

Estudio de vigilancia tecnológica de los sistemas de cavitación hidrodinámica como
alternativa para el tratamiento de aguas residuales

Angélica Maldonado Reyes

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Químico

Director

María Mercedes Duarte Mantilla

MSc. Ingeniería Química

Codirector

Giovanni Morales Medina

Doctor en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Ingeniería Química
Bucaramanga
2025

Dedicatoria

A mi familia, mi mayor fortaleza

*A mis padres y a mi hermano, por ser mi sostén incondicional, por llenarme de amor y
ser mi refugio en cada paso de este camino.*

*A ti, mami Deisy, mi guía y mi inspiración: por tu sabiduría, por empujarme a ser mejor
y por ser el ejemplo de fortaleza que siempre necesité.*

*A ti, papi Bladimiro: por tu confianza inquebrantable en mí, por tu apoyo silencioso pero
constante y por ser mi tranquilidad en los momentos de incertidumbre.*

*Y a ti, Sebastián, mi hermano: por ser mi motivación diaria, por recordarme que cada
esfuerzo vale la pena y por darme una razón más para perseguir nuestros sueños.*

Sin ustedes, nada de esto habría sido posible.

Con todo mi amor.

Agradecimientos

A mis directores de tesis, la profesora María Mercedes y el profesor Giovanni Morales, por guiarme con sabiduría, paciencia y dedicación en este proyecto. Gracias por compartir conmigo su conocimiento, su amor por la enseñanza y por inspirarme no solo como profesional, sino también como persona.

A mi querida amiga Julissa, cómplice incondicional de esta travesía universitaria. Gracias por ser mi apoyo en los días grises y mi celebración en los brillantes, gracias por haber llenado estos años de risas, aprendizajes y recuerdos invaluable. Tu amistad ha sido uno de los mayores regalos que me ha dado esta etapa. Aunque el camino pueda llevarnos por rutas distintas, sé que ninguna distancia borrará este lazo tan especial.

A Cristian, mi mejor amigo y hermano del alma, por escucharme, aconsejarme y estar presente en cada paso, incluso en los más difíciles. Gracias por tu lealtad y por iluminar mis días con tu amistad.

A Alan, por ser y estar. Guardarás siempre un lugar especial en mi corazón. Dondequiera que la vida te lleve, deseo que encuentres la calma que mereces, días llenos de felicidad y todos aquellos sueños que alguna vez compartiste conmigo. Que el tiempo te trate con bondad y que nunca falten en tu vida sonrisas ni paz. Gracias por ser parte de mi historia.

A todos aquellos que, de una forma u otra, contribuyeron a mi crecimiento durante este proceso. Gracias por compartir conmigo sus conocimientos, por creer en mi potencial y por recordarme la profesional y la persona que estoy destinada a ser.

Gracias, infinitamente, por confiar en mí.

Tabla de contenido

Introducción	12
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo General	14
1.2 Objetivos específicos	14
2. Marco de referencia	15
2.1 Marco conceptual	15
2.2 Marco Teórico	16
2.3 Marco Legal	18
3. Metodología	19
3. 1 Fase 1: Bibliometría basada en el protocolo PRISMA	19
3.1.1 Identificación de las referencias utilizando ecuaciones de búsqueda.	19
3.1.2 Cribado Según el Tema de Aplicación de Artículos.....	22
3.1.3 Cribado Según el Tema de Aplicación de Patentes	24
3. 2 Fase 2: Lectura y Análisis de los Artículos y Patentes	25
3. 3 Fase 3: Contraste de viabilidad de los dispositivos	27
3.3.1 Comparación de los distintos dispositivos de cavitación hidrodinámica.....	27
3. 4 Fase 4: Niveles TRL	28
3.4.1 Asignación del respectivo nivel TRL de los dispositivos y su aplicación, según la revisión de literatura	28
4. Resultados	28
4.1 Análisis bibliométrico	28
4.1.1 Entorno: Artículos académicos	28
4.1.2 Entorno: Patentes	34
4.2 Documentos relevantes de la Cavitación Hidrodinámica	41
4.3 Influencia de los dispositivos o reactores de cavitación hidrodinámica en tratamiento de aguas residuales	42
4.3.1 Dispositivos Venturi.....	44
4.3.2 Dispositivo Basado en Plato/Placa de Orificio	46
4.3.3 Dispositivo Rotatorio Tipo Rotor-Estator	48

4.3.4 Dispositivo Tipo Diodo Vórtice.....	50
4.3.5 Estudios que Reportan más de un Tipo de Dispositivo.....	51
4.4 Patentes Relevantes de la Cavitación Hidrodinámica	52
4.5 Ventajas y desventajas	54
4.6 TRL supuesto	55
5. Conclusiones.....	59
6. Recomendaciones.....	62
Referencias Bibliográficas.....	64
Apéndices.....	73

Lista de tablas

Tabla 1 Niveles TRL, actividades de I+D+i.....	17
Tabla 2 Palabras clave.....	20
Tabla 3 Estrategia de búsqueda bases de datos	21
Tabla 4 Estrategia de búsqueda de patentes	22
Tabla 5 Criterios de inclusión y exclusión para la revisión de artículos	23
Tabla 6 Criterios de inclusión y exclusión para la revisión de patentes.....	25
Tabla 7 Criterios de análisis para la evaluación de sistemas de cavitación hidrodinámica en el tratamiento de aguas residuales	26
Tabla 8 Criterios de análisis para patentes de sistemas de cavitación hidrodinámica en tratamiento de aguas residuales	27
Tabla 9 Resultados de la búsqueda de documentos en las bases de datos	29
Tabla 10 Ventajas y desventajas por dispositivo	54
Tabla 11 TRL supuesto artículos académicos	55
Tabla 12 TRL supuesto para patentes.....	58

Lista de figuras

Figura 1 Nube de palabras generada por VOSviewer basada en los resultados de la búsqueda avanzada realizada en Scopus, Web of Science, PubMed y Taylor & Francis	30
Figura 2 Documentos por año basada en el total de la búsqueda	31
Figura 3 Autores más relevantes.....	32
Figura 4 Documentos por fuente	33
Figura 5 Patentes a lo largo del tiempo.....	35
Figura 6 Documentos por tipo de patente a) Distribución porcentual b) Evolución temporal....	36
Figura 7 Estado legal de las patentes	37
Figura 8 Patentes por jurisdicción	38
Figura 9 Principales inventores.....	39
Figura 10 Códigos a) CPC b) IPCR.....	40
Figura 11 Diagrama de flujo PRISMA 2020 para revisiones sistemáticas	41
Figura 12 Diagrama esquemático de las estructuras (izquierda) y mecanismos de los dispositivos (derecha) HC representativos en estudios previos, (a) Venturi y placa de orificio, (b) Rotor-estator c) Diodo vórtice	43
Figura 14 Diagrama esquemático del reactor de cavitación hidrodinámica (HC).....	44

Lista de Apéndices

Apéndice A Plantilla de diagrama de flujo PRISMA 2020 para revisiones sistemática	73
Apéndice B Artículos más citados	74
Apéndice C Reporte de investigación dispositivos de cavitación hidrodinámica tipo Venturi ...	75
Apéndice D Reporte de investigación dispositivos de cavitación hidrodinámica tipo Plato/Placa de orificio	76
Apéndice E Reporte de investigación dispositivos de cavitación hidrodinámica rotatorios	77
Apéndice F Reporte de investigación dispositivos de cavitación hidrodinámica tipo Diodo Vórtice	78
Apéndice G Reporte de investigación de múltiples dispositivos de cavitación hidrodinámica...	79

Resumen

Título: Estudio de vigilancia tecnológica de los sistemas de cavitación hidrodinámica como alternativa para el tratamiento de aguas residuales.*

Autores: Angélica Maldonado Reyes.**

Palabras clave: cavitación hidrodinámica, tratamiento de aguas residuales, degradación de contaminantes, desinfección.

Descripción: Este estudio de vigilancia tecnológica analizó diferentes sistemas de cavitación hidrodinámica (HC) como alternativa para el tratamiento de aguas residuales, con el objetivo de evaluar su eficiencia, escalabilidad y madurez tecnológica (TRL, por sus siglas en inglés *Technology Readiness Level*). Los objetivos específicos incluyeron: revisar la literatura científica y patentes mediante el protocolo PRISMA para identificar los dispositivos más relevantes (Venturi, placa de orificio, rotatorios y diodo vórtice); contrastar su viabilidad técnica según parámetros operativos (presión, caudal, eficiencia); y determinar su nivel de desarrollo tecnológico (TRL 1–9) para aplicaciones industriales.

La metodología combinó análisis bibliométrico y cualitativo. Se examinaron 506 artículos científicos de Scopus, Web of Science, PubMed y Taylor & Francis, junto con 50 registros de patentes de bases como Lens, cubriendo jurisdicciones clave (EE. UU., China, WIPO y Europa). El cribado sistemático se realizó con la herramienta Rayyan, aplicando los criterios PRISMA para seleccionar estudios relevantes, seguido de un análisis comparativo centrado en eficiencia de degradación, el tipo de agua y escalabilidad. Los TRL se asignaron según aplicando los criterios propuestos para tal fin por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia (Minciencias), permitiendo clasificar el grado de desarrollo de las distintas soluciones evaluadas.

Los resultados revelaron que los dispositivos tipo diodo vórtice presentaron el mayor nivel de desarrollo (TRL ≥ 6) y logrando una reducción de hasta el un 85% de reducción de DQO en efluentes industriales, especialmente cuando se empleó aireación como técnica complementaria. En cuanto a los sistemas rotatorios (TRL 4) evidenciaron un desempeño sobresaliente en desinfección, logrando la eliminación completa (100%) de *E. coli* y *E. faecalis* en minutos.

Los dispositivos Venturi (TRL 4–5) también mostraron altas eficiencias de degradación cuando se integraron con oxidantes, alcanzando rendimientos superiores al 90%. De igual forma, las placas de orificio (TRL 4–6) resultaron eficaces en aplicaciones de desinfección, con efectividades entre el 81% y el 92% en la inactivación de patógenos.

No obstante, tanto los sistemas Venturi como las placas de orificio presentaron limitaciones en términos de escalabilidad, lo cual restringe su implementación a escenarios específicos o de menor escala. De esta manera, el estudio proporciona una visión integral del estado del arte en tecnologías de cavitación hidrodinámica aplicadas al tratamiento de aguas residuales, resaltando su eficiencia, nivel de madurez tecnológica y viabilidad de implementación. Los hallazgos permiten establecer criterios técnicos para seleccionar los dispositivos más adecuados según el tipo de efluente y los objetivos de tratamiento, contribuyendo así a orientar decisiones en I+D+i y estrategias de escalamiento industrial.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: María Mercedes Duarte Mantilla. MSc. Ingeniería Química. Codirector: Giovanni Morales Medina. Doctor en Ingeniería Química

Abstract

Title: Technology surveillance study of hydrodynamic cavitation systems as an alternative for wastewater treatment*

Author: Angélica Maldonado Reyes**

Key Words: hydrodynamic cavitation, wastewater treatment, pollutant degradation, disinfection.

Description: This technology surveillance study analyzed different hydrodynamic cavitation (HC) systems as an alternative for wastewater treatment, aiming to evaluate their efficiency, scalability, and technological maturity (Technology Readiness Level, TRL). The specific objectives included: reviewing scientific literature and patents using the PRISMA protocol to identify the most relevant devices (Venturi, orifice plate, rotary, and vortex diode); comparing their technical feasibility based on operational parameters (pressure, flow rate, efficiency); and determining their technological readiness level (TRL 1–9) for industrial applications.

The methodology combined bibliometric and qualitative analysis. A total of 506 scientific articles from Scopus, Web of Science, PubMed, and Taylor & Francis were examined, along with 50 patent records from databases such as Lens, covering key jurisdictions (U.S., China, WIPO, and Europe). Systematic screening was performed using Rayyan, applying PRISMA criteria to select relevant studies, followed by a comparative analysis focused on degradation efficiency, water type, and scalability. TRLs were assigned based on the criteria proposed by the Colombian Ministry of Science, Technology, and Innovation (Minciencias), allowing the classification of the development stage of the evaluated solutions.

The results revealed that vortex diode devices exhibited the highest development level (TRL ≥ 6), achieving up to an 85% reduction in COD (Chemical Oxygen Demand) in industrial effluents, particularly when aeration was used as a complementary technique. Meanwhile, rotary systems (TRL 4) demonstrated outstanding performance in disinfection, achieving complete elimination (100%) of *E. coli* and *E. faecalis* in minutes.

Venturi devices (TRL 4–5) also showed high degradation efficiencies when integrated with oxidants, reaching removal rates above 90%. Similarly, orifice plates (TRL 4–6) proved effective in disinfection applications, with pathogen inactivation efficiencies between 81% and 92%.

However, both Venturi systems and orifice plates presented scalability limitations, restricting their implementation to specific or small-scale scenarios. Thus, this study provides a comprehensive overview of the state of the art in hydrodynamic cavitation technologies for wastewater treatment, highlighting their efficiency, technological maturity, and implementation feasibility. The findings establish technical criteria for selecting the most suitable devices based on effluent type and treatment goals, thereby guiding R&D&I decisions and industrial scaling strategies.

* Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: María Mercedes Duarte Mantilla. MSc. Ingeniería Química. Codirector: Giovanni Morales Medina. PhD in Chemical Engineering.

Introducción

En el último siglo, la demanda de agua a nivel mundial ha aumentado debido a la alta tasa de crecimiento demográfico, la rápida urbanización, el desarrollo económico y las modalidades cambiantes de consumo. Además, factores como el cambio climático y el aumento de la frecuencia de los fenómenos meteorológicos extremos, como sequías e inundaciones, han intensificado esta presión sobre el recurso hídrico (Asociación Pacto Mundial, 2021). Se estima que, a nivel global la demanda de agua aumentará un 55% para 2050 (OCDE, 2012), lo que representa un desafío urgente para garantizar su sostenibilidad.

Colombia, a pesar de ser uno de los países con mayor riqueza hídrica del mundo, con una oferta de agua dulce de aproximadamente 2.132 km³ anuales (IDEAM, 2020), enfrenta desafíos críticos en la gestión de este recurso. La distribución desigual del agua es uno de los principales problemas: el 70% de la población colombiana vive en zonas donde solo se dispone de un 20% del recurso hídrico (IDEAM, 2020). Esta situación es aún más crítica regiones como La Guajira y el Caribe, donde la escasez de agua es un problema crónico. Según el DANE (2021), el 45% de la población rural en La Guajira no tiene acceso a agua potable, lo que deteriora aún más las condiciones de vida.

Los diferentes sectores que utilizan el recurso hídrico contribuyen a la generación de aguas residuales que contienen cargas contaminantes (bacterias, virus, parásitos), fertilizantes, pesticidas, fármacos, nitratos, fosfatos, plásticos y otros desechos. Estos contaminantes pueden afectar negativamente la calidad del agua y representar un riesgo para la salud humana y el medio ambiente (Iberdrola, 2021). De manera que, el tratamiento de estas aguas es clave para garantizar la adecuada disponibilidad en cumplimiento con las normas de vertimientos propias de cada país, así como proteger la salud pública y el recurso hídrico. Para hacer frente a estos requerimientos es

necesario identificar y apropiar tecnologías emergentes como lo es la biofiltración, la digestión anaeróbica y los humedales artificiales. Sin embargo, una de las alternativas más prometedoras es la cavitación hidrodinámica, tecnología que ha demostrado alta efectividad en el tratamiento de aguas residuales. Su eficacia se sustenta en cuatro ventajas clave: alta eficiencia energética, operación rentable, capacidad para inducir reacciones químicas de degradación y escalabilidad (Dular et al., 2015). Este proceso se basa en la formación, crecimiento y colapso de microburbujas, que generan condiciones extremas de presión y temperatura a nivel microscópico. Dichas condiciones favorecen la degradación de contaminantes orgánicos, la inactivación de microorganismos patógenos y la descomposición de compuestos tóxicos presentes en aguas residuales domésticas e industriales (Song et al., 2022).

No obstante, el desarrollo y escalamiento de esta tecnología enfrentan desafíos significativos, entre ellos: la falta de una comprensión profunda de sus mecanismos, la ausencia de métodos estandarizados de diseño y optimización de los dispositivos de cavitación, y las limitaciones económicas y técnicas asociadas a su implementación a gran escala. Para avanzar en su aplicación, es fundamental impulsar investigaciones en áreas como la simulación numérica, la optimización geométrica y el establecimiento de leyes de escalamiento (Sun et al., 2020).

En este contexto, un estudio de vigilancia tecnológica de los sistemas de cavitación hidrodinámica basada en metodologías de revisión sistemática de la literatura es clave para disponer de información que guíe la selección del dispositivo y las condiciones operacionales en función del tipo y la carga contaminante de las aguas residuales a tratar.

En este documento se propone el desarrollo de una vigilancia tecnológica basada en una búsqueda sistemática de artículos académicos y patentes, orientada a responder la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuáles son los niveles de madurez tecnológica (TRL), eficiencia

operativa, escalabilidad y potencial de aplicación industrial de los distintos dispositivos de cavitación hidrodinámica utilizados para el tratamiento de aguas residuales, según la evidencia científica y tecnológica disponible?

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Desarrollar un estudio de vigilancia tecnológica de la aplicación de la cavitación hidrodinámica para el tratamiento de aguas residuales

1.2 Objetivos específicos

- Realizar una revisión de los documentos relevantes relacionados con la cavitación hidrodinámica para el tratamiento de aguas residuales, por medio de la declaración PRISMA, definiendo los ámbitos de aplicación, los avances y los detalles operativos de cada dispositivo.
- Contrastar la viabilidad de los dispositivos utilizados en la cavitación hidrodinámica para el tratamiento de aguas residuales, con base en los resultados obtenidos de la declaración PRISMA, estableciendo los dispositivos frecuentemente utilizados y su factibilidad de escalamiento.
- Identificar los niveles TRL para los avances tecnológicos de la cavitación hidrodinámica según los resultados obtenidos de la declaración PRISMA, definiendo la factibilidad comercial de cada dispositivo.

2. Marco de referencia

2.1 Marco conceptual

Aguas residuales: son aguas que han sido utilizadas en actividades domésticas, industriales o comerciales y que contienen una variedad de contaminantes, incluyendo materia orgánica, microorganismos patógenos, químicos y sólidos suspendidos. Estas aguas requieren tratamiento antes de ser devueltas al medio ambiente para evitar la contaminación de los cuerpos de agua y proteger la salud pública (Reynolds, 2001).

Cavitación hidrodinámica: es un fenómeno fisicoquímico que consiste en la formación, crecimiento e implosión de burbujas en un líquido debido a pulsos de presión. Este proceso puede generarse por alteraciones en el flujo y la presión, causadas generalmente por constricciones específicas (como el tubo de Venturi, la boquilla y la placa de orificio), dispositivos basados en vórtices (como el diodo de vórtice) o la rotación mecánica de sistemas de tipo rotatorio, que se componen principalmente de un rotor y un estator (Y. Wang et al., 2014).

Durante el colapso de las burbujas, los gases en su interior se comprimen, generando condiciones extremas de presión (100 a 5000 atm) y temperatura (localmente 500 a 15,000 K) conocidos como *hot spots*, lo que favorece reacciones químicas en el líquido (B. Wang et al., 2021). Este fenómeno no solo produce altas energías térmico-mecánicas, sino también radicales libres ($H \cdot$ y $OH \cdot$) debido a la disociación de moléculas de agua atrapadas en las burbujas. Estos radicales se mezclan con el fluido, induciendo reacciones de oxidación o alterando mecanismos reactivos (ver Ec. 1 y Ec. 2) (Zheng et al., 2022). Así, la cavitación hidrodinámica (HC) opera como un proceso de oxidación avanzada (POA) bifásico, capaz de degradar contaminantes orgánicos persistentes en aguas residuales (Arrojo, 2007).





Patente: es un derecho exclusivo concedido por el estado para proteger una invención. Este derecho permite al inventor utilizar, explotar y comercializar su invención, además de impedir que terceros la utilicen sin su consentimiento (Superintendencia de Industria y Comercio, s.f).

2.2 Marco Teórico

La vigilancia tecnológica es una práctica sistemática de observación y análisis del entorno tecnológico, cuyo propósito es transformar la información en conocimiento útil para la toma de decisiones estratégicas (López et al., 2016). En este contexto, la revisión sistemática de la literatura (RS) constituye una herramienta fundamental para garantizar la efectividad de la VT, ya que permite evaluar de manera exhaustiva y protocolizada la información disponible sobre una tecnología específica (García, 2015). Entre las metodologías empleadas en la RS, destaca la declaración PRISMA, utilizada ampliamente en estudios de revisión. Este enfoque metodológico sigue un proceso estructurado que comienza con la identificación de registros obtenidos de diversas fuentes, como bases de datos, archivos, sitios web y búsquedas por citas, indicando el número de registros encontrados y aquellos eliminados por duplicación, automatización u otros motivos. Posteriormente, se detallan las etapas de cribado y evaluación de elegibilidad, donde se especifica cuántos registros fueron analizados, excluidos (con razones justificadas) y finalmente incluidos en la revisión (ver Anexo A).

El uso de herramientas de gestión en la revisión sistemática no solo optimiza el proceso y mejora la precisión, sino que también promueve estándares de calidad asegurando que el estudio sea exhaustivo, riguroso y transparente.

Rayyan es una inteligencia artificial que ofrece una cantidad de herramientas y combinaciones de funcionalidades avanzadas para gestionar revisiones sistemáticas de la literatura como lo son: organización, automatización y colaboración. Su uso puede mejorar significativamente la eficiencia y la calidad del proceso de revisión, permitiendo que la investigación se enfoque más en el análisis y la síntesis de la información relevante.

Tras realizar una revisión sistemática enmarcada en una vigilancia tecnológica orientada a la innovación y aplicación tecnológica, es fundamental valorar las tecnologías identificadas para determinar su viabilidad. Para ello, el uso de escalas de evaluación, como la escala de niveles de preparación tecnológica (TRL), permite establecer el grado de desarrollo y madurez de una tecnología en función de su aplicabilidad en distintos entornos.

En Tabla 1 se presentan los diferentes TRL y el entorno en el que cada nivel opera, según esta clasificación, los niveles del 1 al 4 definen una tecnología con factibilidad a escala laboratorio; los niveles 5 y 6 se muestran una factibilidad técnico y financiero de la tecnología en un entorno pequeño, mientras que del 7 al 9 definen una factibilidad a nivel de innovación (comercial).

Tabla 1

Niveles TRL, actividades de I+D+i

TRL	Definición	Actividades de I+D+i	Entorno
1	Principios básicos observados y reportados	Investigación básica	Laboratorio
2	Concepto y/o aplicación tecnológica formulada		
3	Función crítica analítica y experimental y/o prueba de concepto característica	Investigación aplicada	
4	Validación de componente y/o disposición de estos en entorno de laboratorio.		
5	Validación de componente y/o disposición de estos en un entorno relevante	Desarrollo tecnológico	Simulación

6	Demostración de sistema o prototipo en un entorno pertinente		
7	Demostración de sistema o prototipo en un entorno real		
8	Sistema completo y certificado a través de pruebas y demostraciones	Innovación	Real
9	Sistema probado con éxito en entorno real		

Nota. Adaptado de (Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación [CO] Colciencias, 2016, p. 11)

2.3 Marco Legal

En Colombia, las normas de tratamiento de aguas residuales están reglamentadas por diferentes disposiciones legales. Algunas de ellas son:

1. La Resolución 0631 de 2015: Esta norma, que reglamenta el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010 y actualiza el Decreto 1594 de 1984, establece los requisitos para el vertimiento de aguas residuales a cuerpos de agua superficiales y sistemas de alcantarillado público (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2013).
2. El Decreto 1076 de 2015: Este decreto reglamenta el uso y manejo del agua y los vertimientos, y establece las condiciones y requisitos para el uso agrícola e industrial de las aguas residuales tratadas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).
3. La Resolución 1256 de 2021 “por la cual se reglamenta el uso de las aguas residuales y se adoptan otras disposiciones”, establece las disposiciones relacionadas con el uso de las aguas residuales (estas son las utilizadas o servidas, de origen doméstico o no doméstico), y aplica a las autoridades ambientales y a los usuarios de dichas aguas, pero no aplica para el uso de las aguas como fertilizante o acondicionador de suelos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).

Estas normas buscan reducir y controlar la contaminación de los cuerpos de agua y promover el tratamiento adecuado de las aguas residuales, con el objetivo de proteger el medio ambiente y garantizar la salud pública.

3. Metodología

Para el presente proyecto de investigación, se consideraron tres fases relacionadas con los objetivos planteados principalmente.

3.1 Fase 1: Bibliometría basada en el protocolo PRISMA

3.1.1 *Identificación de las referencias utilizando ecuaciones de búsqueda.*

- **Estudios previos.** Para la identificación de estudios previos, se empleó inicialmente Google Académico como herramienta de exploración, permitiendo recuperar de manera exhaustiva términos y palabras clave relevantes en el campo de investigación. Estas palabras clave fueron refinadas y validadas mediante la consulta del tesoro de la UNESCO, lo que garantizó precisión en la terminología y coherencia con los estándares internacionales. A partir de este proceso, se construyó una ecuación de búsqueda sistemática y estructurada, optimizando la captura de literatura científica pertinente.

- **Selección de palabras clave.** Con el fin de asegurar la inclusión de estudios relevantes y de alta calidad sobre la cavitación hidrodinámica aplicada al tratamiento de aguas residuales, se emplearon palabras clave en inglés. Este enfoque se debe a que el inglés es el idioma predominante en la literatura científica y permite acceder a un mayor volumen de publicaciones de alta calidad. En la Tabla 2 se puede observar los términos que se consideraron relevantes para la investigación. El término de “cavitación hidrodinámica” es específico y hace referencia al fenómeno y la tecnología que se utiliza para el tratamiento de las aguas residuales, corresponde al tema central de la investigación. La expresión “tratamiento de aguas residuales” define el objetivo principal de

la investigación y permite incluir diversos aspectos entorno al tratamiento de aguas, garantizando una búsqueda amplia pero precisa. Finalmente, los términos “desarrollo” o “innovación” se incluyen con el fin de identificar los avances tecnológicos y de innovación del proceso, ayudando a encontrar estudios sobre la implementación de la tecnología.

Tabla 2

Palabras clave

No.	Palabras clave	
	Español	Inglés
1	Cavitación hidrodinámica	Hydrodynamic cavitation
2	Tratamiento de aguas residuales	Wastewater treatment or Sewage-treatment
3	Desarrollo	Development
4	Innovación	Innovation

- **Selección base de datos.** Para la selección de las bases de datos se tuvo en cuenta Scopus, Web of Science, Taylor & Francis y PubMed, ya que proporcionan acceso a una amplia gama de información relevante, con funciones avanzadas de búsqueda y análisis que facilitan la identificación de tendencias y avances en el campo tecnológico. Adicionalmente, para la búsqueda especializada de patentes se utilizó el software Lens, que permite explorar bases de datos globales de patentes con herramientas de filtrado y análisis exhaustivo. Se realizaron pruebas preliminares en las diferentes bases de datos académicas, incluyendo Lens para evaluar la relevancia y cantidad de resultados obtenidos. Además, fue crucial entender y utilizar las opciones y herramientas específicas que ofrece cada plataforma para optimizar la búsqueda y asegurar la recuperación de artículos y patentes significativos y de alta calidad.

• **Planteamiento Ecuación de Búsqueda.** A partir de los términos y expresiones clave identificados, se definió la ecuación de búsqueda booleana estructurada, adaptada a las sintaxis específicas de cada base de datos, como se detalla en la Tabla 3 y Tabla 4. La elección de operadores booleanos se basó en criterios de precisión y adaptabilidad a las funcionalidades de cada plataforma. Para optimizar la relevancia de los resultados en las bases académicas, se priorizaron campos específicos como “TITLE-ABS-KEY” (Scopus) o “[Title/Abstract]” (PubMed), dirigiendo la búsqueda a los elementos más significativos de los documentos (título, resumen y palabras clave). El operador “AND” conectó los conceptos clave para garantizar que los estudios recuperados abordaran todos los aspectos centrales de la revisión, mientras que “OR” incluyó variaciones terminológicas de un mismo concepto, ampliando el alcance sin comprometer la precisión. Por último, se implementaron filtros temporales que restringieron los resultados a publicaciones de la última década. Estos filtros se aplicaron directamente en las ecuaciones de búsqueda mediante operadores como “PUBYEAR” (Scopus) y “[Publication Date]” (Taylor & Francis), mientras que en Web of Science, PubMed y Lens se configuraron mediante las herramientas de filtrado propias de cada plataforma.

Tabla 3*Estrategia de búsqueda bases de datos*

Base de datos	Estrategia de búsqueda
Scopus	TITLE-ABS-KEY ("Hydrodynamic cavitation") AND ALL ("wastewater treatment" OR sewage-treatment) AND ALL (development OR innovation) AND PUBYEAR > 2013 AND PUBYEAR < 2025
Web of Science	(TI=(Hydrodynamic cavitation) OR AB=(Hydrodynamic cavitation) OR AK=(Hydrodynamic cavitation)) AND ALL=("wastewater treatment" OR "sewage-treatment") AND ALL=(development OR innovation)

PubMed	((Hydrodynamic cavitation[Title/Abstract]) AND (wastewater treatment OR sewage-treatment)) AND (development OR innovation)
Taylor & Francis	[All: "hydrodynamic cavitation"] AND [All: water treatment] AND [All: development] AND [Publication Date: (01/01/2014 TO 12/31/2024)]

Para la búsqueda de patentes en LENS se diseñó una estrategia paralela, adaptando la ecuación booleana inicial a los campos específicos de la plataforma como se observa en la Tabla 4.

Tabla 4

Estrategia de búsqueda de patentes

Software	Estrategia de búsqueda
Lens	(("hydrodynamic cavitation reactor" OR "hydrodynamic cavitation device")) AND (("sewage treatment" OR "wastewater treatment"))

Cabe destacar que, al igual que en Taylor & Francis (cuya sintaxis limita búsquedas específicas), la estrategia en Lens requirió ajustes iterativos para equilibrar exhaustividad y relevancia. En ambos casos, se verificó manualmente la alineación de los resultados con los objetivos de la revisión.

3.1.2 Cribado Según el Tema de Aplicación de Artículos

Para este proceso se seleccionó la inteligencia artificial Rayyan como herramienta debido a su capacidad para facilitar la selección y el análisis de artículos científicos, permitiendo la importación, eliminación de duplicados, filtrado, clasificación y anotación de la relevancia de cada documento.

- **Importación De Referencias.** Al realizar la búsqueda exhaustiva en las bases de datos. Las referencias obtenidas se exportaron en formatos como RIS o CSV y se importaron a la plataforma Rayyan.

- **Eliminación de duplicados.** Se eliminaron las referencias duplicadas utilizando la función de detección de duplicados Rayyan para asegurar que cada estudio se considerara una sola vez en el proceso de cribado.

- **Selección Criterios de Inclusión y Exclusión.** Para asegurar que el proceso de selección sea claro y objetivo y además garantizar un proceso de revisión transparente, libre de sesgos en la Tabla 5 se presentan los criterios de inclusión y exclusión.

Tabla 5*Criterios de inclusión y exclusión para la revisión de artículos*

Inclusión	Exclusión
Estudios que detallen, métodos, resultados y aplicaciones prácticas de la cavitación hidrodinámica para el tratamiento de aguas residuales.	No están disponibles en texto completo y no se pueden obtener a través de otros medios (Acceso restringido).
Revisiones sistemáticas. Artículos de revistas científicas.	No presentan datos suficientes.
Artículos con análisis estadístico adecuado y discusión de resultados detallada.	Artículos donde la cavitación no es el mecanismo principal de tratamiento.
Capítulos de libros especializados.	Artículos que no reportan condiciones operativas básicas (caudal, presión, temperatura, tipo de contaminante).
Estudios de los últimos diez años.	Falta de indicadores eficiencia de degradación o consumo energético.

- **Proceso de Cribado.** Tras la eliminación de duplicados se implementó un proceso de cribado en dos fases consecutivas. La primera fase consistió en una evaluación preliminar basada en título y resumen, donde se aplicaron rigurosamente los criterios de inclusión y exclusión predefinidos en la Tabla 5. En esta etapa se verificó que cada publicación abordara específicamente

la cavitación hidrodinámica como tecnología principal de tratamiento, descartando aquellos estudios que solo la mencionaban tangencialmente o como complemento a otros procesos. Paralelamente, se confirmó que los artículos presentaran datos metodológicos esenciales, incluyendo diseño experimental detallado y parámetros operativos clave.

La segunda fase comprendió una evaluación exhaustiva de calidad científica mediante la lectura completa de los textos seleccionados. Se prestó especial atención a la aplicabilidad práctica de los resultados, priorizando estudios con condiciones experimentales representativas de sistemas reales de tratamiento, esto garantizó que la revisión final se basara exclusivamente en investigaciones de alta calidad, técnicamente relevantes y metodológicamente robustas, proporcionando así una base sólida para el análisis comparativo y la extracción de conclusiones válidas.

3.1.3 Cribado Según el Tema de Aplicación de Patentes

Para el cribado de patentes se utilizó la misma plataforma de búsqueda por su capacidad para filtrar por criterios técnicos y legales, análisis de familias de patentes y citaciones, visualización de panoramas tecnológicos.

- **Selección Criterios de Inclusión y Exclusión.** La selección de patentes se rigió por criterios diseñados para garantizar la relevancia técnica y el potencial de aplicación industrial de las tecnologías analizadas. Estos criterios permitieron filtrar patentes que describen dispositivos/reactores de cavitación hidrodinámica específicamente diseñados para el tratamiento de aguas residuales, excluyendo aquellas con falta de detalle técnico o aplicaciones no relacionadas. En la Tabla 6 se detallan los criterios aplicados.

Tabla 6*Criterios de inclusión y exclusión para la revisión de patentes*

Inclusión	Exclusión
Patentes que describan dispositivos/sistemas de cavitación hidrodinámica.	Solicitudes abandonadas o no concedidas.
Aplicación específica en tratamiento de aguas residuales.	Aplicaciones ajenas al tratamiento de aguas residuales.
Diseños con parámetros operativos detallados (caudal, presión, geometría).	Diseños teóricos sin validación experimental.
Documentos completos accesibles en bases de datos.	Familias de patentes idénticas en distintas oficinas (se conservará la versión más detallada).

- **Proceso de Cribado.** Con el conjunto inicial de patentes se realizó un cribado primario basado en el título y resumen para eliminar documentos claramente irrelevantes (ej. Aplicaciones médicas o alimentarias). Posteriormente se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión detallados en la Tabla 6 mediante una revisión en profundidad de las secciones de descripción, figuras y reivindicaciones, enfocándose en parámetros operativos y evidencia de validación experimental. En una segunda fase, se depuró el grupo de patentes analizando el estado legal de las patentes (excluyendo solicitudes abandonadas) y consolidando familias de patentes, conservando únicamente la versión más detallada.

3.2 Fase 2: Lectura y Análisis de los Artículos y Patentes

Tras la selección de artículos, se realizó una lectura exhaustiva centrada en examinar la metodología, los hallazgos y las discusiones presentes en cada estudio, con el objetivo de identificar y extraer las variables clave relevantes que se presentan en la Tabla 7. La elección de

las variables específicas en este estudio (tipo de dispositivo, parámetros operativos, eficiencia de degradación y escalabilidad) responde a un enfoque metodológico estructurado para evaluar críticamente el estado del arte de la cavitación hidrodinámica aplicada a aguas residuales. Estas variables, organizadas en cinco categorías principales (Contexto del estudio, Configuración experimental, Parámetros operativos, Resultados y Escalabilidad), permiten realizar un análisis comparativo estandarizado entre diferentes investigaciones.

Tabla 7

Criterios de análisis para la evaluación de sistemas de cavitación hidrodinámica en el tratamiento de aguas residuales

Categoría	Variables específicas
Contexto del estudio	Autor, año, objetivo, tipo de agua residual
Configuración experimental	Tipo de dispositivo, geometría
Parámetros operativos	Presión, temperatura, caudal, tiempo de tratamiento, número de cavitación
Resultados	%Degradación (DQO), cinética
Escalabilidad	Volumen tratado, desafíos técnicos

Una vez establecido este marco analítico para la literatura científica, el proceso se extendió al análisis de patentes. Tras el cribado, se analizaron en profundidad las patentes seleccionadas, centrándose en: la correlación entre las reivindicaciones principales y la descripción técnica para identificar innovaciones clave; la extracción de datos cuantitativo que permitieran contrastar los hallazgos de los artículos; y la evaluación de la escalabilidad industrial. La Tabla 8 resume los

criterios de análisis específicos adaptados a las particularidades de las patentes aplicados para garantizar una recolección de datos sistemática.

Tabla 8

Criterios de análisis para patentes de sistemas de cavitación hidrodinámica en tratamiento de aguas residuales

Categoría	Variables específicas
Contexto legal	Número de patente, años, titular(es), jurisdicción, estado legal
Configuración técnica	Tipo de reactor, geometría
Parámetros operativos	Rangos de presión/caudal, condiciones operativas, sistemas de control
Eficiencia	% Reducción de contaminantes descrito en ejemplos, limitaciones reconocidas, % Degradación (DQO)
Escalabilidad industrial	Mención explícita a escalado

3.3 Fase 3: Contraste de viabilidad de los dispositivos

3.3.1 Comparación de los distintos dispositivos de cavitación hidrodinámica

A partir de los dispositivos de cavitación hidrodinámica identificados para el tratamiento de aguas residuales se realizó un análisis comparativo considerando variables técnicas clave como los parámetros de operación, el tipo de contaminante y la eficiencia de tratamiento también se tuvieron en cuenta criterios de escalabilidad, como el volumen máximo de agua residual a procesar y los desafíos técnicos identificados.

- **Categorización por dispositivos.** Los dispositivos se agruparon según su tipo (Venturi, placa de orificio, rotacionales y diodo vórtice), lo que permitió realizar comparaciones tanto

intragrupo —para identificar configuraciones óptimas dentro de cada tipo— como intergrupar, con el fin de establecer ventajas relativas entre tecnologías, dependiendo del contexto de aplicación.

3.4 Fase 4: Niveles TRL

3.4.1 Asignación del respectivo nivel TRL de los dispositivos y su aplicación, según la revisión de literatura

La asignación del nivel de TRL se realizó mediante un enfoque integral que combinó la revisión sistemática de literatura científica, el análisis de patentes. Para ello, se adaptaron los criterios de la Tabla 1 (basada en MinCiencias, 2016), incorporando indicadores específicos de madurez comercial, como: la existencia de prototipos funcionales desarrollados por spin-offs, la validación en entornos industriales colaborativos, y la comercialización activa por startups.

4. Resultados

4.1 Análisis bibliométrico

4.1.1 Entorno: Artículos académicos

La Tabla 9 detalla los resultados de la búsqueda documental realizada en las bases de datos seleccionadas, alineada con los criterios metodológicos establecidos. Los datos revelan que Scopus registra la mayor cantidad de documentos recuperados bajo la estrategia de búsqueda definida, destacando su relevancia como fuente prioritaria en este estudio. Como se observa en la Tabla 6 (columna 3), los documentos únicos, aquellos identificados de forma exclusiva por cada base de datos suman un total de 506. Este conjunto de publicaciones no redundantes, derivadas exclusivamente de la eliminación sistemática de documentos duplicados, sirve como base para el análisis de enfoques predominantes en la investigación. A partir de estos resultados, se realizó el análisis bibliométrico, evaluando tendencias de publicación, autores relevantes, documentos más citados y distribución de palabras clave.

Tabla 9*Resultados de la búsqueda de documentos en las bases de datos*

Base de datos	Documentos totales	Documentos sin duplicados
Scopus	344	330
Web of Science	54	27
PubMed	38	12
Taylor & Francis	142	137

En este sentido, la Figura 1 complementa los resultados al visualizar, mediante una nube de palabras, los términos clave asociados a dichos documentos, lo que permite identificar patrones lingüísticos y focos de investigación predominantes, lo que fundamenta la organización del estudio en cuatro dimensiones centrales. La primera se relaciona con los procesos de oxidación, lo cual se refleja en la alta frecuencia de términos como *cavitation* y *oxidation* en la nube de palabras. Esto sugiere que la cavitación hidrodinámica es estudiada principalmente como una tecnología capaz de inducir reacciones oxidativas mediante la generación de especies reactivas, útiles para la degradación de contaminantes presentes en aguas residuales.

Un segundo eje temático se centra en aplicaciones de desinfección, con términos como "disinfection", "Escherichia coli" y "bacteria", que reflejan el potencial de esta tecnología para la inactivación microbiana. Paralelamente, se observa un enfoque en contaminantes específicos, particularmente compuestos farmacéuticos ("carbamazepine", "diclofenac") y pesticidas, lo que indica las principales líneas de aplicación.

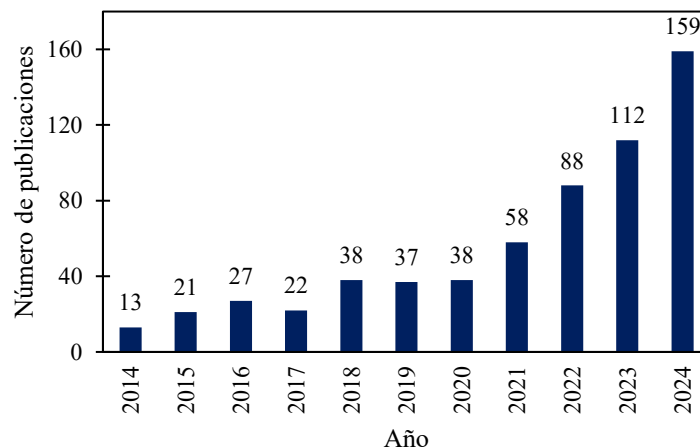
Desde la perspectiva de optimización de procesos, emergen términos como "energy efficiency", "computational fluid dynamics" y "cavitation number", que denotan investigaciones

presentados en la Figura 2. La producción científica pasó de 13 documentos en 2014 a 159 en 2024, con un incremento particularmente notable en el periodo 2021-2024, que concentra el 72% del total de publicaciones registradas.

Este patrón de crecimiento coincide con lo reportado en la literatura científica reciente, que señala que las investigaciones en este campo inicialmente se centraron en el desarrollo conceptual y que actualmente están evolucionando hacia estudios aplicados como la optimización del proceso a escala industrial y la evaluación de la viabilidad económica. La Figura 2 muestra claramente tres fases diferenciadas: un periodo inicial de producción moderada (2014-2017), una fase intermedia de estabilización (2018-2020), y un crecimiento acelerado en los últimos años (2021-2024).

Figura 2

Documentos por año basada en el total de la búsqueda



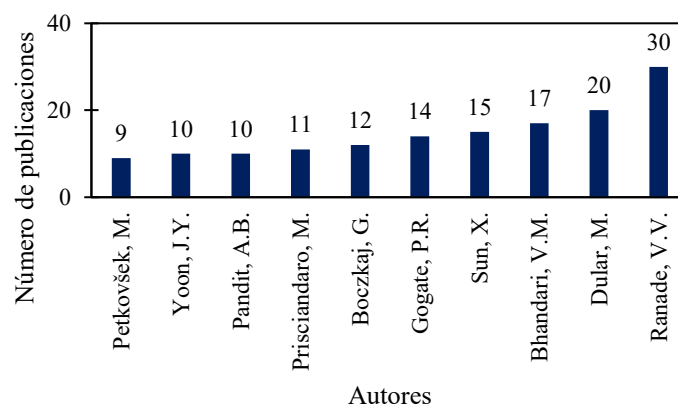
Si bien el análisis cuantitativo no permite establecer correlaciones directas con el contenido de las investigaciones, el marcado aumento en la producción científica sugiere un mayor interés en la tecnología y podría indicar su transición hacia etapas más maduras de desarrollo.

Este crecimiento se ve reflejado en la productividad de los investigadores, como evidencia la Figura 3, que muestra el panorama de los autores más productivos, donde sobresale Ranade V.V. como el investigador con mayor contribución en el campo, con 30 publicaciones. Ranade ha consolidado su liderazgo a través de publicaciones principalmente en *Ultrasonics Sonochemistry*, revista líder en publicación de artículos de calidad con contribuciones relacionadas con los procesos inducidos por cavitación (acústica o hidrodinámica) (*Ultrasonics Sonochemistry*, 1994).

El análisis bibliométrico también identifica a otros investigadores relevantes como Dular, M., Bhandari, V., Gogate, P., cuyas contribuciones aparecen representadas en la Figura 3. La distribución geográfica de estos autores principales (con presencia destacada en instituciones europeas e indias) sugiere que estas regiones son centros activos de investigación en el campo. Cabe destacar que la productividad científica de Ranade supera significativamente a la de otros investigadores, lo que refleja su papel central en el desarrollo de esta tecnología.

Figura 3

Autores más relevantes

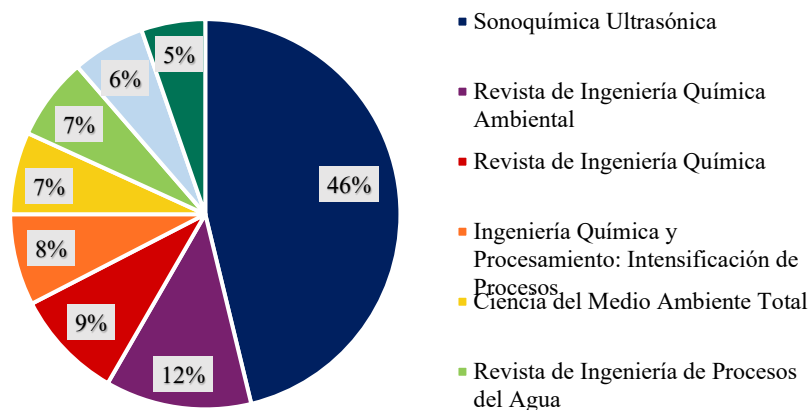


La Figura 4 revela la distribución de publicaciones por revistas científicas, siendo *Ultrasonics Sonochemistry* la fuente predominante con 61 documentos (46% del total). Esta

concentración explica por qué autores líderes como Ranade, V. priorizan esta plataforma. Destaca también el enfoque en sostenibilidad ambiental, representado por revistas como *Journal of Environmental Chemical Engineering* (12.1%), *Chemical Engineering Journal* (9.1%) e *Chemical Engineering and Processing* (7.6%). Esto refleja la prioridad por soluciones alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), donde la cavitación hidrodinámica emerge como una alternativa prometedora por su capacidad de degradar contaminantes sin requerir aditivos químicos, reduciendo así la huella ambiental de los procesos de tratamiento.

Figura 4

Documentos por fuente



Los artículos con mayor impacto científico en el campo de la cavitación hidrodinámica identificados a partir del número de citas y recopilados en el Anexo B, evidencian contribuciones científicas más influyentes y las principales tendencias de investigación.

Los trabajos de Dular et al. (2015) y Sun et al. (2020) representan contribuciones fundamentales complementarias en el desarrollo de la cavitación hidrodinámica para tratamiento de aguas. Mientras el primero que recibió 224 citas, validó la tecnología a escala industrial demostrando su eficacia contra patógenos y contaminantes emergentes, el segundo (101

citaciones) profundizó en la optimización de reactores rotacionales especializados para desinfección, estableciendo parámetros operativos clave.

En contraste, los artículos con menor número de citaciones (entre 30-50) como los de Zheng et al. (2022), Patil et al. (2021) y Cerecedo et al. (2018) representan investigaciones más especializadas, centradas en aspectos técnicos específicos como diseños de reactores o dispositivos avanzados, tratamientos para contaminantes particulares o mecanismos físicos detallados. Aunque menos citados, estos estudios proporcionan soluciones técnicas valiosas para problemas concretos y demuestran la evolución del campo hacia aplicaciones más precisas.

Un análisis temporal muestra que los artículos más citados tienden a ser los más antiguos (2015-2018), lo que refleja el tiempo necesario para acumular impacto científico. Sin embargo, trabajos recientes (2020-2022) ya muestran citaciones considerables, indicando que el campo mantiene una trayectoria de investigación activa, además, esta distribución muestra que las investigaciones sobre cavitación hidrodinámica para tratamiento de aguas abarcan desde estudios fundamentales hasta aplicaciones específicas, con énfasis particular en la eliminación de contaminantes y la optimización de procesos.

4.1.2 Entorno: Patentes

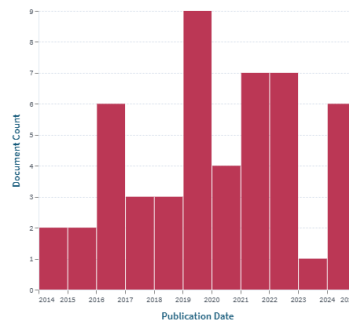
La búsqueda aplicada en Lens arrojó un total de 50 registros de patentes, correspondientes a 36 familias simples y 35 familias extendidas. Esta selección cubre jurisdicciones clave como China (CN), Estados Unidos (US), la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (WO-WIPO) y, patentes europeas.

Como se aprecia en la Figura 5, El análisis del número de patentes publicadas entre 2014 y 2024 revela un comportamiento marcadamente fluctuante. Durante los primeros años, de 2014 a

2015, la cantidad de registros se mantuvo baja y estable, con solo dos documentos anuales. A partir de 2016, se observa un crecimiento, alcanzando un primer pico en 2016 con seis patentes. Sin embargo, este aumento fue seguido por una reducción en 2017 y 2018, donde el número de registros descendió nuevamente a tres documentos por año. El año 2019 destaca como el punto más alto del periodo, con un máximo de nueve patentes publicadas. Posteriormente, la tendencia muestra una caída significativa en 2020, con solo cuatro documentos, pero se recupera en 2021 y 2022, estabilizándose en siete patentes anuales. El año 2023 representa el valor mínimo de toda la serie, con apenas una patente registrada, lo que evidencia una fuerte disminución. Finalmente, en 2024 se observa una recuperación importante, con seis patentes. En conjunto, estos datos reflejan una dinámica de altibajos en la producción de patentes, posiblemente influida por factores externos o internos que afectan la actividad innovadora año tras año.

Figura 5

Patentes a lo largo del tiempo



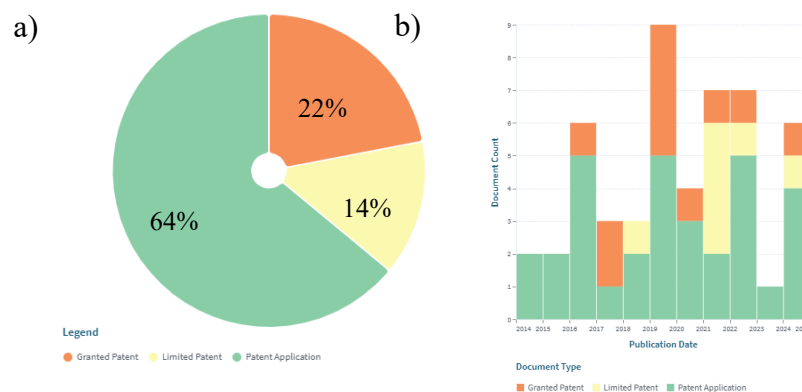
Para complementar el estudio de la evolución temporal de patentes, la Figura 6a permite observar una clara predominancia de las solicitudes de patentes (Patent Applications) sobre los otros tipos, representando el 64% del total de documentos registrados entre 2014 y 2024. Las patentes concedidas (Granted Patents) ocupan el segundo lugar con un 22%, mientras que las patentes limitadas (Limited Patents) son las menos frecuentes, con solo un 14%. Esta distribución

porcentual indica que el proceso de evaluación y aprobación de patentes es selectivo, ya que una proporción significativa de las solicitudes no alcanza el estatus de patente concedida. Además, la presencia relativamente baja de patentes limitadas sugiere que este tipo de protección intelectual es menos común o aplicable en el contexto analizado.

Al examinar la evolución temporal en la Figura 6b, se observa que las solicitudes de patentes presentan fluctuaciones importantes, con picos en 2016, 2019 y 2022, seguidos de una caída notable en 2023. Este último año también destaca por la ausencia de patentes concedidas, lo que podría reflejar retrasos administrativos o un cambio en las tendencias de innovación. Por otro lado, las patentes limitadas, aunque escasas, muestran un aumento sostenido desde su primera aparición en 2018, con un máximo histórico en 2021. Este año resulta particularmente interesante, ya que combina un número elevado de patentes limitadas con una disminución en las solicitudes de patentes, lo que sugiere que se presentó un ajuste en los criterios de concesión o un enfoque en patentes con alcances más restringidos. En conjunto, los datos reflejan un ecosistema dinámico donde las tendencias anuales pueden variar significativamente, aunque las proporciones generales se mantienen relativamente estables.

Figura 6

Documentos por tipo de patente a) Distribución porcentual b) Evolución temporal

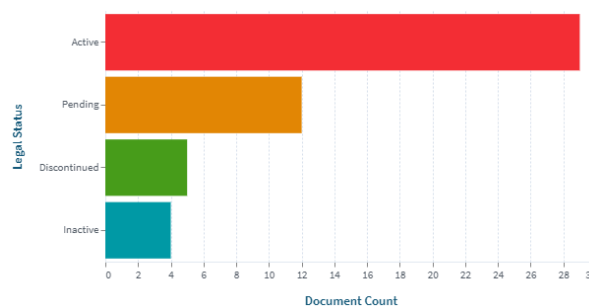


Tras analizar el comportamiento del tipo de patentes en la última década, El análisis del estado legal de las patentes, representado en la Figura 7, revela una distribución predominante de patentes en estado "Activa" que con 29 documentos representan la mayoría (58% del total). Esto indica que más de la mitad de las patentes analizadas mantienen vigencia y protección legal, lo que refleja un alto nivel de aprovechamiento o interés comercial en estas invenciones.

En segundo lugar, se encuentran las patentes en estado "Pendiente" (12 documentos, 24%), lo que evidencia una proporción significativa de solicitudes aún en proceso de evaluación o en etapas intermedias de trámite. Por otro lado, los estados "Interrumpida" (5 documentos, 10%) e "Inactiva" (4 documentos, 8%) representan una minoría, sugiriendo que, aunque existe un porcentaje de patentes abandonadas o sin mantenimiento, este no es un fenómeno generalizado. La presencia de estos últimos estados podría asociarse a factores como falta de rentabilidad, obsolescencia tecnológica o decisiones estratégicas de los titulares.

Figura 7

Estado legal de las patentes

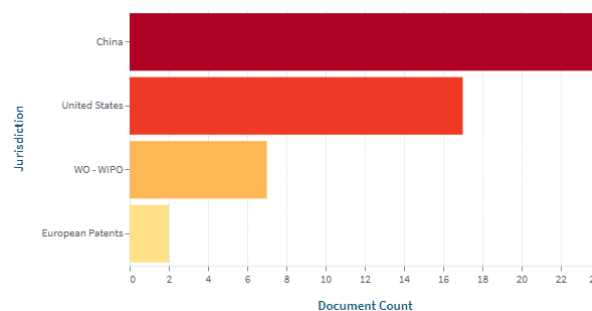


Por otro lado, los datos de distribución geográfica de las patentes presentados en la Figura 8 revelan un claro predominio de China, que con 24 documentos representa el 48% del total analizado, consolidándose como la jurisdicción con mayor actividad de protección intelectual en este conjunto. Le sigue Estados Unidos con 17 patentes (34%), lo que refleja su tradicional

liderazgo en innovación y su mercado estratégico para la comercialización de tecnologías. En tercer lugar, se encuentra WO - WIPO con 7 patentes (14%), indicando un interés moderado en protección internacional a través del sistema PCT (Patent Cooperation Treaty). Finalmente, las Patentes Europeas aparecen con solo 2 documentos (4%), lo que sugiere una menor prioridad en esta región comparada con las jurisdicciones anteriores. Este panorama geográfico sienta las bases para analizar a los principales inventores, ya que explica el ecosistema en el que operan. La predominancia china y estadounidense en el patentamiento coincide con la nacionalidad de muchos de los inventores más productivos, como se verá posteriormente, e indica que las instituciones de estos países están impulsando fuertemente la innovación en este campo.

Figura 8

Patentes por jurisdicción



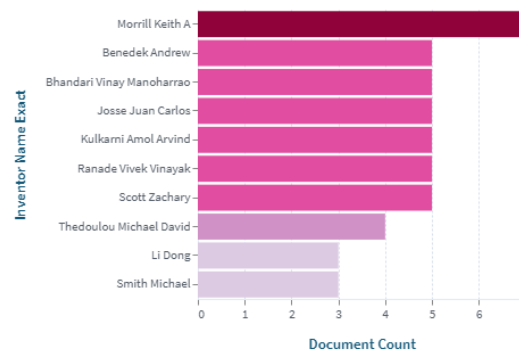
Complementando el análisis por jurisdicción, que reveló el predominio de China y EE. UU. en la producción de patentes, la Figura 9 muestra cómo la actividad innovadora se concentra en un grupo selecto de inventores clave. Morrill Keith A destaca como el inventor más productivo, con 7 patentes registradas, superando significativamente al resto. Este liderazgo individual representa el 14% del total analizado, evidenciando su papel central en el ecosistema de innovación estudiado. Le sigue un segundo grupo de seis inventores —Benedek Andrew, Bhandari Vinay Manoharrao, Josse Juan Carlos, Kulkarni Amol Arvind, Ranade Vivek Vinayak y Scott Zachary—, cada uno

con 5 patentes (10% del total). Esta distribución sugiere la existencia de equipos de investigación altamente productivos o áreas tecnológicas específicas donde estos inventores están focalizados. La presencia de múltiples colaboradores con cifras idénticas podría indicar patrones de trabajo en conjunto o una estrategia corporativa para la presentación de patentes.

La concentración observada entre los principales inventores complementa los hallazgos previos sobre jurisdicciones y estados legales, reforzando la idea de que la innovación tiende a agruparse en núcleos específicos, ya sea geográficos (como China y EE. UU.) o individuales. Además, el hecho de que los inventores más activos estén asociados a un número significativo de patentes sugiere que su trabajo podría estar vinculado a tecnologías clave con alto potencial comercial o estratégico. Este panorama resalta la importancia de identificar a estos innovadores clave, ya que su productividad parece ser un motor fundamental para la generación de propiedad intelectual en el ámbito analizado. Para futuras investigaciones, sería valioso cruzar estos datos con las jurisdicciones y el estado legal de las patentes, lo que permitiría determinar si existe una correlación entre los inventores más prolíficos y la vigencia o el alcance geográfico de sus patentes.

Figura 9

Principales inventores

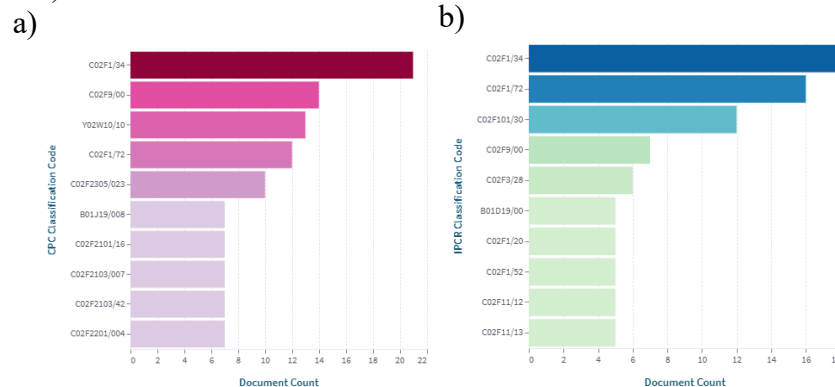


El análisis de los códigos CPC (Clasificación Cooperativa de Patentes) e IPCR (Clasificación internacional de patentes) revela patrones significativos en el desarrollo tecnológico de la cavitación hidrodinámica para tratamiento de aguas. En la Figura 10a (CPC), se observa un claro predominio del código C02F1/34 (tratamiento por cavitación/ultrasonidos) con 21 patentes, destacando su papel central en las innovaciones. Le siguen en importancia C02F9/00 (sistemas combinados de tratamiento) con 14 patentes y Y02W10/10 (tratamiento biológico) con 13, lo que evidencia una tendencia hacia soluciones integradas y sostenibles. Por otro lado, la Figura 10b (IPCR) también muestra el liderazgo de C02F1/34 (18 patentes), pero con énfasis en C02F1/72 (oxidación avanzada, 16 patentes) y C02F101/30 (contaminantes orgánicos, 12 patentes), sugiriendo un enfoque más detallado en los mecanismos de degradación química y tipos específicos de contaminantes.

Las diferencias entre ambos sistemas de clasificación reflejan perspectivas complementarias en la protección intelectual. Mientras el CPC (Figura 9a) prioriza aplicaciones prácticas y diseños de sistemas (evidenciado por los códigos Y02* relacionados con tecnologías ambientales), el IPCR (Figura 9b) proporciona mayor granularidad en procesos fisicoquímicos y contaminantes objetivo.

Figura 10

Códigos a) CPC b) IPCR

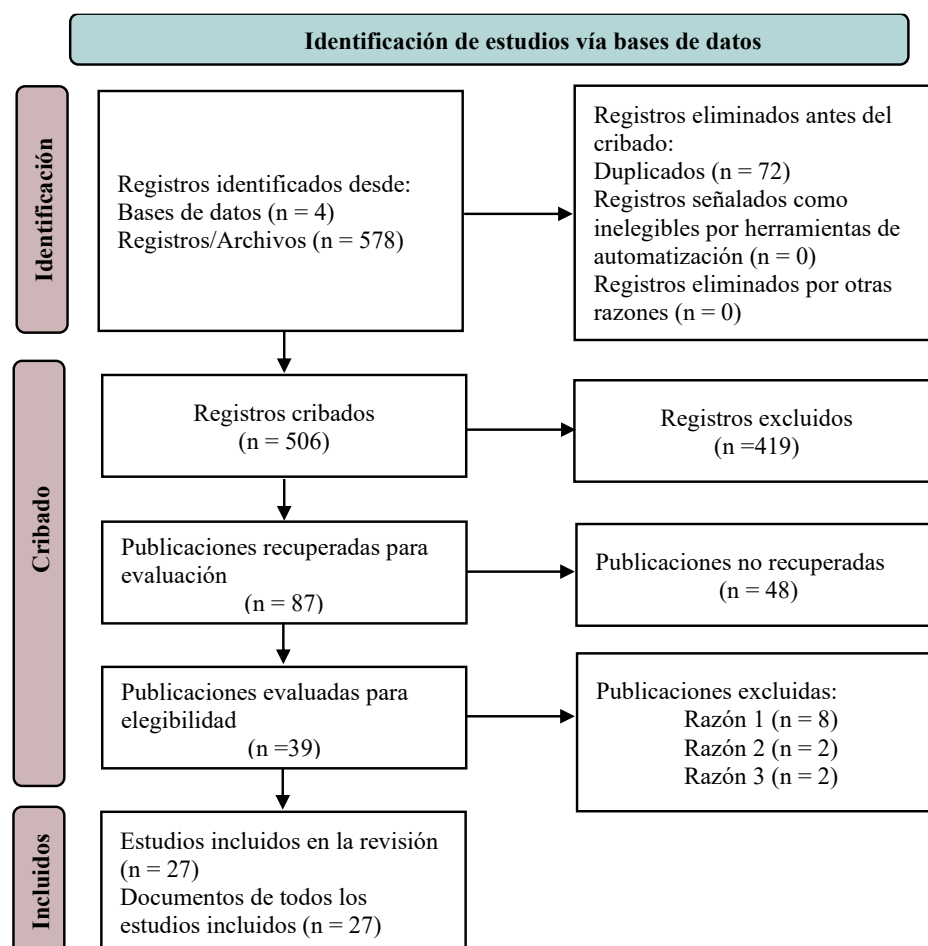


4.2 Documentos relevantes de la Cavitación Hidrodinámica

La Figura 11 presenta el diagrama de flujo PRISMA 2020 que detalla el proceso de selección de estudios para la revisión sistemática. Inicialmente, se identificaron 578 registros desde bases de datos, eliminándose 72 duplicados. Tras el cribado de 506 registros, se excluyeron 419 por no cumplir criterios iniciales, recuperándose 87 publicaciones para evaluación. De estas, 48 no pudieron obtenerse en texto completo, y tras evaluar 39 artículos, se excluyeron 12. Finalmente, 27 estudios cumplieron todos los criterios de elegibilidad y fueron incluidos en la revisión.

Figura 11

Diagrama de flujo PRISMA 2020 para revisiones sistemáticas



Nota. Adaptado de (Page et al., 2021)

Estos 27 estudios cumplieron rigurosamente con los criterios de elegibilidad establecidos en el protocolo de revisión. Estos trabajos destacan por su enfoque específico en cavitación hidrodinámica para el tratamiento de aguas residuales, aportando información técnica detallada, como parámetros operativos (presión, caudal, diseño del reactor), eficiencia en la degradación de contaminantes y caracterización del efluente tratado. Además, todos ellos presentan metodologías bien documentadas y datos experimentales reproducibles, lo que garantiza la calidad y homogeneidad del análisis.

Para asegurar la especificidad de la evaluación, se priorizaron estudios que aplicaran exclusivamente cavitación hidrodinámica, evitando interferencias con otras tecnologías, como la cavitación acústica. Esta selección rigurosa permitió consolidar una base de evidencia sólida y enfocada en los efectos atribuibles a esta técnica.

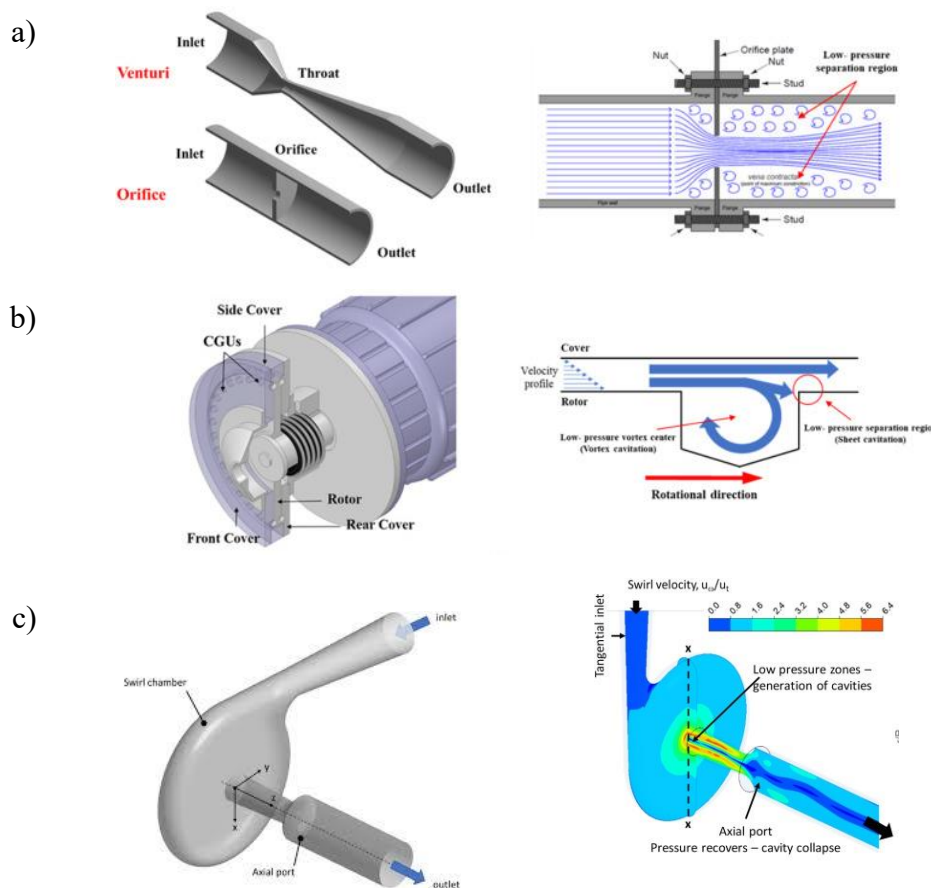
4.3 Influencia de los dispositivos o reactores de cavitación hidrodinámica en tratamiento de aguas residuales

Los dispositivos de cavitación hidrodinámica se dividen en dos categorías principales: aquellos con partes móviles y aquellos sin ellas. Los primeros generalmente incluyen un impulsor giratorio y un estator (rotor-estator), mientras que los segundos pueden clasificarse en dispositivos de flujo lineal y de flujo rotacional; en los sistemas de flujo lineal, como una placa de orificio o un tubo Venturi, el fluido se hace pasar por una restricción, lo que reduce la presión y genera cavitación. Por otro lado, en los dispositivos de flujo rotacional, se crea una zona de baja presión alrededor del eje de rotación del fluido (Patil et al., 2020). La cavitación hidrodinámica requiere diseños especializados para producir regiones de baja presión en el flujo. Esto se logra aumentando la velocidad lineal del líquido al hacerlo pasar por constricciones (como en los dispositivos convencionales) o incrementando su velocidad rotacional mediante un flujo vorticial, como en un

diodo de vórtice o un rotor estator, que extrae el fluido desde el centro del remolino (Simpson & Ranade, 2019). Estos diseños se ilustran en la Figura 12, donde se presentan esquemas representativos de HC: (a) un sistema de flujo lineal (Venturi/placa de orificio), (b) un dispositivo *rotor-estator* y (c) un diodo de vórtice. Cada configuración resalta los mecanismos físicos clave para generar cavitación: restricción geométrica en (a), interacción rotor-estator en (b) y flujo vorticial en (c).

Figura 12

Diagrama esquemático de las estructuras (izquierda) y mecanismos de los dispositivos (derecha) HC representativos en estudios previos, (a) Venturi y placa de orificio, (b) Rotor-estator c) Diodo vórtice

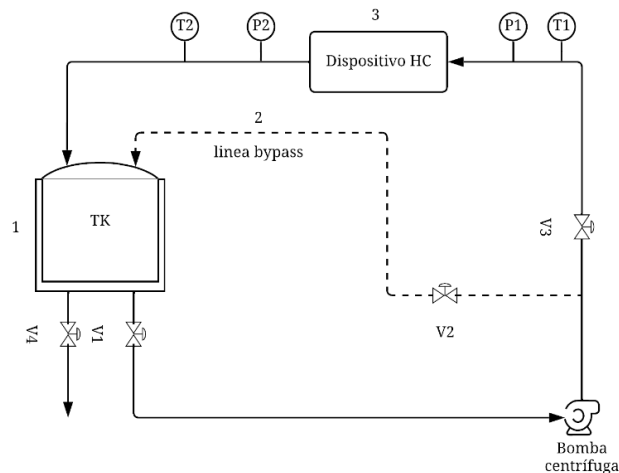


Nota. Adaptado de (Sun et al., 2020; Ranade et al., 2020)

La aplicación de estos dispositivos en un sistema integrado se muestra en la Figura 13, que describe el esquema convencional de un reactor de cavitación hidrodinámica. Este sistema consta de: (1) un tanque de almacenamiento que alimenta el fluido a la línea principal, (2) una línea de baipás para redirigir el flujo y (3) el dispositivo de cavitación (que puede corresponder a cualquiera de los tipos previamente descritos). Adicionalmente, el diagrama incluye válvulas de control (V), manómetros (P) y termómetros (T) en posiciones estratégicas para monitorear y regular el proceso.

Figura 13

Diagrama esquemático del reactor de cavitación hidrodinámica (HC)



Nota. Adaptado de (Patil et al., 2021; Capocelli et al., 2014)

4.3.1 Dispositivos Venturi

Los estudios revisados, cuyos datos se presentan en el Apéndice C, muestran que los dispositivos tipo Venturi son una tecnología versátil para el tratamiento de aguas residuales, aunque su eficiencia varía considerablemente según las características del agua a tratar y las condiciones operativas. Por ejemplo, Sežun et al. (2019) reportaron una reducción limitada del 11.5% en la DQO al aplicar HC sobre lodos secundarios de fábricas de pulpa y papel. De manera similar, Gogate et al. (2020) encontraron que la HC, aplicada de forma individual sobre aguas residuales

industriales y municipales, solo logró una reducción del 19.7% en la DQO. En contraste, Domingos et al. (2023) demostraron una eficiencia significativamente mayor al utilizar sistemas combinados que integran HC con ozonización y adsorción con carbón activado en lixiviados de vertederos, alcanzando reducciones superiores al 90% en DQO, color y turbidez.

La eficiencia del proceso mejora significativamente cuando se combina con procesos oxidativos avanzados, como demostraron varios investigadores. Gogate et al. (2020) observaron que la adición de H_2O_2 , O_3 o catalizadores puede incrementar la reducción de DQO hasta el 60% en aguas residuales industriales. Resultados aún más destacables fueron reportados por Jawale y Gogate (2019), quienes lograron la degradación completa (100%) de tiocianato de potasio mediante la combinación de HC con $H_2O_2/O_3/CuO$. Estos hallazgos coinciden con los de Dular et al. (2016), quienes lograron una eficiencia similar al alcanzar hasta un 96% de eliminación de p-Nitrofenol usando HC con H_2O_2 .

El análisis de los parámetros operativos revela patrones interesantes. Como reportaron Capocelli et al. (2014) y Dular et al. (2016), la presión de operación es un factor crítico, con rangos que varían desde 0.2 hasta 7.5 bar. Jawale y Gogate (2019) demostraron que presiones moderadas (4-5 bar) combinadas con agentes oxidantes adicionales se pueden alcanzar eficiencias superiores al 90%. Sin embargo, la comparación entre estudios se ve limitada por la escasa disponibilidad de datos sobre el número de cavitación (C_v), un parámetro clave para caracterizar la intensidad del fenómeno, según destacan Capocelli et al. (2014) y Dular et al. (2016) en sus trabajos, donde reportaron valores de C_v de 0.25-0.82 y 0.75-1.24 respectivamente.

A pesar de estos avances, persisten limitaciones importantes. Los resultados de Sežun et al. (2019) en el tratamiento de lodos industriales, así como la escasez de estudios a escala industrial con la excepción del trabajo piloto de Gogate et al. (2020) evidencian los desafíos que aún enfrenta

la implementación de la cavitación hidrodinámica a gran escala. Además, como muestran las diferencias metodológicas entre los estudios de Capocelli et al. (2014), Dular et al. (2016) y Jawale y Gogate (2019), la falta de estandarización en los protocolos experimentales limita la posibilidad de comparar sistemáticamente los resultados obtenidos en distintas investigaciones.

La revisión de estos datos permite concluir que los dispositivos Venturi ofrecen un balance interesante entre eficiencia y versatilidad para el tratamiento de aguas residuales mediante HC. No obstante, su aplicación óptima requiere: la integración con procesos complementarios (especialmente para aguas complejas), la optimización de parámetros operativos (presión, tiempo de residencia, adición de agentes oxidantes) y una mayor estandarización en el reporte de variables críticas como número de cavitación. Futuras investigaciones deberían centrarse en evaluar la escalabilidad de estos sistemas, considerando tanto aspectos técnicos como económicos, con el fin de viabilizar su implementación a nivel industrial.

4.3.2 Dispositivo Basado en Plato/Placa de Orificio

Los estudios reportados en el Apéndice D evidencian características destacables de los sistemas de placa de orificio para diversas aplicaciones en tratamiento de aguas. Estudios como los de Baghele et al. (2022) y Szaja et al. (2023) destacan su capacidad para tratar tanto contaminantes orgánicos como microbiológicos, con reducciones de hasta el 80.47% en DQO y más del 90% en bacterias como *Pseudomonas aeruginosa*. Un hallazgo crucial del trabajo de Baghele et al. (2022) fue la superioridad del Setup I ($C_v=0.023$) sobre el Setup II ($C_v=1.57$), demostrando que valores bajos ($C_v \leq 0.1$) de cavitación favorecen implosiones más controladas y efectivas. Este principio se corrobora en el estudio de Szaja et al. (2023), donde se observó mayor eficiencia en desinfección (81-92% contra patógenos) con número de cavitación de 0.085 a 6 bar, comparado con 0.163 a 4 bar.

Sin embargo, la eficiencia depende también críticamente de parámetros como la presión de operación, que según Wang et al. (2014) y Wu et al. (2015) debe mantenerse en rangos de 3.5 a 6 bar para maximizar los resultados. Además, la geometría del orificio juega un papel fundamental: configuraciones con múltiples agujeros circulares, como las evaluadas por Gaikwad et al. (2016) y Gajbhiye et al. (2024), muestran mejores desempeños (hasta 49.14% de reducción en DQO) comparadas con diseños estrellados o de un solo orificio.

La adición de agentes químicos complementaria mejora sustancialmente la eficiencia del proceso. Wu et al. (2015) observaron que el uso de catalizadores como el hierro (Fe) incrementó la degradación de fenol hasta un 44%, mientras que Wang et al. (2014) al incorporar ClO_2 , logro mejoras en el proceso de tratamiento entre el 67.3% al 81.8% subrayan la importancia de un enfoque integrado que considere simultáneamente parámetros geométricos, operativos y el uso de tecnologías complementarias.

A pesar de su potencial, los dispositivos de placa de orificio enfrentan desafíos importantes para su implementación a gran escala. La mayoría de los estudios, incluidos los de Gaikwad et al. (2016) y Gajbhiye et al. (2024), se han realizado a escala de laboratorio, lo que limita la comprensión de su escalabilidad y viabilidad económica en entornos industriales. Además, su eficiencia es inconsistente en matrices complejas, como aguas residuales textiles, donde las reducciones de DQO no superaron el 50% (Gajbhiye et al., 2024). Futuras investigaciones deberían centrarse en optimizar diseños geométricos, explorar sinergias con otros procesos avanzados y realizar pruebas piloto que validen su aplicabilidad en condiciones reales. En conclusión, aunque estos sistemas representan una alternativa prometedora, especialmente para desinfección y tratamiento de aguas con carga orgánica moderada, su adopción generalizada requerirá superar las limitaciones técnicas y metodológicas identificadas en la literatura,

4.3.3 *Dispositivo Rotatorio Tipo Rotor-Estator*

Los dispositivos de cavitación hidrodinámica rotacional representan una solución tecnológica adaptable cuyos resultados dependen críticamente de tres factores clave: el diseño geométrico del rotor, el tipo de agua a tratar y las condiciones operativas específicas. Como se observa en el Apéndice E, los estudios analizados abarcan desde lodos industriales hasta aguas contaminadas con patógenos, cada uno con requerimientos específicos de tratamiento. En el tratamiento de lodos industriales, Sežun et al. (2019) observaron que un RGHC podía incrementar la DQOs hasta en un 101% a escala piloto (2800 rpm), indicando una efectiva solubilización de materia orgánica compleja, aunque con una limitada mineralización (solo 12.2% de reducción en DQOt) a escala laboratorio (10000 rpm). Este comportamiento contrasta notablemente con su desempeño en aguas urbanas, donde Gostisa et al. (2021) lograron una reducción del 31% en DQO utilizando discos de pines, destacando así la importancia crítica del diseño geométrico, específicamente del diámetro, número y rugosidad de los pines. Por otro lado, estos sistemas han mostrado una excepcional eficacia como tecnología de desinfección, como lo demuestran Cerecedo et al. (2018) al lograr una eliminación completa (100%) de *E. coli* y *E. faecalis* en solo 8-20 minutos con un sistema rotor-estator, sin generar el problema común de células VBNC (viables, pero no cultivables), es decir, microorganismos que permanecen vivos pero que no pueden crecer en medios de cultivo convencionales, lo que dificulta su detección y representa un riesgo microbiológico latente.

La eficiencia de estos dispositivos depende fundamentalmente de parámetros operativos bien definidos, siendo la velocidad rotacional (V_r) la variable más crítica. Estudios como los de Sun et al. (2021) y Hou et al. (2022) han establecido que el rango óptimo para desinfección se encuentra entre 3000-4200 rpm, con el máximo desempeño a 4200 rpm donde se logra eliminación

completa de *E. coli* en solo 4 minutos. Estos hallazgos se complementan con el trabajo de Sun, Xuan et al. (2021), que, aunque no cuantificó eficiencia de tratamiento, proporcionó valiosa información hidrodinámica al demostrar que a 3600 rpm y 1.4 m³/h se generan los patrones de flujo más favorables para la cavitación. Los números de cavitación reportados (0.087-0.32 en los estudios que los incluyen) sugieren que estos sistemas operan en regímenes energéticamente eficientes cuando se comparan con dispositivos estáticos, particularmente en aplicaciones de desinfección.

Un aspecto destacable de esta tecnología es su escalabilidad, como lo demuestra el estudio de Sežun et al. (2019) donde el RGHC mantuvo su eficiencia al pasar de escala laboratorio (1 L) a piloto (500 L). Sin embargo, persisten importantes desafíos para su implementación industrial generalizada. Los sistemas como el ARHCR requieren condiciones operativas muy precisas (alta velocidad rotacional combinada con bajos caudales) para mantener su máxima eficiencia, lo que podría limitar su viabilidad económica a gran escala. Por otro lado, los diseños rotor-estator (Cerecedo et al., 2018) y los RGHC con discos de pines (Gostisa et al., 2021) muestran mayor adaptabilidad a condiciones variables, siendo particularmente prometedores para plantas de tratamiento urbanas.

En conclusión, los dispositivos rotatorios de cavitación representan una solución tecnológica altamente adaptable que puede configurarse para diversas aplicaciones, desde el pretratamiento de lodos industriales hasta la desinfección terciaria de efluentes. La selección del sistema óptimo debe basarse en un cuidadoso balance entre los objetivos de tratamiento específicos (hidrólisis vs. desinfección), los requerimientos energéticos y la posibilidad de integración con otros procesos de tratamiento. Los recientes avances en caracterización hidrodinámica y diseño geométrico, como los demostrados por Cerecedo et al. (2018) y Sun, Xuan et al. (2021), están

abriendo nuevos caminos para superar las actuales limitaciones y facilitar la transición de esta prometedora tecnología desde el laboratorio hasta aplicaciones industriales a gran escala.

4.3.4 Dispositivo Tipo Diodo Vórtice

Como se observa en el Apéndice F, las condiciones operativas emergen como factores determinantes en el desempeño de estos dispositivos. Los datos muestran que parámetros como la caída de presión (óptima entre 2-2.5 bar según Sarvothaman et al., 2018), la temperatura (con mejor rendimiento a 318 K), la presión de entrada (1.4 bar para máxima inactivación microbiana según Gaikwad y Ranade, 2016) y la aireación que aumenta el potencial de degradación influyen directamente en la eficiencia del proceso. Estos hallazgos coinciden con los resultados de Bhandari et al. (2016), quienes trabajando a escala piloto lograron un 85% de reducción en DQO y 60% en nitrógeno amoniacal en aguas residuales de la industria de fertilizantes.

Los datos revelan un aspecto particularmente interesante sobre el efecto de la escala en el rendimiento. Como se muestra en los resultados de Sarvothaman et al. (2018), el dispositivo pequeño mostró una eficiencia cuatro veces mayor para el acetato de etilo en comparación con sistemas de mayor tamaño (capacidad nominal 0.3 m³/hr y 1.2 m³/hr respectivamente). Sin embargo, Bhandari et al. (2016) demuestran que es posible mantener altos niveles de eficiencia en sistemas piloto (85% reducción de DQO) mediante la optimización de parámetros operativos. Adicionalmente, Gaikwad y Ranade (2016) evidencian que incluso en escala de laboratorio, el control preciso de la presión y el número de cavitación es crítico para aplicaciones microbiológicas, donde $C_v < 1$ (cavitación desarrollada) triplica la eficacia comparada con condiciones cercanas al umbral ($C_v \approx 1$).

En conclusión, los diodos vórtice representan una tecnología prometedora para el tratamiento de aguas residuales industriales y microbiológicas, son particularmente efectivos para

efluentes con alta carga orgánica o contaminación biológica, especialmente cuando se combinan con estrategias como aireación, control de temperatura y ajuste de presión para garantizar $C_v < 1$. Los resultados sugieren que futuras investigaciones deberían enfocarse en optimizar los diseños para mantener la alta eficiencia observada en diferentes escalas de aplicación y en diversificar los tipos de contaminantes estudiados (químicos vs. biológicos).

4.3.5 Estudios que Reportan más de un Tipo de Dispositivo

Por otro lado, los estudios que reportan más de un dispositivo analizados en el Anexo G revelan un patrón significativo: la mayoría de las investigaciones recientes (Pravin et al., 2021; Patil et al., 2021; Jain et al., 2019) centran sus comparaciones en dos configuraciones principales: el diodo vórtice y la placa de orificio. Esta tendencia no es casual, sino que responde a las características complementarias que ofrecen estos diseños para evaluar la eficiencia de la cavitación hidrodinámica.

El diodo vórtice emerge consistentemente como el dispositivo más eficiente en los estudios comparativos. del estudio de Pravin et al. (2021) muestra que diseño diodo vórtice supera a la placa de orificio en todas las condiciones evaluadas, particularmente en escenarios de baja presión (0.5 bar) donde mantiene una ventaja de 8-10 puntos porcentuales en la degradación de 4-amino fenol. Esta superioridad se acentúa notablemente con la adición de aireación, donde las diferencias de eficiencia pueden alcanzar hasta 40 puntos porcentuales (80% vs. resultados no especificados para orificio).

La placa de orificio, por su parte, sirve como referencia valiosa por ser una tecnología más establecida y de menor complejidad geométrica. Los datos de Patil et al. (2021) muestran que, aunque menos eficiente que el diodo vórtice (42% vs. 74% en degradación de 1-octanol con aireación), sigue siendo una alternativa viable, especialmente en aplicaciones donde se pueden

emplear mayores presiones (5-10 bar). Su comportamiento más predecible la convierte en un buen punto de comparación para validar el desempeño de diseños más innovadores como el diodo vórtice.

La prevalencia de estos dos dispositivos en la literatura reciente sugiere que representan los extremos de un espectro tecnológico: mientras el diodo vórtice encarna las configuraciones más avanzadas de cavitación rotacional, la placa de orificio permanece como estándar para cavitación de tipo estático. Esta dicotomía permite a los investigadores evaluar no solo la eficiencia absoluta, sino también la relación costo-beneficio entre complejidad del diseño y mejora en el rendimiento.

Los resultados compilados destacan que, aunque el diodo vórtice requiere inversiones iniciales mayores en diseño y fabricación, sus ventajas operativas - especialmente en condiciones de baja presión y con aireación - lo posicionan como la tecnología más prometedora para aplicaciones que demandan alta eficiencia energética. Sin embargo, la persistente inclusión de la placa de orificio en estos estudios comparativos subraya su relevancia como tecnología de referencia y solución práctica para ciertos escenarios industriales menos exigentes.

4.4 Patentes Relevantes de la Cavitación Hidrodinámica

De las 50 patentes iniciales, se seleccionaron 12 por cumplir con los criterios clave: enfoque exclusivo en tratamiento de aguas residuales mediante cavitación hidrodinámica, disponibilidad de información técnica (resúmenes o documentos completos) y aplicación específica en este campo.

La revisión de las 12 patentes recopiladas en el Apéndice H revela una amplia variedad de configuraciones tecnológicas aplicadas a sistemas de cavitación hidrodinámica, evidenciando su

flexibilidad para adaptarse a diferentes matrices de agua y objetivos de tratamiento. Entre los dispositivos más reportados se encuentran los sistemas de diodo vórtice, Venturi y placas perforadas o de orificios, además de diseños más complejos como reactores multifluidicos y combinaciones rotor-estator. Estos sistemas han sido aplicados en el tratamiento de aguas urbanas, industriales (incluidas farmacéuticas y de destilerías), municipales, agrícolas y mineras. Las condiciones de operación varían considerablemente: por ejemplo, en el caso del reactor multifluídico (WO 2024/010535 A1) se reportan presiones de 3 bar y tiempos de residencia muy cortos (6–10 s), mientras que en otros diseños como el diodo vórtice acoplado a placa de orificio (US 9725338 B2) se requieren tiempos prolongados de hasta 120 minutos, lo que sugiere diferencias sustanciales en la energía requerida, el modo de operación y la escala de tratamiento.

En cuanto a la eficiencia, se observa una alta variabilidad según el tipo de contaminante y la configuración del sistema. La mayoría de los estudios se enfocan en la reducción de demanda química de oxígeno (DQO), alcanzando valores entre el 28 % y el 96 %, y en algunos casos complementarios se reporta la remoción de color (hasta 60 %) y nitrógeno amoniacal (hasta 80 %). Destacan dispositivos como las placas perforadas aplicadas en aguas industriales farmacéuticas (CN 118221257 A), con eficiencias superiores al 90 % en DQO, y el sistema diodo vórtice (US 9422952 B2) que permite operar a caudales elevados (4000 L/h) con eficiencias significativas en múltiples parámetros. Sin embargo, una limitación crítica es la ausencia de información cuantitativa en un número considerable de patentes, especialmente en aquellas con restricciones de acceso o sin reporte de condiciones operativas. Esta dificultad de acceso a la información limita el análisis comparativo entre tecnologías y hace evidente la necesidad de establecer criterios estandarizados de reporte, incluyendo parámetros hidrodinámicos, escalabilidad y métricas de

eficiencia energética, para facilitar la transferencia tecnológica de estos desarrollos al sector productivo.

4.5 Ventajas y desventajas

Mediante el análisis comparativo de artículos académicos y patentes se identificaron ventajas y desventaja clave de los principales dispositivos de cavitación hidrodinámica. La Tabla 10 presenta de forma concisa los puntos fuertes y limitaciones de cada tecnología en el tratamiento de aguas residuales, proporcionando una visión general de sus características operativas y aplicabilidad. destacando que los Venturi ofrecen versatilidad pero la mejora en su eficiencia está asociada a la adición de agentes oxidantes, las placas de orificio son económicas e ideales para desinfección aunque limitadas sin aditivos, los sistemas rotatorios destacan en rapidez de desinfección pero consumen mucha energía, mientras que los diodos vórtice son excelentes para degradación orgánica pero presentan desafíos de escalamiento, esto sugiere que se requiere evaluar el efluente a tratar y establecer criterios específicos para seleccionar la tecnología más adecuada según las necesidades específicas de cada aplicación.

Tabla 10

Ventajas y desventajas por dispositivo

Dispositivo	Ventajas	Desventajas
Venturi	<ul style="list-style-type: none"> - Versatilidad para aguas complejas. - Alta eficiencia en combinación con agentes oxidantes (O_3/H_2O_2). 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere aditivos para máxima eficiencia. - Sensible a variaciones de presión. - Eficiencia reducida en aguas con sólidos.
Placa de orificio	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo costo y mantenimiento. - Alta eficiencia en desinfección. - Geometría simple y adaptable. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere aditivos para máxima eficiencia. - Sensible a variaciones de presión. - Eficiencia reducida en aguas con sólidos.
Rotatorio	<ul style="list-style-type: none"> - Desinfección ultrarrápida. - Ideal para hidrólisis de lodos. - Efectivo en aguas urbanas e industriales 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto consumo energético. - Requiere mantenimiento frecuente.
Diodo vórtice	<ul style="list-style-type: none"> - Excelente para degradación de compuestos orgánicos. - Eficiencia mejorada con aireación. - Buen desempeño en pequeña escala 	<ul style="list-style-type: none"> - Eficiencia reducida en aguas con sólidos.

4.6 TRL supuesto

El estudio de artículos académicos revela una marcada predominancia de tecnologías en etapas tempranas de desarrollo, con el 74.07% de los dispositivos (20 de 27 estudios) clasificados en TRL 4, tal como se detalla en la columna 5 de la Tabla 11. Estos prototipos desarrollados principalmente por equipos académicos han demostrado su funcionalidad en entornos controlados de laboratorio o piloto (ej: Venturi de Capocelli et al., rotores-estator de Gostiša et al.), pero carecen de vinculación con el sector productivo.

Los niveles de madurez tecnológica (TRL) atribuidos a cada uno de los estudios analizados pueden consultarse en la Tabla 11, donde se detallan las características de los dispositivos o reactores evaluados. Esta tabla incluye, por estudio: el tipo de dispositivo (columna 2), la escala de desarrollo (columna 3) y el estado de madurez tecnológica (columna 4), ya sea en fase de patente, comercialización o implementación piloto.

Tabla 11

TRL supuesto artículos académicos

Referencia	Dispositivo	Escala	Detalles del dispositivo/reactor	TRL supuesto
(Gogate et al., 2020)	Venturi de ranura	Piloto	El reactor fue desarrollado por el equipo de investigación	4
(Dular et al., 2016)	Venturi Rotor de ranura radial	Laboratorio	El reactor fue desarrollado por el equipo de investigación	4
(Legarda et al., 2022)	Generador de microburbujas de cavitación hidrodinámica comercial (similar tubo Venturi)	Laboratorio	CARMIN D2 PMMA Single Assembly microbubble generator manufactured by YLEC Consultants	≥ 6
(Domingos et al., 2023)	Venturi	Compacta	Dispositivo patentado No° patente: BR 10 2021 025779 2	5
(Capocelli et al., 2014)	Venturi	Laboratorio	El reactor fue desarrollado por el equipo de investigación	4
(Jawale y Gogate, 2019)	Venturi	Laboratorio	El reactor fue desarrollado por el equipo de investigación	4
(Sežun et al., 2019)	Cavitación hidrodinámica de paso (Dispositivo Venturi) (BTHC) Generador Rotativo de	BTHC: laboratorio RGHC:	El reactor fue desarrollado por el equipo de investigación	4

	Cavitación Hidrodinámica (Dispositivo rotor-estator) (RGHC)	laboratorio y piloto		
(Sun et al., 2021)	Reactor de cavitación hidrodinámica rotacional avanzado (ARHCR)	Piloto	El reactor fue desarrollado por el equipo de investigación	4
(Gostisa et al., 2021)	Dispositivo Rotacional con discos de pines (RGHC) Rotor y estator	Piloto	El dispositivo no fue adquirido comercialmente, sino que fue desarrollado por el equipo de investigación y está en proceso de patente	4
(Cerecedo et al 2018)	Rotor-estator	Laboratorio	El reactor fue desarrollado por el equipo de investigación	4
(Hou et al., 2022)	Rotor-ranura radial	Laboratorio	El reactor fue desarrollado por el equipo de investigación	4
(Sun, Xuan et al., 2020)	Rotacional	Laboratorio	El reactor fue desarrollado por el equipo de investigación	4
(Baghele et al., 2022)	Plato de orificio	Laboratorio	El reactor fue desarrollado por el equipo de investigación	4
(Gajbhiye et al., 2024)	Plato de Orificio	Laboratorio	Adquirido por un proveedor comercial (<i>Aroma Traders</i>)	≥ 6
(Szaja et al., 2023)	Plato de orificio	Laboratorio	El reactor fue desarrollado por el equipo de investigación	4
(Wang et al., 2014)	Placa de orificio	Laboratorio	El reactor fue desarrollado por el equipo de investigación	4
(Gaikwad et al., 2016)	Placa de orificio	Laboratorio	El reactor fue desarrollado por el equipo de investigación	4
(Wu et al., 2013)	Placa de orificio	Laboratorio	El reactor fue desarrollado por el equipo de investigación	4
(Sarvothaman et al., 2018)	Vortex	Laboratorio	Dispositivos adquiridos de Vivira Process Technologies. (Startup)	≥ 6
(Gaikwad y Ranade, 2016)	Diodo vórtice	Laboratorio	El reactor fue desarrollado por el equipo de investigación	4
(Bhandari et al., 2016)	Diodo vórtice	Piloto	Dispositivo patentado	5
(Yuequn et al., 2016)	Rotor y estator Reactor de silbato líquido Placa de orificio Venturi	Laboratorio	Algunos dispositivos mencionados en el artículo están patentados, como los usados en CAV-OX y Ozonix. En otros, el reactor fue desarrollado por el equipo de investigación.	5
(Pravin et al., 2021)	Orificio y diodo vórtice	Piloto	Es comercializado por Vivira Process Technologies.	≥ 6
(Kakama et al., 2024)	Venturi y orificio	Piloto	El reactor fue desarrollado por el equipo de investigación.	4
(Patil et al., 2021)	Diodo vórtice y placa de orificio	Piloto	Dispositivo adquirido de Vivira Process Technologies, uno de los autores es el fundador de la empresa que comercializa el dispositivo	≥ 6
(Sarvothaman et al., 2018)	Orificio (D1) Orificio con swirler (D2) Venturi (D3) Venturi con swirler (D4) Vórtice diodo (D5, D6, D7)	Laboratorio	El reactor fue desarrollado por el equipo de investigación.	4
(Jain et al., 2019)	Diodo vórtice Placa de orificio	Laboratorio	El reactor fue desarrollado por el equipo de investigación.	4

Apenas un 11.11% de los dispositivos (3 casos) alcanza un TRL 5, correspondiente a tecnologías patentadas en proceso de validación industrial -como el diodo vórtice reportado por Bhandari et al. Por su parte, un 18.51% (5 dispositivos) se sitúa en niveles $TRL \geq 6$, gracias a esfuerzos de comercialización temprana llevados a cabo por startups como Vivira Process Technologies o fabricantes como YLEC Consultants.

De forma significativa, ningún dispositivo alcanza TRL 9, lo que pone en evidencia una brecha crítica entre la investigación académica y la adopción industrial a gran escala.

Esta distribución, refleja dos desafíos estructurales: primero, la desconexión academia-industria que limita el escalamiento de prototipos promisorios (TRL 4); y segundo, la ausencia de mecanismos efectivos para llevar tecnologías patentadas (TRL 5) a etapas comerciales ($TRL \geq 6$). Los casos exitosos documentados en la Tabla 11 (ej: CARMIN D2, dispositivos Vivira) sugieren que la participación empresarial temprana es clave para superar el "valle de la muerte" tecnológico. Se requieren políticas específicas que: financien validación en entornos reales para TRL 4-5, fomenten alianzas con startups, y establezcan métricas claras de escalamiento comercial para tecnologías en $TRL \geq 6$, cerrando así la brecha entre innovación y mercado que queda evidenciada.

Por otro lado, el análisis de las 12 patentes disponibles revela un avance significativo en la madurez tecnológica de los dispositivos de tratamiento de aguas residuales, con un 41.7% (5 de 12 patentes) alcanzando $TRL \geq 6$ como se detalla en la Tabla 12, lo que indica que la mayoría se encuentran en etapas de validación avanzada o pre-comerciales. Patentes como las de Ranade et al. (US 9422952 B2 y US 9725338 B2), Grishenkov et al. (WO 2024/010535 A1) y Jiang et al. (CN 118221257 A) destacan por incluir datos experimentales detallados, eficiencias cuantificadas (ej. reducción de DQO del 44-96%) y pruebas en entornos reales, ubicándolas claramente en $TRL \geq 6$. Estas tecnologías han superado la fase de laboratorio y se encuentran en proceso de validación

operacional o escalamiento inicial. Por otro lado 5 patentes, principalmente de origen chino (ej. CN 105502626 A, CN 208279362 U), se clasifican en TRL 3-4 debido a la falta de información técnica verificable, lo que sugiere que corresponden a diseños conceptuales o prototipos iniciales sin validación experimental pública.

Tabla 12

TRL supuesto para patentes

Referencia	Nº Patente	Tipo de dispositivo	TRL supuesto
(Grishenkov et. al, 2024)	WO 2024/010535 A1	Reactor multifluidico	≥ 6
(Morrill, 2024)	US 12037269 B2	Plato de orificio Venturi	5-6
(Jiang et al., 2024)	CN 118221257 A	Placas perforadas	≥ 6
(Smith, 2020)	WO 2020/236187 A1	Placas de vórtice	≥ 6
(Ranade et. al., 2014)	US 9422952 B2	Diodo vórtice	≥ 6
(Ranade et. al., 2017)	US 9725338 B2	Diodo vórtice y placa de orificio	≥ 6
Patentes con restricciones de acceso			
(Bizjan et. al., 2022)	WO 2022/112191 A1	Rotor-estator	3-4
(Riya et. al., 2016)	CN 105502626 A	Placa de orificio	3-4
(Hairu et. al., 2021)	CN 215161767 U	Placa de orificio	3-4
(Dongyin y Kuolei, 2018a)	CN 108117147 A	Venturi	3-4
(Yingping et. al., 2024)	CN 221479674 U	Diodo vórtice	5-6
(Dongyin y Kuolei, 2018b)	CN 208279362 U	Venturi	3-4

A pesar del alto porcentaje de patentes con TRL ≥ 6 , persisten desafíos críticos para su implementación comercial. Ninguna de las patentes analizadas alcanza TRL 8-9, lo que evidencia una brecha entre la validación técnica y la adopción industrial masiva. Factores como la escalabilidad, costos de producción y resistencia en operación continua no están documentados en la mayoría de los casos. Por ejemplo, aunque el reactor multifluídico de Grishenkov (TRL ≥ 6) muestra eficacia en aguas residuales urbanas, no hay información sobre su durabilidad o adaptabilidad a diferentes caudales. Asimismo, patentes como las de Morrill (US 12037269 B2, TRL 5-6) y Yingping (CN 221479674 U, TRL 5-6) presentan aplicaciones prometedoras, pero carecen de datos cuantitativos completos, lo que limita su atractivo para potenciales licenciatarios o inversionistas.

Para cerrar esta brecha, se recomienda: Mejorar la transparencia técnica en patentes con TRL bajo (3-4), incorporando al menos resultados de laboratorio que sustenten su potencial; y que oficinas de patentes y agencias de innovación exijan datos de validación como requisito para otorgar derechos de propiedad intelectual en tecnologías ambientales. El caso de Ranade (US 9422952 B2), con múltiples patentes vinculadas y datos operativos robustos, demuestra cómo la integración entre investigación aplicada y protección industrial puede acelerar la transferencia tecnológica. Sin embargo, sin mecanismos que faciliten el salto a TRL 8-9, incluso las patentes más avanzadas podrían quedar estancadas en etapas previas al mercado.

5. Conclusiones

La aplicación de la declaración PRISMA permitió una selección rigurosa de literatura científica pertinente, eliminando sesgos y garantizando una evaluación objetiva del estado actual de esta tecnología. Los resultados obtenidos ofrecen una base sólida para futuras investigaciones

y desarrollos tecnológicos, particularmente en entornos de alta carga orgánica y requerimientos de desinfección avanzada.

El análisis comparativo evidenció diferencias significativas entre los dispositivos estudiados. Los dispositivos Venturi han demostrado ser versátiles para diversos tipos de aguas residuales, aunque con una eficiencia que varía significativamente según las condiciones operativas. Cuando se combinan con procesos de oxidación avanzada como ozonización o peroxidación, pueden alcanzar eficiencias superiores al 90% en reducción de DQO. Sin embargo, su desempeño en operación individual es limitado (11.5-60% de reducción de DQO), mostrando una marcada dependencia de parámetros como la presión (óptima entre 4-7.5 bar) y la necesidad de aditivos químicos. Estos sistemas presentan desafíos importantes para su implementación a gran escala debido a la falta de estandarización en parámetros clave como el número de cavitación y la escasa validación en condiciones industriales reales.

Las placas de orificio destacan en aplicaciones de desinfección, logrando eliminar hasta el 92% de patógenos como *Pseudomonas aeruginosa*, con un diseño relativamente sencillo y de bajo costo. Sin embargo, muestran inconsistencias en el tratamiento de aguas complejas, con reducciones de DQO alrededor del 50% en efluentes textiles. Su eficiencia mejora significativamente con la adición de catalizadores y oxidantes, pero la mayoría de los estudios se han realizado a escala de laboratorio, lo que limita la comprensión de su verdadero potencial industrial. La geometría del orificio y el número de cavitación emergen como factores críticos para optimizar su desempeño.

Los dispositivos rotatorios tipo rotor-estator representan la solución más efectiva para desinfección rápida, logrando eliminar el 100% de microorganismos como *E. coli* y *E. faecalis* en menos de 20 minutos. Además, han demostrado potencial para el pretratamiento de lodos

industriales, reduciendo hasta un 68% el DQO. No obstante, su implementación a gran escala se ve limitada por el alto consumo energético a comparación de dispositivos estáticos como placas de orificio o Venturi que operan sin partes móviles. Esto se debe a que los dispositivos rotatorios demandan velocidades de rotación muy altas (hasta 10000 rpm en algunos diseños). Además, la necesidad de mantener condiciones operativas muy específicas en cuanto a velocidad de rotación, caudal y diseño geométrico del rotor.

El diodo vórtice emerge como la tecnología más prometedora, mostrando el mejor balance entre eficiencia (85% reducción de DQO) y madurez tecnológica. Opera óptimamente en condiciones de baja presión y se beneficia significativamente de la aireación. Sin embargo, enfrenta desafíos con aguas que contienen altos niveles de sólidos suspendidos. A diferencia de otros dispositivos, el diodo vórtice ha demostrado mantener su eficiencia en escalas piloto, posicionándose como candidato principal para aplicaciones industriales, particularmente en sectores como el de tratamiento de aguas agrícolas asociadas a los fertilizantes donde se ha logrado reducir hasta 60% el nitrógeno amoniacal.

En cuanto al estado de madurez tecnológica (TRL), el dispositivo basado en diodo vórtice lidera el desarrollo con $TRL \geq 6$, habiendo superado la etapa de validación y encontrándose actualmente en demostración industrial y primeras implementaciones comerciales. Las placas de orificio, con niveles de madurez tecnológica (TRL) entre 4 y 6, continúan siendo utilizadas como tecnología de referencia debido a su simplicidad constructiva y menor costo relativo. Por su parte, los sistemas rotatorios han demostrado alta eficiencia en aplicaciones que requieren desinfección en tiempos reducidos. Los dispositivos tipo Venturi presentan niveles de madurez tecnológica más bajos, predominantemente en TRL 4–5, correspondientes a validaciones en laboratorio o planta piloto. Aunque presentan buena versatilidad operativa, requieren mayor desarrollo para su

implementación en condiciones industriales reales. Esta distribución evidencia una brecha entre la investigación académica y las aplicaciones industriales, especialmente en lo relativo a la validación técnica y de escalabilidad en matrices complejas de aguas residuales.

6. Recomendaciones

Para garantizar la máxima calidad en revisiones sistemáticas futuras, se recomienda implementar rigurosamente la declaración PRISMA. La implementación de herramientas digitales especializadas (ej. Rayyan) simplifica significativamente la selección de estudios relevantes en revisiones sistemáticas mediante características clave como: importar, filtrar y clasificar, entre otras opciones. En este proceso, es fundamental establecer criterios de inclusión/exclusión explícitos y detallados antes de iniciar la revisión. La claridad de estos criterios determinará la precisión de la selección final de estudios. Por otro lado, la fase de cribado puede realizarse en dos fases. Primero, una revisión rápida de títulos, resúmenes y resultados que permita filtrar estudios claramente no relevantes. Segundo, una evaluación exhaustiva del texto completo para los artículos preseleccionados.

Por otro lado, para garantizar una evaluación precisa y estandarizada de los niveles TRL en futuras investigaciones sobre cavitación hidrodinámica, se recomienda desarrollar e implementar una matriz de evaluación con criterios objetivos. Esta matriz debería incluir: parámetros técnicos cuantificables (eficiencia en reducción de DQO/patógenos, estabilidad operativa, consumo energético), el entorno de validación (escala experimental, tipo de efluente, duración de pruebas), y la documentación requerida (datos publicados, informes técnicos, patentes). Esta necesidad es particularmente relevante porque, como se evidenció en el presente estudio, los artículos científicos y patentes revisados no reportan explícitamente su nivel TRL, lo que dificulta la comparación directa entre tecnologías.

La selección del dispositivo óptimo debe basarse en un balance cuidadoso entre los objetivos de tratamiento específicos (ej. Reducción de DQO, desinfección o remoción de contaminantes específicos), los recursos disponibles (presupuesto, infraestructura y capacidad técnica) y la escalabilidad requerida (desde pruebas piloto hasta implementación industrial completa).

Específicamente, los resultados de este estudio destacan la necesidad de: desarrollar protocolos estandarizados que permitan la replicabilidad de pruebas en entornos industriales reales, y establecer métricas comparativas unificadas para evaluar la eficiencia de los diferentes dispositivos. Estas acciones facilitarían la toma de decisiones informadas y promoverían la transferencia efectiva de tecnologías desde el laboratorio hasta aplicaciones a escala real.

Referencias Bibliográficas

- Arrojo, S. (2007). Cavitación hidrodinámica aplicada a tratamiento de efluentes [Universidad Complutense de Madrid]. <https://lnk.ink/mUAUd>.
- Asociación Pacto Mundial. (11 de octubre de 2021). *ODS 6 Agua limpia y saneamiento*. Pacto Mundial. <https://www.pactomundial.org/ods/6-agua-limpia-y-saneamiento/>
- Badmus, K. O., Tijani, J. O., Massima, E., & Petrik, L. (2018). Treatment of persistent organic pollutants in wastewater using hydrodynamic cavitation in synergy with advanced oxidation process. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(8), 7299–7314. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-1171-z>
- Bimestre, T. A., Júnior, J. A. M., Canettieri, E. V., & Tuna, C. E. (2022). Hydrodynamic cavitation for lignocellulosic biomass pretreatment: a review of recent developments and future perspectives. *Bioresources And Bioprocessing*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00499-2>
- Bizjan, B., šIrok, B., Gostiša, J., Dular, M., & Zupanc, M. (2022). *Liquid Decontamination System Comprising A Cavitation Device And Method Of Decontamination Of A Liquid* (Patente n.º WO 2022/112191 A1). WIPO. <https://lnk.ink/sY42w>
- Carpenter, J., Badve, M., Rajoriya, S., George, S., Saharan, V. K., & Pandit, A. B. (2016). 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). <https://doi.org/10.1515/revce-2016-0032>

- Cerecedo, L. M., Dopazo, C., & Gomez-Lus, R. (2018). Water disinfection by hydrodynamic cavitation in a rotor-stator device. *Ultrasonics Sonochemistry*, 48, 71–78. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.05.015>
- Correa, A. (2014). *Importancia del recurso agua y algunas metodologías destinadas a mejorar su calidad*. INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/7789>
- Das, S., Bhat, A. P., & Gogate, P. R. (2021). Degradation of dyes using hydrodynamic cavitation: Process overview and cost estimation. *Journal of Water Process Engineering*, 42, 102126. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102126>
- Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación [CO] Colciencias. (2016). Actores del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación: Documento N° 1602. Adoptada mediante Resolución No. 1473 de 2016. *Repositorio Institucional de Minciencias*. <http://repositorio.colciencias.gov.co/handle/11146/34016>
- Dular, M., Griessler-Bulc, T., Gutierrez-Aguirre, I., Heath, E., Kosjek, T., Klemenčič, A. K., Oder, M., Petkovšek, M., Rački, N., Ravnikar, M., Šarc, A., Širok, B., Zupanc, M., Žitnik, M., & Kompare, B. (2015). Use of hydrodynamic cavitation in (waste)water treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, 29, 577–588. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.10.010>
- G. Mancuso, M. Langone, y G. Andreottola, «A critical review of the current technologies in wastewater treatment plants by using hydrodynamic cavitation process: principles and applications», *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, vol. 18, n.o 1. Springer, pp. 311-333, 27 de enero de 2020. doi: 10.1007/s40201-020-00444-5.

- García, H. A. (2015). Conceptos fundamentales de las revisiones sistemáticas/metaanálisis. *Revista Urología Colombiana / Colombian Urology Journal*, 24(1), 28-34. <https://doi.org/10.1016/j.uroco.2015.03.005>
- Ge, M., Sun, C., Zhang, G., Coutier-Delgosha, O., & Fan, D. (2022). Combined suppression effects on hydrodynamic cavitation performance in Venturi-type reactor for process intensification. *Ultrasonics Sonochemistry*, 86, 106035. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106035>
- Ge, H., & Sun, Z. (2021). *Hydrodynamic cavitation device for adsorbent wastewater treatment* (Patente china n.º CN 215161767 U). <https://lnk.ink/VSpYZ>
- Gogate, P. R., & Kabadi, A. M. (2008). A review of applications of cavitation in biochemical engineering / biotechnology. *Biochemical Engineering Journal*, 44(1), 60-72. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2008.10.006>
- Gogate, P., Thanekar, P., & Oke, A. (2020). Strategies to improve biological oxidation of real wastewater using cavitation based pre-treatment approaches. *Ultrasonics Sonochemistry*, 64, 105016. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105016>
- Grishenkov, D., Rokhsar, F., Koşar, A., & Sheibani, A. (2024). *A New Method To Generate Vigorous Cavitation Through The Microscale Device At Low Pressure For Wastewater Treatment* (Patente turca n.º WO 2024/010535 A1). WIPO. <https://rb.gy/b2teau>
- Gutierrez, F., Arias, S., & Cardona, D. (2019). Cavitación Hidrodinámica: un Enfoque desde la Ingeniería y la Agroindustria. *Scientia Et Technica*, 24, 283–304. https://www.redalyc.org/journal/849/84961237015/html/#redalyc_84961237015_ref10
- Gutiérrez, L. F., Arias, S., & Cardona, D. F. (2019). *Cavitación Hidrodinámica: un Enfoque desde la Ingeniería y la Agroindustria*. <https://www.redalyc.org/journal/849/84961237015/html/>

- Hong, F., Tian, H., Yuan, X., Liu, S., Peng, Q., Shi, Y., Jin, L., Ye, L., Jia, J., Ying, D., Ramsey, T. S., & Huang, Y. (2022). CFD-assisted modeling of the hydrodynamic cavitation reactors for wastewater treatment — A review. *Journal Of Environmental Management*, 321, 115982. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115982>
- Huang, Y., Shao, Z., Hong, F., Liu, S., Xiang, K., & Lei, E. (2024). *Modularized detachable hydrodynamic cavitation device* (Patente china n.º CN 221479674 U). <https://lnk.ink/CzfCD>
- Iberdrola. (22 de abril de 2021). *CONTAMINACIÓN DEL AGUA*. Iberdrola. <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/contaminacion-del-agua>
- 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>
- Jawale, R. H., & Gogate, P. R. (2018). Novel approaches based on hydrodynamic cavitation for treatment of wastewater containing potassium thiocyanate. *Ultrasonics Sonochemistry*, 52, 214–223. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.11.019>
- Jiang, B., Yu, S., & Yu, W. (2024). *Oxidation and hydrodynamic cavitation combined wastewater treatment method* (Patente china n.º CN 118221257 A). <https://lnk.ink/JiUia>
- Jin, R., Qiao, Y., He, Z., Kong, W., & Yang, S. (2016). *Hydrodynamic cavitation reactor* (Patente china n.º CN 105502626 A). <https://lnk.ink/XJ89e>
- López, A., Méndez, D., Paz, A., & Arboleda, H. (2016). Desarrollo e Instrumentación de un Proceso de Vigilancia Tecnológica basado en Protocolos de Revisión Sistemática de la

Literatura. *Información Tecnológica*, 27(4), 155-164. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642016000400017>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2013). *Vertimientos y reuso de aguas residuales* |Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico/administracion-del-recurso-hidrico/calidad/vertimientos-y-reuso-de-aguas-residuales>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). Resolución 1256 de 2021. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/12/Resolucion-1256-de-2021.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). *Resolución 1256 de 2021*. Gov.co. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/12/Resolucion-1256-de-2021.pdf>

Mohod, A. V., Teixeira, A. C. S. C., Bagal, M. V., Gogate, P. R., & Giudici, R. (2023). Degradation of organic pollutants from wastewater using hydrodynamic cavitation: A review. *Journal Of Environmental Chemical Engineering*, 11(3), 109773. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109773>

Morrill, K. (2024). *Hydrodynamic cavitation device and methods of manufacturing the same* (Patente EE. UU. n.º US 12037269 B2). <https://lnk.ink/ys5S0>

Oo, Y. M., Prateepchaikul, G., & Somnuk, K. (2020). Continuous acid-catalyzed esterification using a 3D printed rotor–stator hydrodynamic cavitation reactor reduces free fatty acid

- content in mixed crude palm oil. *Ultrasonics Sonochemistry*, 72, 105419. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105419>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Alonso-Fernández, S. (2021). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista española de cardiología*, 74(9), 790–799. <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>
- Patil, P. B., Bhandari, V. M., & Ranade, V. V. (2020). Improving efficiency for removal of ammoniacal nitrogen from wastewaters using hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, 105306. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105306>
- Patil, P. B., Bhandari, V. M., & Ranade, V. V. (2021). Wastewater treatment and process intensification for degradation of solvents using hydrodynamic cavitation. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 166, 108485. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108485>
- Ranade, V. V., Sarvothaman, V. P., Simpson, A., & Nagarajan, S. (2020). Scale-up of vortex based hydrodynamic cavitation devices: A case of degradation of di-chloro aniline in water. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, 105295. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105295>
- Ranade, V., Arvind, A., & Bhandari, V. (2016). *Vortex diodes as effluent treatment devices* (Patente EE. UU. n.º US 9422952 B2). <https://lnk.ink/7pcPU>
- Ranade, V., Arvind, A., & Bhandari, V. (2017). *Apparatus and method for reduction in ammoniacal nitrogen from waste waters* (Patente EE. UU. n.º US 9725338 B2). <https://lnk.ink/cPRm5>

Reynolds, K. A. (2001). Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica. *Latinoamérica*, 2001, 4849.

Robles Lopez. (2024, 9 octubre). *¿Qué son los TRL (Technology Readiness Levels)? | Ayming España*. Ayming España. <https://www.ayming.es/insights-y-noticias/noticias/trl-technology-readiness-levels/>

Simpson, A., & Ranade, V. V. (2019). 110th Anniversary: Comparison of Cavitation Devices Based on Linear and Swirling Flows: Hydrodynamic Characteristics. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(31), 14488-14509. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b02757>

Smith, M. (2020). *Wastewater Treatment System And Method* (Patente n.º WO 2020/236187 A1). WIPO. <https://lnk.ink/4RDIf>

Software de simulación de dinámica de fluidos computacional - Dassault Systèmes. (2024, December 4). Dassault Systèmes. <https://lnk.ink/BVrwB>

Song, Y., Hou, R., Zhang, W., & Liu, J. (2022). Hydrodynamic cavitation as an efficient water treatment method for various sewage:- A review. *Water Science & Technology*, 86(2), 302-320. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.201>

Sun, X., Chen, S., Liu, J., Zhao, S., & Yoon, J. Y. (2020). Hydrodynamic Cavitation: A Promising Technology for Industrial-Scale Synthesis of Nanomaterials. *Frontiers In Chemistry*, 8. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00259>

Sun, X., Liu, J., Ji, L., Wang, G., Zhao, S., Yoon, J. Y., & Chen, S. (2020). A review on hydrodynamic cavitation disinfection: The current state of knowledge. *The Science of the Total Environment*, 737, 139606. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139606>

Sun, X., Xuan, X., Song, Y., Jia, X., Ji, L., Zhao, S., Yoon, J. Y., Chen, S., Liu, J., & Wang, G. (2020). Experimental and numerical studies on the cavitation in an advanced rotational

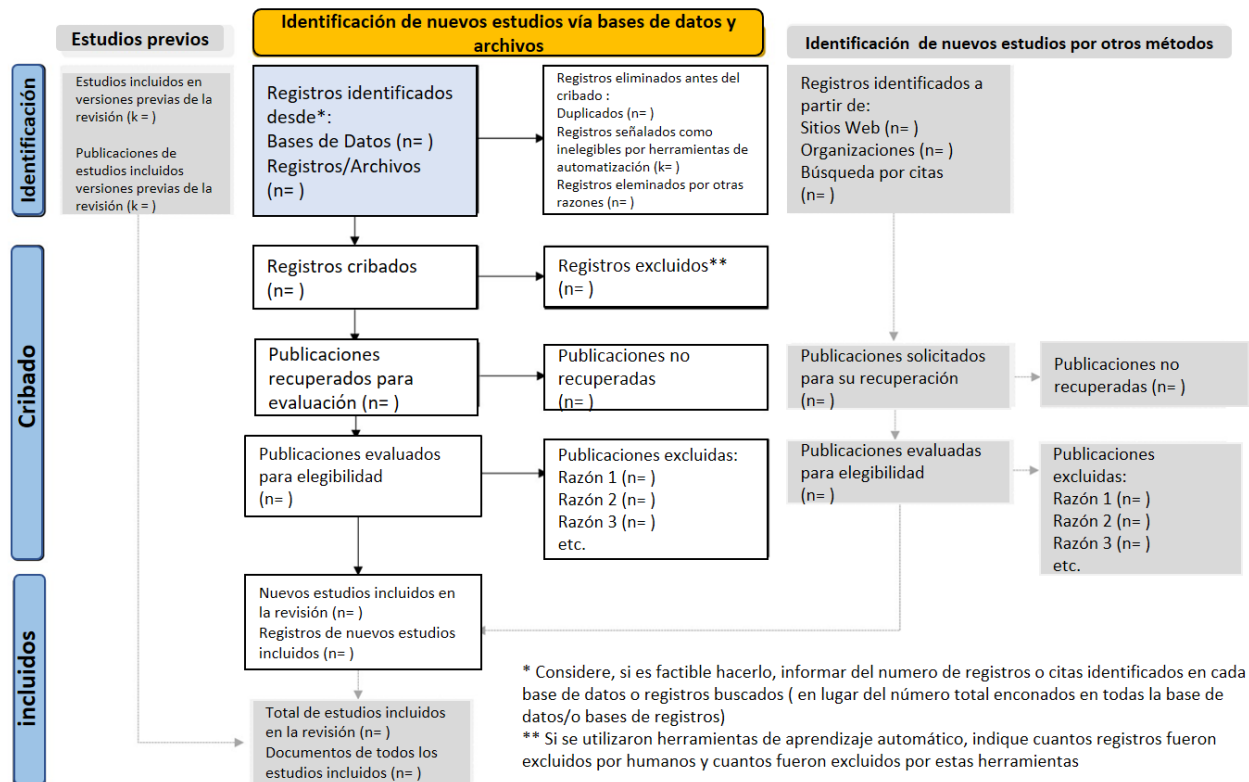
- hydrodynamic cavitation reactor for water treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, 105311. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105311>
- Superintendencia de Industria y Comercio. (s/f). *¿Qué son las patentes?* GOV.CO. <https://www.sic.gov.co/node/43>
- Ultrasonics Sonochemistry. (1994). ELSEVIER. <https://www.sciencedirect.com/journal/ultrasonics-sonochemistry>
- Wang, B., Su, H., & Zhang, B. (2021). Hydrodynamic cavitation as a promising route for wastewater treatment – A review. *Chemical Engineering Journal*, 412, 128685. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128685>
- Wang, Y., Jia, A., Wu, Y., Wu, C., & Chen, L. (2014). Disinfection of bore well water with chlorine dioxide/sodium hypochlorite and hydrodynamic cavitation. *Environmental Technology*, 36(4), 479-486. <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.952345>
- Wu, D., & Feng, K. (2018a). *Venturi hydrodynamic cavitation device applied to sewage treatment experiment table* (Patente china n.º CN 108117147 A). <https://lnk.ink/WT4Uq>
- Wu, D., & Feng, K. (2018b). *Venturi hydrodynamic cavitation device with insection vortex groove* (Patente china n.º CN 208279362 U). <https://lnk.ink/SAXAo>
- Xue, L., Hao, Z., Ren, W., Wang, Y., Liu, G., Liu, J., Wang, H., & Bie, H. (2024). Investigation on the cavitation characteristic of a novel cylindrical rotational hydrodynamic cavitation reactor. *Ultrasonics Sonochemistry*, 109, 106999. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.106999>

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

Apéndices

Apéndice A

Plantilla de diagrama de flujo PRISMA 2020 para revisiones sistemática



Nota. Adaptado de (Page et al., 2021)

Apéndice B*Artículos más citados*

Documento	Referencia	Citas
Uso de la cavitación hidrodinámica en el tratamiento de aguas (residuales)	(Dular et al., 2015)	224
Una revisión sobre la desinfección por cavitación hidrodinámica: el estado actual del conocimiento	(Sun et al., 2020)	101
Tratamiento de contaminantes orgánicos persistentes en aguas residuales mediante cavitación hidrodinámica en sinergia con el proceso de oxidación avanzada	(Badmus et al., 2018)	87
Estudios experimentales y numéricos sobre la cavitación en un reactor avanzado de cavitación hidrodinámica rotacional para el tratamiento de aguas	(Sun, Xuan, et al., 2020)	51
Degradación de colorantes mediante cavitación hidrodinámica: descripción general del proceso y estimación de costes	(Das et al., 2021)	47
Efectos de supresión combinados en el rendimiento de la cavitación hidrodinámica en un reactor de tipo Venturi para la intensificación del proceso	(Ge et al., 2022)	47
Nuevos enfoques basados en la cavitación hidrodinámica para el tratamiento de aguas residuales que contienen tiocianato de potasio	(Jawale & Gogate, 2018)	40
Tratamiento de aguas residuales e intensificación de procesos para la degradación de disolventes mediante cavitación hidrodinámica	(Patil et al., 2021)	37
Desinfección del agua por cavitación hidrodinámica en un dispositivo rotor-estator	(Cerecedo et al., 2018)	37
Estrategias para mejorar la oxidación biológica de aguas residuales reales utilizando enfoques de pretratamiento basados en la cavitación	(Gogate et al., 2020)	37
Desinfección del agua de pozo con dióxido de cloro/hipoclorito de sodio y cavitación hidrodinámica	(Wang et al., 2014)	32
Desarrollos recientes en reactores de cavitación hidrodinámica: mecanismo de cavitación, diseño de reactores y aplicaciones	(Zheng et al., 2022)	30

Todas los Apéndices C-G comparten una estructura tabular común con seis columnas fundamentales: referencia bibliográfica, tipo y escala del dispositivo, características del agua tratada, condiciones operativas, eficiencia del tratamiento y número de cavitación (cuando está disponible).

Apéndice C

Reporte de investigación dispositivos de cavitación hidrodinámica tipo Venturi

Referencia	Dispositivo/Escala	Tipo de agua	Condiciones de operación	Eficiencia	Número de cavitación Cv	
(Domingos et al., 2023)	Venturi Compacta	Lixiviados de vertederos maduros (estabilizados)	Tiempo de operación de la cavitación hidrodinámica y ozonización: Se prueban diferentes tiempos de operación (1, 2, 3, 4, 5 y 6 horas)	Combinación de coagulación/floculación, cavitación hidrodinámica, ozonización y adsorción con carbón activado permitió	Reducción DQO >90% Así como una reducción casi completa del color y la turbidez	No menciona
(Gogate et al., 2020)	Venturi de ranura Piloto	Aguas residuales industriales Aguas residuales municipales	P1: 4 bar; t: 120 minutos; CO: H ₂ O ₂ , O ₃ y Fenton: Volumen de efluente: 4 L; Modo de operación: Recirculación	Operación individual de HC Operación combinada con otros (POA)	Reducción DQO 19.7% Reducción DQO hasta 60%	No menciona
(Legarda et al., 2022)	Generador de microburbujas de cavitación hidrodinámica comercial (similar tubo Venturi) Laboratorio	Solución sintética con composición similar a aguas residuales vertidas por una planta procesadora de aves de corral	Flujo de aire: 0, 20, 40, 60 mL/min. Tamaño de las microburbujas: 47.41 µm a 116.17 µm.	Sólidos Suspendidos Totales (SST)	65% a 80% de eliminación	No menciona
(Capocelli et al., 2014)	Venturi Laboratorio	Agua contaminada con p-Nitrofenol (pNP)	P1: 2 bar-7.5 bar; P2: 1 bar-3,8 bar; Q: 0.2 m ³ /h-0.4 m ³ /h; t: 0, 5, 10, 20 y 30 minutos; T: Se mantiene por debajo de 30°C	7 bar (entrada) / 3.8 bar (recuperación) en 30 minutos.	40% Eliminación pNP	0.25 a 0.82
(Dular et al., 2016)	Venturi Laboratorio	Agua desionizada Efluente de aguas residuales reales Agua potable	P1: 0.2 bar-5 bar; Vf: 26 m/s; T: 20-68 °C; t: 5-30 minutos; CO: H ₂ O ₂	Otras condiciones de operación <i>Legionella pneumophila</i> <i>Microcystis aeruginosa</i> <i>Chlorella vulgaris</i> Fármacos (ibuprofeno, etc.)	61.20% a 96% Eliminación pNP 90% eliminación 90% inhibición de crecimiento Sin eficacia 47-86% (agua pura) / 37-76% (efluentes)	0.75 a 1.24
(Jawale y Gogate, 2019)	Venturi Laboratorio	Agua con tiocianato de potasio (KSCN)	P1: 1 bar-5 bar; pH: 2-10; CO: TiO ₂ , ZnO y CuO/O ₃ ; t: 0, 5, 10, 20 y 30 minutos.	Combinando H ₂ O ₂ /O ₃ /CuO cavitación +	100% Degradación KSCN Reducción DQO 92.9%	0.205 a 4 bar de presión de entrada
(Sežun et al., 2019)	Cavitación hidrodinámica de paso (Dispositivo Venturi) (BTHC)	Lodos secundarios de una fábrica de pulpa y papel	t: 15 y 30 minutos Adición de NaOH: Se evaluó el efecto de la alcalinización del lodo (ajustando el pH a 10) antes de la cavitación. V: 1 y 500 L	BTHC Laboratorio	DQOt disminuyó 11.5% y DQOs aumentó 53.7%	No menciona

Apéndice D

Reporte de investigación dispositivos de cavitación hidrodinámica tipo Plato/Placa de orificio

Referencia	Dispositivo/Escala	Tipo de agua	Condiciones de operación		Eficiencia	Número de cavitación Cv
(Baghele et al., 2022)	Plato de orificio Laboratorio	Mezcla compleja de sólidos orgánicos e inorgánicos, incluyendo microorganismos como coliformes fecales	P1: 0.8 bar y 5 bar; t: 120 min; Longitud efectiva del chorro del orificio: Se investigaron cuatro longitudes diferentes del chorro del orificio	DQO Sólidos suspendidos totales Coliformes fecales	Reducción 80.47% Degradación máxima 62.83% Degradación máxima 52.27%	El número de cavitación para el Setup I fue de 0.023, mientras que para el Setup II fue de 1.57
(Szaja et al., 2023)	Plato de orificio Laboratorio	Aguas residuales municipales	P1: 4 bar y 6 bar; t: 0, 15, 30, 60 y 90 minutos.	<i>Escherichia coli</i> y bacterias coliformes <i>Enterococcus</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Reducción más del 50% a Reducción más del 81-92%	0.163 para 4 bar y 0.085 para 6 bar
(Wang et al., 2014)	Placa de orificio Laboratorio	Agua de pozo	Presión de entrada: 3,5-4,5 bar; D: 3, 2 y 1 mm - N: 17, 20 y 33; CO: ClO ₂ , NaClO	Solo HC 60 minutos de tratamiento HC + ClO ₂ 30 minutos de tratamiento HC + NaClO	Eficiencia 67.3% Eficiencia 81.8% Reducción 39% cloroformo	No menciona
(Gajbhiye et al., 2024)	Plato de Orificio Laboratorio	Aguas residuales textiles	N: 3 y 5 agujeros, tanto circulares como en forma de estrella; D: 8 mm.	5 agujeros circulares 5 agujeros estrellados	Reducción DQO 49.14% Eliminación de color 34.15% Reducción DQO 34.42% Eliminación de color 13.44%	No menciona
(Gaikwad et al., 2016)	Placa de orificio Laboratorio	Agua contaminada con <i>Escherichia coli</i>	P1: 1.38 bar-2.07 bar; Forma de las placas de orificio: un agujero circular, cuatro agujeros circulares, una rendija rectangular, una rendija triangular y una rendija cuadrada), misma área de flujo (10% del área de la tubería); Q: 5.6 a 6.9 m ³ /h	4 agujeros circulares 1 agujero circular 1 rendija rectangular	Reducción 3 log (99.9%) Reducción 2 log Reducción 2 log Reducción 1 log Reducción 1 log Reducción 2 log	4 agujeros: 0.83 y 0.54 1 agujero: 0.57 y 0.94 Rectangular: 1.10 y 0.77 A presiones de 1.38 bar y 2.07 bar respectivamente

				Según, presión de entrada 3.5 bar en 90 minutos	46% eficiencia	
(Wu et al., 2015)	Placa de orificio Laboratorio	Agua contaminada con fenol	P1: 1 a 3,5 bar; N: 17, 20 y 33 - D: 3, 2 y 1 mm; CO: H ₂ O ₂ ; CuO, Fe y TiO ₂ Gases disueltos: O ₂ , N ₂ , aire.	Geometría de placa N: 33 - D: 2 mm	31.8% eficiencia	No menciona
				Concentración de H ₂ O ₂ 100 mg/L	32% eficiencia	
				Gas disuelto O ₂	+15-20% vs N ₂	
				Catalizador	44% (Fe) / 36.5% (CuO)	

Apéndice E

Reporte de investigación dispositivos de cavitación hidrodinámica rotatorios tipo rotor-estator

Referencia	Dispositivo/Escala	Tipo de agua	Condiciones de operación		Eficiencia	Número de cavitación Cv
(Sežun et al., 2019)	Generador Rotativo de Cavitación Hidrodinámica (RGHC) Laboratorio y piloto	Lodos secundarios de una fábrica de pulpa y papel	t: 15 y 30 minutos Adición de NaOH: Se evaluó el efecto de la alcalinización del lodo (ajustando el pH a 10) antes de la cavitación. V: 1 y 500 L Vr: 2800 y 10000 rpm	RGHC Laboratorio RGHC Piloto	DQOt disminuyó 12.2% y DQOs aumentó 68.2% DQOs aumentó 101%	No menciona
(Gostisa et al., 2021)	Dispositivo Rotacional con discos de pines (RGHC) Rotor y estator Piloto	Agua residual urbana	Geometría de los pines: diámetro de pin (10 mm y 16 mm); número de pines (8 y 16); rugosidad de la superficie: (lisa y rugosa); Vr: 2700 y 3000 rpm; Np: 15 y 30	15 pasadas de líquido	Reducción DQO 31%	0.26 a 0.32
(Sun et al., 2021)	Reactor de cavitación hidrodinámica rotacional avanzado (ARHCR) Piloto	Agua destilada simulada que contenía Escherichia coli (E. coli)	Vr: 2600, 3000, 3400, 3800 y 4200 rpm; Q: 1.4, 2.0 y 2.6 m ³ /h; t: 10 minutos	Condiciones óptimas (4200 rpm y 1.4 m ³ /h), en tiempo reducido (4 min) 15 L	Eliminación completa de E. coli	0.087 a 0.289
(Hou et al., 2022)	Rotor-ranura radial Laboratorio	Agua contaminada con Escherichia coli	Vr: 3000, 3600, 3900 y 4200 rpm; Q: 1.4, 1.7 y 2 m ³ /h.	3900 rpm y 2 m ³ /h 3600 rpm	Tasa de desinfección 93.3% en 20 minutos Desinfección completa (100%) en 30 minutos	No menciona
(Cerecedo et al 2018)	Rotor-estator Laboratorio	Agua contaminada	Geometría del canal de cavitación: número de	Escherichia coli	100% Eliminación en 8 minutos	No menciona

		con <i>E. coli</i> y <i>E. faecalis</i>	álabes (entre 58 y 80 en el rotor y 8 o 16 en el estator); Diámetro del rotor: 110 mm a 155 mm; Vr: 3000 rpm; t: 20 min	<i>Enterococcus faecalis</i> Estado Post-Tratamiento	100% Eliminación en 20 minutos Sin células VBNC (Viables, pero no cultivables)	
(Sun, Xuan et al., 2021)	Rotacional Laboratorio	Agua contaminada con <i>Escherichia coli</i>	Vr: 3600 rpm; Q: 1.4 m ³ /h	El estudio se centra en la caracterización del flujo de cavitación y no proporciona datos específicos sobre la eficiencia de eliminación de contaminantes		No menciona

Apéndice F

Reporte de investigación dispositivos de cavitación hidrodinámica tipo Diodo Vórtice

Referencia	Dispositivo/ Escala	Tipo de agua	Condiciones de operación	Eficiencia		Número de cavitación σ
(Sarvothaman et al., 2018)	Vortex Laboratorio	Agua contaminada con acetona, acetato de etilo (EA) y alcohol isopropílico (IPA)	ΔP : 1.5-4.5 bar; T: 20-45 °C; Gases disueltos: aire 0.3, 1.01 y 1.46 mm	Caída de presión: (2-2.5 bar)	Factor de degradación (ϕ) $\phi \approx 0.011$ (para acetona a 300 K)	No menciona
				Temperatura hasta 318 K	ϕ aumenta con T ($\Delta E/R = 3950$ K)	
				Aireación: 1 (L gas/min/L líquido)	ϕ se duplica (≈ 0.02)	
				Dispositivo pequeño	$\phi \approx 0.035$ (vs. 0.007 en el grande)	
				Contaminante: EA	$\phi \approx 4 \times$ mayor que IPA	
(Gaikwad y Ranade, 2016)	Diodo vórtice Laboratorio	Agua contaminada con <i>Escherichia coli</i>	P1: 1 bar y 1.4 bar	P1: 1 bar	Reducción 2 log	A 1 bar (cerca al inicio de cavitación, $C_v \approx 1$) A 1.4 bar (régimen de cavitación desarrollada, $C_v < 1$)
				P1 1.4 bar	Reducción 3 log	
(Bhandari et al., 2016)	Diodo vórtice Piloto	Aguas residuales de la industria de fertilizantes químicos	Q: 1 m ³ /h ΔP : 0.5 kg/cm ² y 2.0 kg/cm ²	DQO inicial 125000 ppm	85% Reducción	No menciona
				Nitrógeno amoniacal 1710 ppm	60% Reducción	

Apéndice G

Reporte de investigación de múltiples dispositivos de cavitación hidrodinámica

Referencia	Dispositivo / Escala	Tipo de agua	Condiciones de operación		Eficiencia	Número de cavitación Cv					
(Pravin et al., 2021)	Orificio y diodo vórtice Piloto	Aguas residuales sintéticas (4-amino fenol)	ΔP : 0.5–5 bar; CO: H ₂ O ₂ ; Aireación: inyección de aire, oxígeno o helio; SDT: 500–2000 ppm de NaCl	Diodo Vórtice Sin aireación	45% (100 mg/L, 0.5 bar) 18.9% (500 mg/L, 0.5 bar)	Orificio: 0.75 y 0.35 para caídas de presión de 2 y 5 bar, respectivamente Diodo vórtice: no específica					
				Diodo Vórtice Con aireación	80% (500 mg/L, 0.5–2 bar)						
				Orificio Sin aireación	36.7% (100 mg/L, 2 bar) 13.7% (500 mg/L, 5 bar)						
				Orificio Con aireación	No específica						
(Patil et al., 2021)	Diodo vórtice y placa de orificio Piloto	Aguas residuales contaminadas con 1-octanol, dimetilformamida y ciclohexano	ΔP : Para el Diodo Vórtice: 0.5 y 2 bar. Para el orificio: 2 y 5 bar. t: 60 minutos Gases disueltos: aire CO: H ₂ O ₂	Diodo vórtice	Sin aire 37% 1-octanol 12% DMF 2% ciclohexanol Con aire 74% 1-octanol 14% DMF 10% ciclohexanol Sin aire 36% 1-octanol 10% DMF 2% ciclohexanol	Orificio: 0.75 y 0.35 para caídas de presión de 2 y 5 bar, respectivamente Diodo vórtice: no específica					
				Placa de orificio	Con aire 42% 1-octanol 14% DMF 5% ciclohexanol						
				(Sarvotham et al., 2020)	Orificio (D1) Orificio con swirler (D2) Venturi (D3) Venturi con swirler		Contaminante y modelo (2,4 dicloroanilina (DCA))	ΔP : 1 y 2 bar; pH: 7; T: 18°C	Dispositivos grandes (D1-D5)	Misma eficiencia Factor de Degradación ($\varphi \times 10^{-5}$) 7.9 - 9.9	No menciona
									Dispositivos más pequeños (D6-D7)	hasta 100 veces mayor eficiencia (φ de 692.6 vs. 9.9×10^{-5})	

(D4) Vórtice diodo (D5, D6, D7)					
(Jain et al., 2019)	Diodo vórtice Placa de orificio	Agua contaminada con <i>Escherichia coli</i> y <i>Staphylococ- cus aureus</i>	ΔP : Para el vórtice diodo: 0.5, 1.0 y 2.0 bar, para el orificio: 2, 5 y 10 bar; t: 1 hora; T: Ambiente (no se especifica un rango exacto).	E. coli	Diodo vórtice 0.5 bar 99%
					Orificio 2 bar 99%
					0.5 bar 61%
					Diodo vórtice 2 bar 98%
				S. aureus	0.5 bar 68%
					Orificio 10 bar 98%
					No menciona

Apéndice H

Reporte de patentes

Referencia	N° Patente	Tipo de dispositivo	Tipo de agua	Condiciones de operación	Eficiencia
(Grishenkov et. al, 2024)	WO 2024/010535 A1	Reactor multifluidico	Pruebas realizadas con muestras reales de aguas residuales urbanas (Ej. Suecia) con trazas de carbamazepina, diclofenaco, etc.	P: 3 bar, t: 6–10 segundos	Reducción del 44–73% en 1–2 ciclos
(Morrill, 2024)	US 12037269 B2	Plato de orificio Venturi	Agua potable, residual industrial, piscinas, spas, estanques o fuentes.	Q:28-416 L/min	No menciona
(Jiang et al., 2024)	CN 118221257 A	Placas perforadas	Aguas industriales (Farmacéuticas)	No menciona	Reducción de DQO de 92-96%
(Smith, 2020)	WO 2020/236187 A1	Placas de vórtice	Aguas municipales (salmueras y lodos de plantas de tratamiento) Aguas mineras (relaves con metales pesados como arsénico y plomo) Aguas agrícolas (contaminadas con pesticidas y fertilizantes)	No menciona	No menciona
(Ranade et. al., 2014)	US 9422952 B2	Diodo vórtice	Aguas con colorantes sintéticos Efluentes de destilerías Aguas con alta DQO, nitrógeno amoniacal y color	Caída de presión: 0.5-2 bar T: 50-67 °C t:2-3 h Q: 4000 L/h	Reducción DQO 58-90% Reducción color 10-60% Reducción de nitrógeno amoniacal 7-41%
(Ranade et. al., 2017)	US 9725338 B2	Diodo vórtice y placa de orificio	Aguas con alto contenido de nitrógeno amoniacal	t:120 min	Reducción NH ₄ -N de hasta el 80% Reducción DQO 28%
Patentes con restricciones de acceso					
(Bizjan et. al., 2022)	WO 2022/112191 A1	Rotor-estator	No menciona	No menciona	No menciona

(Jin et. al., 2016)	CN 105502626 A	Placa de orificio	No menciona	No menciona	No menciona
(Ge et. al., 2021)	CN 215161767 U	Placa de orificio	No menciona	No menciona	No menciona
(Wu y Feng, 2018a)	CN 108117147 A	Venturi	No menciona	No menciona	No menciona
(Huang et. al., 2024)	CN 221479674 U	Diodo vórtice	Aguas residuales industriales o municipales El diseño es apto para fluidos con carga orgánica o sólidos suspendidos	No menciona	El vórtice de alta velocidad y la cavidad estrecha mejoran el colapso de burbujas vs. sistemas convencionales
(Wu y Feng, 2018b)	CN 208279362 U	Venturi	No menciona	No menciona	No menciona