods. Advances in Environmental Research 8, 553–597. https://doi.org/10.1016/S1093-0191(03)00031-5

Gogate, P. R., & Pandit, A. B. (2000). Engineering Design Methods for Cavitation Reactors II: Hydrodynamic Cavitation. *AIChE Journal*, *46*(8), 1641–1649. https://doi.org/10.1002/aic.690460815

Gutiérrez-Mosquera, L. F., Arias-Giraldo, S., & Zuluaga-Meza, A. (2022). Landfill leachate treatment using hydrodynamic cavitation: exploratory evaluation. *Heliyon*, *8*(3). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09019

Gutiérrez-Mosquera, L. F., Arias-Giraldo, S., & Cardona-Naranjo, D. F. (2019). Cavitación Hidrodinámica: un Enfoque desde la Ingeniería y la Agroindustria. *Scientia et Technica*, *24*(2), 283–304. https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/19921/14661

Guvenc, S. Y., Daniser, Y., Can-Güven, E., Varank, G., & Demir, A. (2023). Pre-coagulated landfill leachate treatment by Electro-oxidation using MMO/Ti, Pt/Ti, and graphite anodes. *Environmental Engineering Research*, *28*(1). https://doi.org/10.4491/eer.2021.419

Han, R., Zhang, A. M., Tan, S., & Li, S. (2022). Interaction of cavitation bubbles with the interface of two immiscible fluids on multiple time scales. *Journal of Fluid Mechanics*, *932*. https://doi.org/10.1017/jfm.2021.976

Hangxun, X., Zeiger, B. W., & Suslick, K. S. (2013). Sonochemical synthesis of nanomaterials. *Chemical Society Reviews*, *42*(7), 2555–2567. https://doi.org/10.1039/c2cs35282f

Holkar, C.R., Jadhav, A.J., Pinjari, D.V., Pandit, A.B., 2019. Cavitationally Driven Transformations: A Technique of Process Intensification. Ind. Eng. Chem. Res. 58, 5797–5819. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b04524

Holkar, C.R., Jadhav, A.J., Pinjari, D.V., Mahamuni, N.M., Pandit, A.B., 2016. A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches. Journal of Environmental Management 182, 351–366. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.090

Hong, F., Tian, H., Yuan, X., Liu, S., Peng, Q., Shi, Y., Jin, L., Ye, L., Jia, J., Ying, D., Thomas, S. R., & Huang, Y. (2022). CFD-assisted modeling of the hydrodynamic cavitation reactors for wastewater treatment — A review. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 321). Academic Press. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115982

Hou, R., Song, Y., Liu, J., Zhang, L., Zhang, M., & Sun, X. (2023). Experimental and numerical investigation on the disinfection characteristics of a novel rotor-radial groove hydrodynamic cavitation reactor. *Process Safety and Environmental Protection*, *169*, 260–269. https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.019

Jain, P., Bhandari, V. M., Balapure, K., Jena, J., Ranade, V. V., & Killedar, D. J. (2019). Hydrodynamic cavitation using vortex diode: An efficient approach for elimination of pathogenic bacteria from water. *Journal of Environmental Management*, *242*, 210–219. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.057

Jaradat, A. Q., Shtayat, A. R., & Odat, S. (2022). A coagulation-flocculation process combined with continuous adsorption using eggshell waste materials for phenols and PAHs removal from landfill leachate. *Environmental Engineering Research*, *27*(3). https://doi.org/10.4491/eer.2021.133

Jara-Mora, F. A., Vargas-Tangua, F. C., Neira-Tavera, J. A., Cobos-Ramírez, L. E., Gamboa-Contreras, W., & Muñoz-Neira, M. J. (2024). Introducing a Promising New Disinfection Technology for the Fonce River in Colombia. *TecnoLógicas*, *27*(61), e3092. https://doi.org/10.22430/22565337.3092

Jyoti, K. K., & Pandit, A. B. (2004). Ozone and cavitation for water disinfection. *Biochemical Engineering Journal*, *18*(1), 9–19. https://doi.org/10.1016/S1369-703X(03)00116-5

Katiyar, J., Bargole, S., George, S., Bhoi, R., Saharan, V.K., 2021. Chapter 4 - Advanced technologies for wastewater treatment: New trends, in: Bhanvase, B., Sonawane, S., Pawade, V., Pandit, A. (Eds.), Handbook of Nanomaterials for Wastewater Treatment, Micro and Nano Technologies. Elsevier, pp. 85–133. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821496-1.00011-8

Kuimov, D. (2023). Theoretical and experimental investigation of cavitation number limits. *E3S Web of Conferences*, *402*. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340203025

Kumar, J. K., & Pandit, A. B. (2013). *Drinking Water Disinfection Techniques* (1st ed.). CRC Press. https://doi.org/https://doi.org/10.1201/b13705

Leybros, A., Piolet, R., Ariane, M., Muhr, H., Bernard, F., Demoisson, F., 2012. CFD simulation of ZnO nanoparticle precipitation in a supercritical water synthesis reactor. The Journal of Supercritical Fluids 70, 17–26. https://doi.org/10.1016/j.supflu.2012.06.001

Lopes, C. L., de Assis, T. M., Passig, F. H., Lima Model, A. N. de, Mees, J. B. R., Cervantes, F. J., Gotardo, J. T., & Gomes, S. D. (2022). Nitrogen removal from poultry slaughterhouse wastewater in anaerobic-anoxic-aerobic combined reactor: Integrated effect of recirculation rate and hydraulic retention time. *Journal of Environmental Management*, *303*(November 2021), 114162. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114162

Mane, M. B., Bhandari, V. M., Balapure, K., & Ranade, V. V. (2020). A novel hybrid cavitation process for enhancing and altering rate of disinfection by use of natural oils derived from plants. *Ultrasonics Sonochemistry*, *61*. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104820

Mishra, K. P., & Gogate, P. R. (2010). Intensification of degradation of Rhodamine B using hydrodynamic cavitation in the presence of additives. *Separation and Purification Technology*, *75*(3), 385–391. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2010.09.008

Montilla-Pérez, J., Arcila-Pulgarín, J., Aristizábal-Loaiza, M., Montoya-Restrepo, E. C., Puerta-Quintero, G. I., Oliveros-Tascón, C. E., & Cadena -Gómez, G. (2008). *Avances Técnicos 370 - PROPIEDADES FÍSICAS Y FACTORES DE CONVERSIÓN DEL CAFÉ EN EL PROCESO DE BENEFICIO*. https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/358/1/avt0370.pdf

Mumtaz, F., Li, B., Al Shehhi, M.R., Feng, X., Wang, K., 2024. Treatment of phenolic-wastewater by hybrid technologies: A review. Journal of Water Process Engineering 57, 104695. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104695

N V, N., Bhattacharya, S., Holkar, C.R., Jadhav, A.J., Pandit, A.B., Pinjari, D.V., 2024. Cavitation-Assisted Transformations in Bitumen Processing: A Review. Ind. Eng. Chem. Res. 63, 6047–6065. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c00182

Oliveros, C., Sanz, J., Ramírez, C., & Tibaduiza, C. (2013). *Avances Técnicos 432 - ECOMILL Tecnología ambiental para el lavado del café*. https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/500/1/Avt0432.pdf

Osman, H., Hosseini, S. H., & Elsayed, K. (2023). CFD modelling and multi-objective optimization of MHO for hydrodynamic cavitation generator using a radial basis function neural network, and NSGA-II. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, *190*. https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109416

Ozonek, J. (2012). *Application of Hydrodynamic Cavitation in Environmental Engineering* (1st ed.). CRC Press. https://doi.org/https://doi.org/10.1201/b11825

Pamidi, T., Johansson, Ö., Shankar, V., & Löfqvist, T. (2024). Hydrodynamic and acoustic cavitation effects on properties of cellulose fibers. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, *203*. https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.109894

Panda, D., Saharan, V.K., Manickam, S., 2020. Controlled Hydrodynamic Cavitation: A Review of Recent Advances and Perspectives for Greener Processing. Processes 8, 220. https://doi.org/10.3390/pr8020220

Parag R. Gogate, Aniruddha B. Pandit, 2001. HYDRODYNAMIC CAVITATION REACTORS: A STATE OF THE ART REVIEW. Reviews in Chemical Engineering 17, 1–85. https://doi.org/10.1515/REVCE.2001.17.1.1

Patil, Y., Sonawane, S. H., Shyam, P., Sun, X., & Manickam, S. (2023a). Hybrid hydrodynamic cavitation (HC) technique for the treatment and disinfection of lake water. *Ultrasonics Sonochemistry*, *97*. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106454

Patil, Y., Sonawane, S. H., Shyam, P., Sun, X., & Manickam, S. (2023b). Hybrid hydrodynamic cavitation (HC) technique for the treatment and disinfection of lake water. *Ultrasonics Sonochemistry*, *97*. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106454

Patil, P. N., Bote, S. D., & Gogate, P. R. (2014). Degradation of imidacloprid using combined advanced oxidation processes based on hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, *21*(5), 1770–1777. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.02.024

Patil, P. N., & Gogate, P. R. (2012). Degradation of methyl parathion using hydrodynamic cavitation: Effect of operating parameters and intensification using additives. *Separation and Purification Technology*, *95*, 172–179. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.04.019

Pickover, C. (2008). Stokes's Law of Viscosity, 1851. In *Archimedes To Hawking* (pp. 1–514). Oxford University Press.

Qiao, Y., Jin, R., Gao, J., Wang, K., Jiang, Y., Xiong, J., Jia, M. Y., He, Z., & Liu, J. (2023). Process of landfill leachate pretreatment using coagulation and hydrodynamic cavitation oxidation. *RSC Advances*, *13*(46), 32175–32184. https://doi.org/10.1039/d3ra04259f

Rajoriya, S., Bargole, S., & Saharan, V. K. (2017). Degradation of a cationic dye (Rhodamine 6G) using hydrodynamic cavitation coupled with other oxidative agents: Reaction mechanism and pathway. *Ultrasonics Sonochemistry*, *34*, 183–194. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.05.028

Saharan, V. K., Pandit, A. B., Satish Kumar, P. S., & Anandan, S. (2012). Hydrodynamic cavitation as an advanced oxidation technique for the degradation of Acid Red 88 dye. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, *51*(4), 1981–1989. https://doi.org/10.1021/ie200249k

Šarc, A., Stepišnik-Perdih, T., Petkovšek, M., & Dular, M. (2017). The issue of cavitation number value in studies of water treatment by hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, *34*, 51–59. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.05.020

Sarvothaman, V. P., Kulkarni, S. R., Subburaj, J., Hariharan, S. L., Velisoju, V. K., Castaño, P., Guida, P., Prabhudharwadkar, D. M., & Roberts, W. L. (2024). Evaluating performance of vortex-diode based hydrodynamic cavitation device scale and pressure drop using coumarin dosimetry. *Chemical Engineering Journal*, *481*. https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.148593

Sarvothaman, V.P., Nagarajan, S., Ranade, V.V., 2018. Treatment of Solvent-Contaminated Water Using Vortex-Based Cavitation: Influence of Operating Pressure Drop, Temperature,

Aeration, and Reactor Scale. Ind. Eng. Chem. Res. 57, 9292–9304. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b01688

Sheng, W., 2020. A revisit of Navier–Stokes equation. European Journal of Mechanics - B/Fluids 80, 60–71. https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2019.12.005

Sivakumar, M., & Pandit, A. B. (2002). Wastewater treatment: a novel energy efficient hydrodynamic cavitational technique. *Ultrasonics Sonochemistry*, *9*(3), 123–131. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1350-4177(01)00122-5

Smaoui, Y., Bouzid, J., & Sayadi, S. (2020). Combination of air stripping and biological processes for landfill leachate treatment. *Environmental Engineering Research*, *25*(1), 80–87. https://doi.org/10.4491/eer.2018.268

Sobachkin, A., & Dumnov, G. (2014). *Base numérica de CFD integrada en CAD*. https://www.solidworks.es/sw/docs/Flow_Basis_of_CAD_Embedded_CFD_Whitepaper_ESP.pdf

Soori, M., Jough, F.K.G., Dastres, R., Arezoo, B., 2024. AI-Based Decision Support Systems in Industry 4.0, A Review. Journal of Economy and Technology. https://doi.org/10.1016/j.ject.2024.08.005

Soori, M., Arezoo, B., Dastres, R., 2023. Artificial intelligence, machine learning and deep learning in advanced robotics, a review. Cognitive Robotics 3, 54–70. https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.04.001

Stewart, I. (2013). La Ascensión de la Humanidad - Ecuación de Navier Stokes. In *17 Ecuaciones Que Cambiaron el Mundo* (pp. 1–360). Crítica.

Stošić, M., Čučak, D., Kovačević, S., Perović, M., Radonić, J., Turk Sekulić, M., Vojinović Miloradov, M., & Radnović, D. (2016). Meat industry wastewater: Microbiological quality and antimicrobial susceptibility of E. Coli and Salmonella sp. isolates, case study in Vojvodina, Serbia. *Water Science and Technology*, *73*(10), 2509–2517. https://doi.org/10.2166/wst.2016.113

Sun, X., Xu, H., Xuan, X., Manickam, S., Boczkaj, G., & Wang, B. (2024). Assessing the industrialization progress of hydrodynamic cavitation process intensification technology: a review. In *Current Opinion in Chemical Engineering* (Vol. 45). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.coche.2024.101037

Sun, X., Wang, Z., Xuan, X., Ji, L., Li, X., Tao, Y., Boczkaj, G., Zhao, S., Yoon, J. Y., & Chen, S. (2021). Disinfection characteristics of an advanced rotational hydrodynamic cavitation reactor in pilot scale. *Ultrasonics Sonochemistry*, *73*. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105543

Sun, Xun., Liu, Jingting., Ji, Li., Wang, Guichao., Zhao, Shan., Yoon, J. Yong., & Chen, Songying. (2020). A review on hydrodynamic cavitation disinfection: The current state of

knowledge. *Science of the Total Environment*, *737*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139606

T. Armstrong, C., Q. Pritchard, C., W. Cook, D., Ibrahim, M., K. Desai, B., J. Whitham, P., J. Marquardt, B., Chen, Y., T. Zoueu, J., J. Bortner, M., D. Roper, T., 2019. Continuous flow synthesis of a pharmaceutical intermediate: a computational fluid dynamics approach. Reaction Chemistry & Engineering 4, 634–642. https://doi.org/10.1039/C8RE00252E

Vilarroig Herrera, J. (2021). *Diseño y análisis de un sistema de cavitación hidrodinámica mediante el uso de técnicas CFD para su utilización en sistemas de pretratamiento de fangos en las estaciones de aguas residuales* [Universitat Jaume I. Escola de Doctorat]. https://www.tdx.cat/handle/10803/672635?locale-attribute=es#page=1

Vizioli, B. D. C., & Montagner, C. C. (2023). *Questões regulatórias sobre a desinfecção da água e o impacto da geração de DBPs na qualidade da água tratada*. *46*(4), 390–404.

Von Gunten, U. (2018). Oxidation processes in water treatment: are we on track? *Environmental Science and Technology*, *52*(9), 5062–5075. https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00586

Wang, B., Su, H., & Zhang, B. (2021). Hydrodynamic cavitation as a promising route for wastewater treatment – A review. *Chemical Engineering Journal*, *412*. https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128685

Wang, B., Wang, J., 2021. Application of Artificial Intelligence in Computational Fluid Dynamics. Ind. Eng. Chem. Res. 60, 2772–2790. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c05045

Wang, X., Jia, J., & Wang, Y. (2017). Combination of photocatalysis with hydrodynamic cavitation for degradation of tetracycline. *Chemical Engineering Journal*, *315*, 274–282. https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.01.011

Wang, X., & Zhang, Y. (2009). Degradation of alachlor in aqueous solution by using hydrodynamic cavitation. *Journal of Hazardous Materials*, *161*(1), 202–207. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.03.073

Yadav, M., Sharma, J., Yadav, R. K., & Gole, V. L. (2021a). Microbial disinfection of water using hydrodynamic cavitational reactors. *Journal of Water Process Engineering*, *41*.

Yadav, M., Sharma, J., Yadav, R. K., & Gole, V. L. (2021b). Microbial disinfection of water using hydrodynamic cavitational reactors. In *Journal of Water Process Engineering* (Vol. 41). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102097

Yusof, N. S. M., Babgi, B., Alghamdi, Y., Aksu, M., Madhavan, J., & Ashokkumar, M. (2016). Physical and chemical effects of acoustic cavitation in selected ultrasonic cleaning applications. *Ultrasonics Sonochemistry*, *29*, 568–576. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.06.013

Zaki, H. A., & Zaher, K. (2022). A comparative study of landfill leachate treatment using advanced oxidation photochemical processes, ozonation process and hydrogen peroxide

systems. *Desalination and Water Treatment*, *261*, 107–119. https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28496

Zarei, A., Biglari, H., Mobini, M., Dargahi, A., Ebrahimzadeh, G., Narooie, M. R., Mehrizi, E. A., Yari, A. R., Mohammadi, M. J., Baneshi, M. M., Khosravi, R., & Poursadeghiyan, M. (2018). Disinfecting poultry slaughterhouse wastewater using copper electrodes in the electrocoagulation process. *Polish Journal of Environmental Studies*, *27*(4), 1907–1912. https://doi.org/10.15244/pjoes/78150

Zezulka, Š., Maršálková, E., Pochylý, F., Rudolf, P., Hudec, M., & Maršálek, B. (2020). High-pressure jet-induced hydrodynamic cavitation as a pre-treatment step for avoiding cyanobacterial contamination during water purification. *Journal of Environmental Management*, *255*. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109862

Zheng, H., Zheng, Y., & Zhu, J. (2022). Recent Developments in Hydrodynamic Cavitation Reactors: Cavitation Mechanism, Reactor Design, and Applications. In *Engineering* (Vol. 19, pp. 180–198). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.04.027

Zhou, W., Wang, X., Liu, B., Zhao, M., Zhang, Y., Ma, Y., 2022. Machine Learning Method to Predict Solid Propellant Breakage Efficiency of Cavitation Water Jet. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 47, e202200131. https://doi.org/10.1002/prep.202200131

Zuluaga-Vasco, J., & Zambrano-Franco, D. (1993). *Avances Técnicos 187 - Manejo del Agua en el Proceso de Beneficio Húmedo para Control de Contaminación*. https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/4254/1/avt0187.pdf

Agradecimientos

A Minciencias (Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación) y al Sistema General de Regalías CTeI por el apoyo y financiación del proyecto denominado «Desarrollo y transferencia de una tecnología de desinfección física de aguas residuales vertidas, por cavitación hidrodinámica y vorticidad, para garantizar la sostenibilidad del recurso agua, en el río Fonce – San Gil Santander, BPIN 2021000100514», del cual se derivan los resultados presentados en este libro.

A la Fundación Universitaria San Gil, UNISANGIL, como entidad ejecutora del proyecto.

A las instituciones aliadas en la ejecución del proyecto: Universidad Autónoma de Bucaramanga, Universidad de Santander, Universidad Santo Tomás, Corporación Autónoma de Santander, Cámara de Comercio Bucaramanga, Alcaldía de San Gil, y Gobernación de Santander, por su participación y aportes desde diferentes puntos de vista.