



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Aplicación de las Microburbujas/Ozonización/Ultrasonido y
Plasma en el Tratamiento de Aguas Residuales: Revisión
Sistemática 2021.**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL**

AUTORES:

García Jara, Segundo Jhon (0000-0003-2348-037X)

Meza Ayala, Yanitza Rosana (0000-0002-9041-3575)

ASESOR:

Mgtr. Honores Balcázar, Cesar Francisco (0000-0003-3202-1327)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Tratamiento y Gestión de los Residuos

LIMA – PERÚ

2021

Dedicatoria

La presente tesis se la dedicamos a nuestras familias que gracias a su apoyo pudimos concluir nuestra carrera profesional.

A nuestros padres y hermanos por su apoyo y confianza en todo lo necesario para cumplir nuestros objetivos como persona y estudiante.

A nuestros compañeros y amigos presentes y pasados, quienes sin esperar nada a cambio compartieron su conocimiento, alegrías, tristezas y a todas aquellas personas que durante estos 4 meses estuvieron a nuestro lado apoyándonos y así lograr que este sueño se haga realidad.
Gracias

Agradecimiento

Mi agradecimiento especial a la Universidad Cesar Vallejo "UCV", la cual me abrió sus puertas para formarme profesionalmente.

En primer lugar, agradecemos a Dios por haberme ayudado maravillosamente en cada paso de esta investigación, facilitando y abriendo caminos, y sobre todo por haberme inspirado.

A la docente MG. Cabellos Torres Rita Jaqueline por brindarnos su tiempo, dedicación y enseñanza, quien nos incentivó en muchos sentidos a seguir adelante y sin su apoyo no hubiera sido posible.

Y a todas aquellas personas que siempre estuvieron a mi lado en las buenas y malas apoyándome.

Gracias

Índice de contenido

Carátula	i
Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Índice de contenido	iv
Índice de tablas	v
Índice de figuras	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	4
III. MÉTODOLÓGÍA	17
3.1. Tipo y diseño de investigación	17
3.2. Categorías, subcategorías y matriz de Operacionalización	17
3.3. Escenario de estudio	20
3.4. Participantes	20
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad	20
3.6. Procedimiento	20
3.7. Rigor científico	21
3.8 Métodos de análisis de la información	21
3.9 Aspectos éticos	21
IV. RESULTADOS Y DISCUSION	22
VI. CONCLUSIONES	31
VII. RECOMENDACIONES	33
REFERENCIAS	34
ANEXOS	
Anexo 1: Matriz de Operacionalización	

Índice de tablas

Tabla 1.	Matriz de categorización	18
Tabla 2.	Métodos de generación de microburbujas y flujos de caudal usados en la fase gas y líquido	23
Tabla 3.	Condiciones operativas y remoción logrados en procesos de combinación híbrida ozono/ultrasónico y microburbujas	27
Tabla 4.	Condiciones operativas y remoción logrados en procesos de combinación híbrida ozono/DBD y microburbujas	29

Índice de figuras

Figura 1.	Diferencia entre macroburbuja y microburbujas	8
Figura 2.	Microburbujas de ozono en medio líquido (acuoso).	9
Figura 3.	Radios de la burbuja con el paso del tiempo, que demuestra la variación del contenido de ozono en la superficie de una burbuja presentada por Wu et al.2019 con un radio inicial de 30 mm.	10
Figura 4.	Formación de radicales libres por termodinámica de las microburbujas	12
Figura 5.	a) Cavitación inducida por la alternancia en los ciclos de compresión y disminución de la densidad de las ondas de ultrasonido, b) choque caótico posterior de las burbujas al superar el tamaño crítico	14
Figura 6.	Velocidades de flujos de gas y de solución acuosa reportadas entre 2017 y 2021 con relación a la generación de microburbujas y su uso con el ozono y aire en POAS.	24
Figura 7.	Remociones logradas en distintas aplicaciones de eliminación de contaminantes orgánicos usando la combinación híbrida ozono/ultrasónico.	25
Figura 8 .	Frecuencia de energía ultrasónica usadas en los tratamientos combinados ozono/ultrasónico.	26

Resumen

Aplicación de la ozonización combinada con ultrasonido o plasma asistido con microburbujas optimiza el proceso de degradación de contaminantes orgánicos recalcitrantes en el tratamiento de aguas residuales dentro de los procesos oxidantes avanzados. La investigación tuvo como objetivo principal evaluar el estado de avance de las combinaciones híbridas ozono/ultrasonido y de ozono/descarga de barrera dieléctrica-plasma (DBD), asistidos por microburbujas debido a su notable atención como un enfoque alternativo y de alto rendimiento en la mineralización de agentes refractarios a sustancias inocuas. La metodología implicó una revisión sistemática de artículos científicos indexados usando palabras clave. Los resultados indicaron parámetros influyentes, relacionados con la densidad de potencia aplicada dosis de ozono, pH flujos de ingreso entre otros factores de control en las condiciones operativas así como a las fuerzas de choque producidas para lograr tamaños adecuados de microburbujas y de la liberación de los radicales principales factores no selectivos en la degradación de los contaminantes.

Palabras clave: microburbujas, ozonización, ultrasonido, descarga de barrera dieléctrica-plasma, aguas residuales

Absract

Application of ozonation combined with ultrasound or microbubble-assisted plasma optimizes the degradation process of recalcitrant organic pollutants in wastewater treatment within advanced oxidative processes. The main objective of the research was to evaluate the state of advancement of the hybrid ozone / ultrasound and ozone / plasma-dielectric barrier discharge (DBD) combinations, assisted by microbubbles due to their remarkable attention as an alternative and high-performance approach in the mineralization of refractory agents to harmless substances. The implicit methodology involves a systematic review of indexed scientific articles using keywords. The results indicated influential parameters, with the applied power density, ozone dose, pH inflow, among other control factors in the operating conditions as well as the shock forces produced to achieve adequate sizes of microbubbles and the release of radicals. main non-selective factors in the degradation of pollutants.

Keywords: microbubbles, ozonation, ultrasound, plasma-dielectric barrier discharge, wastewater

I. INTRODUCCIÓN

El problema del agua contaminada representa una grave problemática que es necesario tratarse para mejorar los métodos o técnicas de su tratamiento especialmente de los efluentes industriales o domésticos (Shangguan, et al. 2018). Dentro de las técnicas más usadas se cuenta con la de oxidación, el uso del ozono dentro de los procesos de oxidación avanzados POAs es el de mayor desarrollo muy aplicado para tratar distintos tipos de agua y aguas residuales porque permite eliminar componentes no biodegradables y orgánicos refractarios (Xiong, et al. 2018). En la actualidad muchos contaminantes en las aguas residuales químicas son tóxicos, mutágenos y cancerígenos, incluidos los fenoles, compuestos aromáticos mono y policíclicos y existen algunas variables que limitan el tratamiento tradicional, una pobre disolución del ozono que genera una lenta tasa de transferencia de masa gas-líquido, por esta razón, la ozonización de microburbujas es recomendada para superar estos inconvenientes (Liu et al. 2018). Las microburbujas poseen un tamaño pequeño (< de 50 μm), lo cual le confiere una extensa área interfacial, con prolongado tiempo de estancamiento, muy baja velocidad de ascenso de burbujas y una presión interna elevada, disolviendo ventajosamente ozono gaseoso en agua (Liu et al. 2018). De otro lado, las aguas residuales de la destilería, poseen propiedades antimicrobianas y antioxidantes y se suele aplicar un proceso físico y químico para su tratamiento con posterior flotación como tecnología de tratamiento posterior, en este proceso las microburbujas funcionalizadas en la superficie, con diámetros cercanos a 1000 nm transportan reactivos secundarios que no influyen en el rendimiento de los principales reactivos del proceso (Zhang et al. 2019).

En realidad el uso de las microburbujas se han venido aplicando en forma diversa es decir de manera integrada a variadas técnicas en las que han destacado la ozonización o los POAs, inclusive existen pocos estudios sobre la aplicación de microburbujas zonificadas en fibra acrílica para tratar las aguas residuales, se ha logrado una notable eficiencia en la remoción de demanda química de oxígeno y otros y mejoró la biodegradabilidad (Zheng et al. 2015).

En la búsqueda de nuevas posibilidades y alternativas aplicadas en la recuperación de las aguas contaminadas, uso de las microburbujas que asisten procesos de tratamientos de aguas residuales es necesario actualizar el estado de las investigaciones para conocer de qué manera se producen los procesos integrados o complementarios, así como los mecanismos y eficiencias que se han ido generando con su desarrollo y las nuevas tendencias y retos en su aplicación.

Respecto a los procesos de oxidación avanzada estos se sustentan en la formación de radicales libres especialmente $\text{OH}\cdot$ como un poderoso oxidante para degradar los compuestos orgánicos recalcitrantes, el uso del ozono es el más común sin embargo se han efectuado combinaciones con otras técnicas y métodos formado híbridos asistido con microburbujas para optimizar e la eficiencia de remoción y disminuir costos de reactivos y de energía, así uno de los métodos es la combinación con la descarga de barrera dieléctrica-plasma (DBD) que presenta una alta tasa de eliminación de contaminantes y una operación simple, asimismo la inclusión de catalizadores acelera el proceso de eliminación (Niam et al. 2018), otra combinación ampliamente usada es la de sonicación, debido a que su adición al ozono estimula de manera significativa la degradación, en este caso los efectos de presión del reactor, consumo de ozono acuoso (Dietrich et al. 2017).

La investigación, ha tenido el objetivo evaluar las aplicaciones de las microburbujas en el tratamiento de las aguas residuales en los procesos de ozonización catalítica ultrasónica y de plasma desde las perspectivas de sus mecanismos y avances recientes centrados en procesos de oxidación avanzada y otros físico-químicos con el fin de brindar un nuevo enfoque accesible al lector como una alternativa y escalamiento a nivel industrial, mediante la revisión de la información académica dispuesta en las revistas científicas. En este documento de investigación se ha planteado como problema general,

PG: ¿Cuál el estado de avance en la aplicación de las microburbujas/ozonización/ultrasonido y plasma en el tratamiento de aguas residuales? y como problemas específicos

PE1: ¿Cuáles son los métodos de generación de microburbujas y flujos de caudal usados en la fase gas y líquido?,

PE2: ¿Cuáles son las condiciones operativas y remoción logrados en procesos de combinación híbrida ozono/ultrasónico y microburbujas?

PE3: ¿Cuáles son las condiciones operativas y remoción logrados en procesos de combinación híbrida ozono/DBD y microburbujas?

El objetivo general fue:

OG: Evaluar el estado de avance en la aplicación de las microburbujas/ozonización/ultrasonido y plasma en el tratamiento de aguas residuales y como problemas específicos

OE1: Evaluar los métodos de generación de microburbujas y flujos de caudal usados en la fase gas y líquido,

OE2: Analizar las condiciones operativas y remoción logrados en procesos de combinación híbrida ozono/ultrasónico y microburbujas

OE3: Analizar las condiciones operativas y remoción logrados en procesos de combinación híbrida ozono/DBD y microburbujas

I. MARCO TEÓRICO

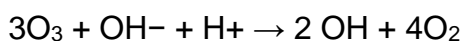
Los Procesos de Oxidación avanzada. La aplicación de procesos de oxidación avanzados (AOP) proporciona una opción de atenuación viable y eficaz debido a la oxidación de una amplia gama se basan en la generación in situ de oxidantes fuertes para la oxidación de compuestos orgánicos, los radicales OH (OH) generados en estos procesos forman parte en la extensas formas de aplicación de los procesos de oxidación avanzada disponibles, aunque también hay otras especies oxidantes favorecidos por los radicales de sulfato o cloro, lo cual se agrega a la lista de oxidantes investigados a nivel global. Varios POA, especialmente los relacionados con la ozonización y la irradiación ultravioleta, ya están bien establecidos y funcionan a gran escala en las instalaciones de tratamiento de agua potable y reutilización de agua (Miklos, et al. 2018; Boczkaj et al. 2017).

La ozonización para el tratamiento del agua ha ido ganando interés en todo el mundo Aunque la desinfección fue la aplicación temprana predominante, como un oxidante poderoso, el O₃ luego se ha empleado para aplicaciones oxidativas en cantidades cada vez mayores, como la oxidación de sulfuros, nitritos y algunos contaminantes es decir compuestos orgánicos compuestos no biodegradables y orgánicos refractarios (Wang, et al., 2019). La molécula de ozono con un potencial de oxidación de 2,07 V es capaz de desinfectar, eliminar el color y degradar los contaminantes en un proceso de una sola unidad (Yang, et al.2018)

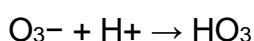
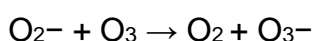
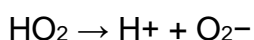
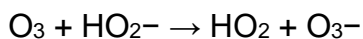
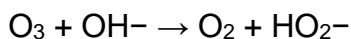
Los AOP incluyen todos los procesos catalíticos y no catalíticos que aprovechan la alta capacidad oxidante del radical hidroxilo (OH), y se diferencian entre sí en la forma en que se genera este radical. Es sabido que el principal motor del proceso se debe a la producción "in situ" de los radicales hidroxilos cuya velocidad de reacción es tan rápida con una amplia variedad de los compuestos orgánicos, aunque con menor cinética con los compuestos organoclorados, es importante generar grandes cantidades de radicales suficientes para interactuar con compuestos orgánicos. Normalmente estos procesos se dividen en dos grandes grupos, como son los procesos homogéneos y heterogéneos, además

de las diferencias que existen entre los procesos que requieren aportes externos de energía en sus distintas formas como la radiante, ultrasónica, eléctrica y en aquellas formas que no lo requieren (Cuerda-Correa, et al., 2019).

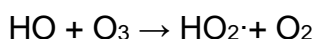
Ozonización. Hay dos formas en las que se desarrolla el mecanismo de oxidación cuando el ozono es aplicado sea como una reacción directa usando ozono disuelto (O_3) y la otra cuando se desarrolla una oxidación indirecta cuando se forman radicales ($\cdot OH$). El desarrollo de estas formas de oxidación cuando se degrada un compuesto es influenciado por variables definidos por la naturaleza del contaminante, la dosis de ozono incluyendo el pH del medio. Cuando se producen condiciones ácidas ($pH < 4$) prevalece la ozonización directa, la cual se expresa de acuerdo a Yu et al. (2018) como:



Cuando el pH supera 9 unidades, entonces la ruta indirecta presenta tasas de degradación que se incrementan, es decir conforme se incrementa el pH, ya que un pH alto favorece la descomposición del ozono en forma de radicales libres tales como expresa :



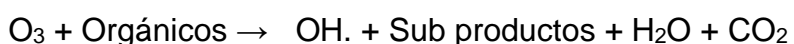
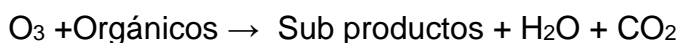
Sin embargo, en condiciones alcalinas, se debe tener en cuenta una reacción secundaria rápida:



Esta última reacción da como resultado una generación rápida de radicales hidroperoxilo ($E^\circ = 1,65 V$) en perjuicio de los radicales $\cdot OH$ ($E^\circ = 2,80 V$) conduciendo la disminución de la capacidad oxidativa del proceso de ozonización y entre los contaminantes se cuentan los antibióticos. En un solo

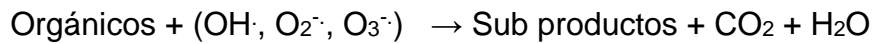
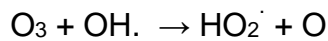
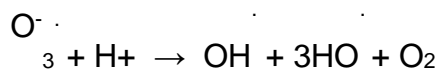
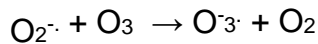
proceso de ozonización, las eficiencias de ozonización siempre estuvieron limitadas por la transferencia de masa relativamente baja debido a la baja solubilidad y estabilidad del ozono en fase líquida. Con la existencia de ozono infrautilizado en la mayoría de los procesos, surgirán problemas como el desperdicio de recursos, un costo de tratamiento bastante alto y un gran daño para la salud humana si se produce una fuga de ozono (Yu, et al. 2018)

Nashmi et al. 2020 expresó que la importancia del efecto del pH en el medio, para generar las reacciones de ozono directas o indirectas, cuando el pH de la solución es ácida, la velocidad de descomposición del ozono es muy lenta e insignificante; entonces el ozono atómico responde directamente con compuestos orgánicos o inorgánicos y los oxida bajo la forma:



En el caso de componentes orgánicos como los colorantes oxidados por el ozono, primero se ataca al grupo cromóforo del colorante rompiendo su configuración, también se ha informado de la rotura de moléculas como fenoles, componentes aromáticos y aminas; pero cuando se trata de aldehídos, ácidos carboxílicos y alcoholes los procesos presentan velocidades de reacción más lentas cuando se les trata con ozono, por lo tanto estas reacciones sean directas o indirectas son selectivas ya que dependen del compuesto objetivo Nashmi et al. 2020. Para unidades de pH superiores a 7, el ozono empieza a descomponerse por la reacción del hidroxilo (OH⁻) y del ozono (O₃) mejorando las reacciones de los radicales hidroxilo con los orgánicos, en el caso de valores de pH ácidos, el ozono molecular llega a reaccionar con los componentes orgánicos y coincide que a valores de pH > 7, la alta tasa de descomposición del ozono provoca reacciones indirectas entre los radicales hidroxilo y los orgánicos (Chu et al. (2017)).

En principio, a partir de la reacción de autodescomposición del ozono, las reacciones de oxidación indirecta mejoradas con HO • proceden a ocurrir generalmente en medio alcalino y se produce las siguientes reacciones en medio líquido:



Por lo tanto, en el método de ozonización, las oxidaciones directas e indirectas por ozono y radicales hidroxilo fueron de gran importancia para la eliminación de colorantes y demanda química de oxígeno.

Por esta razón, es importante efectuar modificaciones que pueden mejorar la transferencia de masa de ozono y promover la formación de $\text{OH}\cdot$, ya que el precursor al proceso es el oxígeno proveniente del aire, entonces la adsorción de ozono en el medio líquido se puede controlar formando una película líquida debido a la resistencia a la difusión molecular del ozono que existe fundamentalmente en medio líquido. La velocidad de transporte de ozono-líquido depende principalmente del área interfacial del ozono-líquido (Ryskie, et al. 2020).

De otro lado, las microburbujas (MB) representan una técnica que ha ganado nuevas áreas de aplicación ya que antes tuvo aplicaciones en la agricultura, medicina, alimentación, actualmente se viene aplicando con mucho éxito en el lavado y el tratamiento de aguas residuales, su diámetro tan pequeño beneficia la transferencia de masa del ozono (Yasui, et al. 2019). La tecnología de microburbujas provee diámetros entre 10 y 50 μm diferenciándose de las macroburbujas (figura 1), poseen grandes áreas interfaciales, baja velocidad de ascenso y elevada presión interna lo cual intensifica la transferencia de masa de gas a la fase líquida (Shangguan et al. 2018).

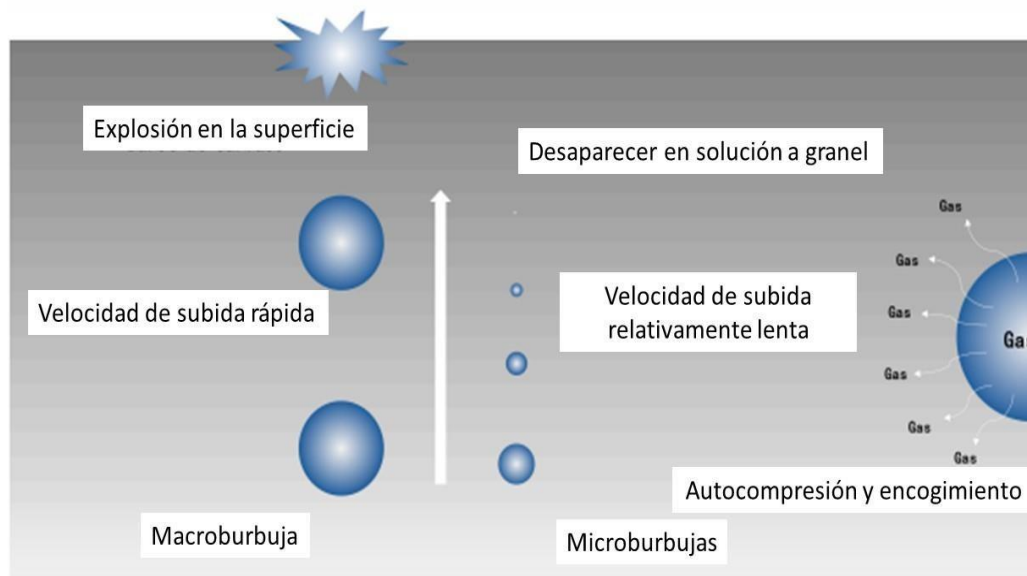


Figura 1. Diferencia entre macroburbuja y microburbujas ,citado por Xiong et al. (2018)

Los informes señalan que la eficiencia de la transferencia de masa del ozono no es elevada, además un elevado costo de operación limita el proceso, por lo que generalmente se requiere una combinación o asistencia con otros métodos que buscan mejores resultados (Zhang et al., 2018b), inclusive se ha ensayado la inclusión de catalizadores sólidos combinadas con el ozono (Huang et al 2018), en reactores con elevada eficiencia, pero requiere del uso de una bomba mezcladora de gas-líquido que promueve la mezcla forzada del con las aguas residuales, dispersa la fase líquida del ozono en una gran masa de microburbujas a microescala, esto aumenta la interfaz gas-líquido y la disolución del ozono (Quan et al. 2017).

Además se usan otras combinaciones ligadas a la ozonización catalítica heterogénea especialmente para mineralizar contaminantes recalcitrantes aunque son ambiguos, desarrollar un proceso de ozonización modificado debe aplicar la viabilidad técnica y económica y esto representa un desafío, por ejemplo combinaciones en el proceso de ozonización, con técnicas de ultrasonido, que responden a la ozonización catalítica homogénea son también recomendada, la irradiación ultrasónica se ha probado mostrando ventajas superiores entre procesos de oxidación avanzada con ozono, asimismo la

combinación de ozonización, microburbujas y ultrasonido muestra un potencial de desempeño óptimo para la transferencia de masa de ozono y generación de $\text{OH} \cdot$ logrando una mayor tasa de mineralización de contaminantes.

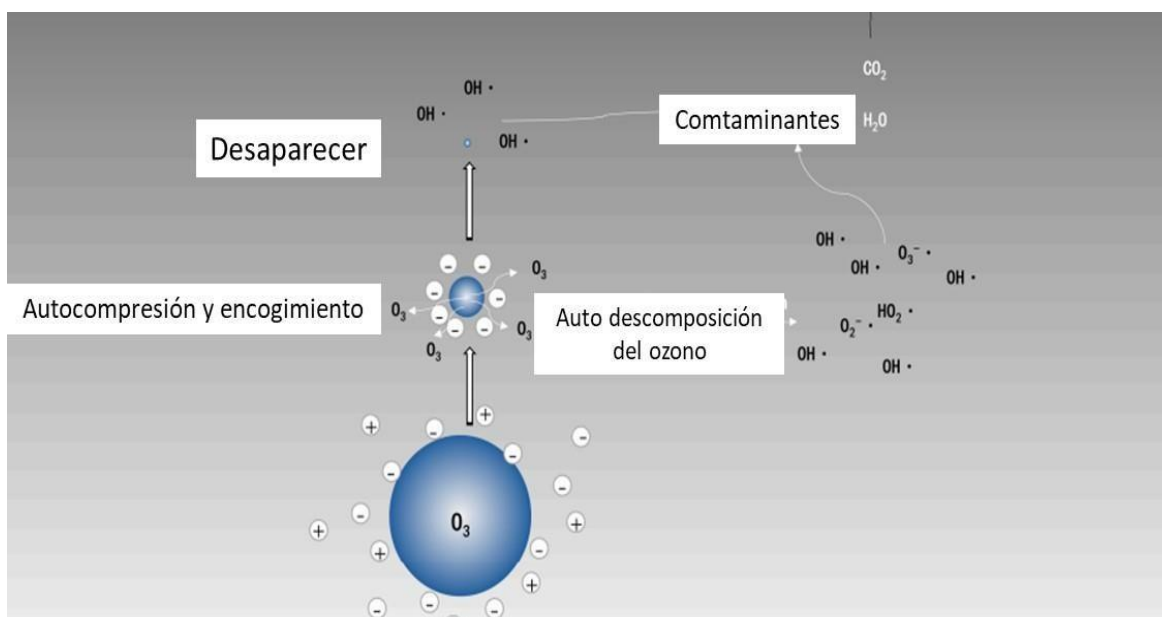


Figura 2: Microburbujas de ozono en medio líquido (acuoso). Fuente Xiong et al (2018)

Características del tamaño de las burbujas. Las microburbujas se definen como burbujas diminutas con diámetros de 10 a 50 μm , poseen una gran superficie interfacial gas-líquido y una velocidad de subida baja y han mostrado propiedades superiores de la química física y los efectos del tamaño (Shangguan, et al 2018), su tamaño siempre aumenta con la disminución de la densidad del líquido como resultado de la baja fuerza de flotabilidad, es decir su tamaño aumenta con la disminución de la fuerza de flotación, que es principalmente una función de la densidad del líquido (Zimmerman, et al.2018), siendo eficaz por la distribución del diámetro como de la densidad del número de microburbujas y cuando disminuyen su tamaño colapsan la fase líquida (ver figura 2), contrariamente a las macroburbujas que siempre estallan en la superficie (Shangguan, et al 2018).

Wu et al (2019) indicó que el tamaño pequeño (menos de 50 μm) de las microburbujas da como resultado un área interfacial enorme y una alta presión

interior, como lo muestra la ecuación de Young-Laplace, que relaciona la diferencia de presión entre el interior (P) de la burbuja y el líquido circundante exterior (P0) para una burbuja de diámetro (d) y tensión superficial de la fase líquida (g) como:

$$P - P_0 = \Delta P = 4Y/d$$

Esto indicaría que el diámetro tan pequeño de las microburbujas conduce a una alta presión interna, el gas presurizado dentro de la burbuja se disuelve de manera eficiente en el agua circundante y junto con su área de superficie proporcionalmente mayor, genera una tasa de transferencia de masa más elevada que el de las burbujas convencionales, se ha sugerido la posibilidad de un comportamiento de transferencia de masa diferente o también la posibilidad de la formación de un campo de reacción crítico (ver figura 3) debido a las propiedades interfaciales de las microburbujas Wu et al (2019).

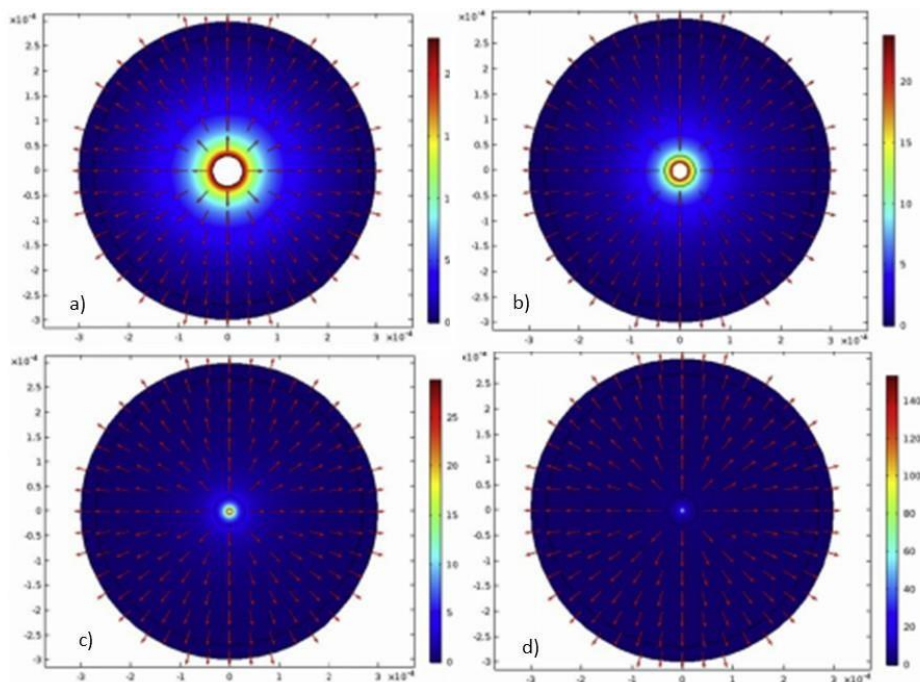


Figura 3. Radios de la burbuja con el paso del tiempo, que demuestra la variación del contenido de ozono en la superficie de una burbuja presentada por Wu et al.2019 con un radio inicial de 30 mm. Fuente: Wu et al. (2019).

De acuerdo a Shangguan el aumento de la tasa de presión interna de la microburbuja podría ser inversamente proporcional a su diámetro, el principio se basa en una lenta elevación en la fase líquida pero también se produciría una

contracción; sin embargo de acuerdo con la ecuación de Young-Laplace, la presión interna aumenta con la contracción de la burbuja, al mismo tiempo más cantidades de gas se disuelven alrededor de la microburbuja por la ley de Henry; esto forma núcleos de hidratos siempre y cuando la contracción de las microburbujas ocurra y se mantenga alrededor o superior al límite de sobre-enfriamiento. Las burbujas con diámetros menores de aproximadamente 50 μm presentan un rendimiento elevado de absorción de oxígeno, debido a la autocompresión y contracción de las microburbujas. A medida que las microburbujas se encogen en el agua, la concentración de gas en la película líquida aumenta, aumentando así la velocidad de la pseudoreacción entonces los iones que se acumulan en la interfaz entre las microburbujas y el medio líquido pueden afectar la mecánica de la reacción general:.

$$r = dC_r/dt = -k_d C$$

donde C_r es la concentración de ozono que participa en la reacción de autodescomposición (mg / L), k_d es la constante de velocidad de primer orden para la reacción de descomposición del ozono (min^{-1}) (Wu et al (2019)).

Generación de radicales hidroxilo. Los radicales libres, especialmente $\text{OH}\cdot$, se generarían a partir de microburbujas colapsadas, que podrían oxidar de forma rápida y no selectiva los compuestos orgánicos, el mecanismo considera el colapso de las microburbujas desarrollado en decenas de segundos, lo que no es suficiente como para generar especies de radicales por temperatura local extremadamente alta, eso significa que la compresión adiabática no ocurriría bajo esta condición, los investigadores concuerdan en que durante el proceso de colapso de la burbuja, se formarían los radicales libres: primero, algunos iones en exceso quedan atrapados en la interfaz de la microburbuja; luego las burbujas colapsan dando lugar a una abrupta desaparición de la interfaz gas-líquido, generando un cambio drástico en el medio; y por último se produce una elevada densidad instantánea de iones generando los radicales libres (ver figura), el $\text{OH}\cdot$ se forma sistemas de ozono-microburbujas, aire-microburbujas y ozono-macroburbuja (Wright, et al 2018), esto fue también observado por Minamoto et al. (2021) al usar azul de bromotileno como indicador de la formación de radical $\text{OH}\cdot$ Cuando aplico la técnica de microburbujas.

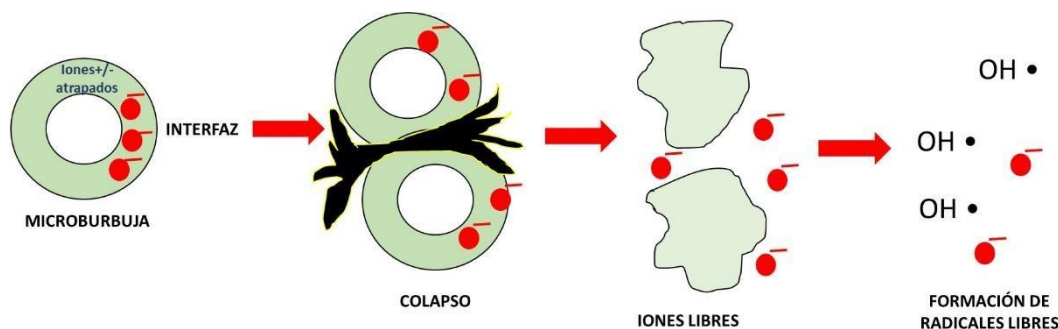


Figura 4: Formación de radicales libres por termodinámica de las microburbujas. Elaboración propia.

La transferencia de masa juega un rol importante en la tecnología de microburbujas a base de ozono, destacan dos momentos: primero, la intensificación de la transferencia de masa de ozono; segundo, la producción de una gran cantidad de radicales $\text{OH}\cdot$ en fase líquida la cual se expresa usando el coeficiente de transferencia de masa, las microburbujas de ozono con un diámetro más pequeño ofrecen una mayor concentración de saturación de ozono y un mayor coeficiente de transferencia de masa (ver figura 4), esto reafirma el enfoque de la contracción y el colapso de las microburbujas de ozono, para generar especies reactivas de oxígeno en la interfaz de las burbujas; seguido de la autodescomposición de las moléculas de ozono, producidas a granel (Nishiyama et al. 2017).

Es importante señalar que estas técnicas de procesos de oxidación avanzada usando ozono, a veces genera residuos peligrosos denominados DBP, por lo que la aplicación de las microburbujas ayuda a eliminarlos, generando una mejora de biodegradabilidad, eso se debe a la producción de una elevada cantidad de $\text{OH}\cdot$, es tan beneficiosa que permite destruir plaguicidas residuales, Li et al (2018) estudió los compuesto o sub-productos de degradación (DBP=subproductos de degradación, siglas en inglés) entre la ozonización de microburbujas y la ozonización de burbujas convencionales y comprobó que cuando se usaba O_3 directamente se formaban bromatos como parte de estos compuestos residuales, aunque esto se reduce cuando se le adiciona amoníaco (Wright et al 2018).

La descarga de barrera dieléctrica de plasma. Pandhal et al. 2018) diseñó un nuevo reactor de microburbujas de descarga de barrera dieléctrica de plasma

(DBD), y las microburbujas de ozono que fueron producidas por este reactor podrían oxidar de manera efectiva especies de cianobacterias tóxicas a producciones inofensivas y también pueden usarse para el pre-tratamiento de biomasa lignocelulósica, para ello es importante los estudios de la relación de exposición a O_3 , exposición a $OH \cdot$ y a otros radicales, se ha demostrado que en medio ácido esta relación es más elevada que en medio neutro / básico, y cuando el pH excede 10, esto es bueno ya que con solo poco ácido se puede lograr mejores resultados en la eliminación de los contaminantes orgánicos ya que en la mayoría de efluentes industriales los líquidos suelen ser ácidos.

Ozonización catalítica combinada con ultrasonido y asistida por microburbujas. Abdurahman, Abdullah (2020) señaló que el radical libre $OH \cdot$, es muy eficaz para degradar compuestos recalcitrantes en medio líquido especialmente en aguas residuales, propuso la ozonización-ultrasonidos como una tecnología híbrida para mejorar la eficiencia cuando se aplica un proceso de oxidación avanzada basada en ozono, su configuración experimental mostro un solo recipiente de reacción conteniendo las aguas residuales, para ello empleo la ecografía proveída por un transductor conectado a un dispositivo de ultrasonido, mientras que un generador de ozono proveyó el burbujeo directo de ozono al medio. Esta técnica se aplicó con alta eficiencia para degradar compuestos recalcitrantes como hormonas y sus derivados, componentes fenólicos, organoclorados, tintes sintéticos, entre otros, de tal manera que el sistema Ultrasonido/ O_3 usa menos energía que la ozonización directa o la sonólisis directa individual, generalmente el ozono reacciona con compuesto orgánicos en medio ácido y neutro, pero si se aplica en medio básico (pH 9), se logra descomponer y producir especies muy reactivas, se debe destacar que el potencial de reducción estándar del ozono (O_3) es +2.07 V y la del radical $OH \cdot$ es +2.8 V, mientras que la potencia de sonido a alta frecuencia (> 20 kHz) o de ultrasonido genera un colapso muy rápido de las burbujas de cavitación en medios líquidos (acuosos) diluidas (ver figura 5) aumentando la temperatura y presión local (hasta 4000 K y 500 bar) Abdurahman, Abdullah (2020).

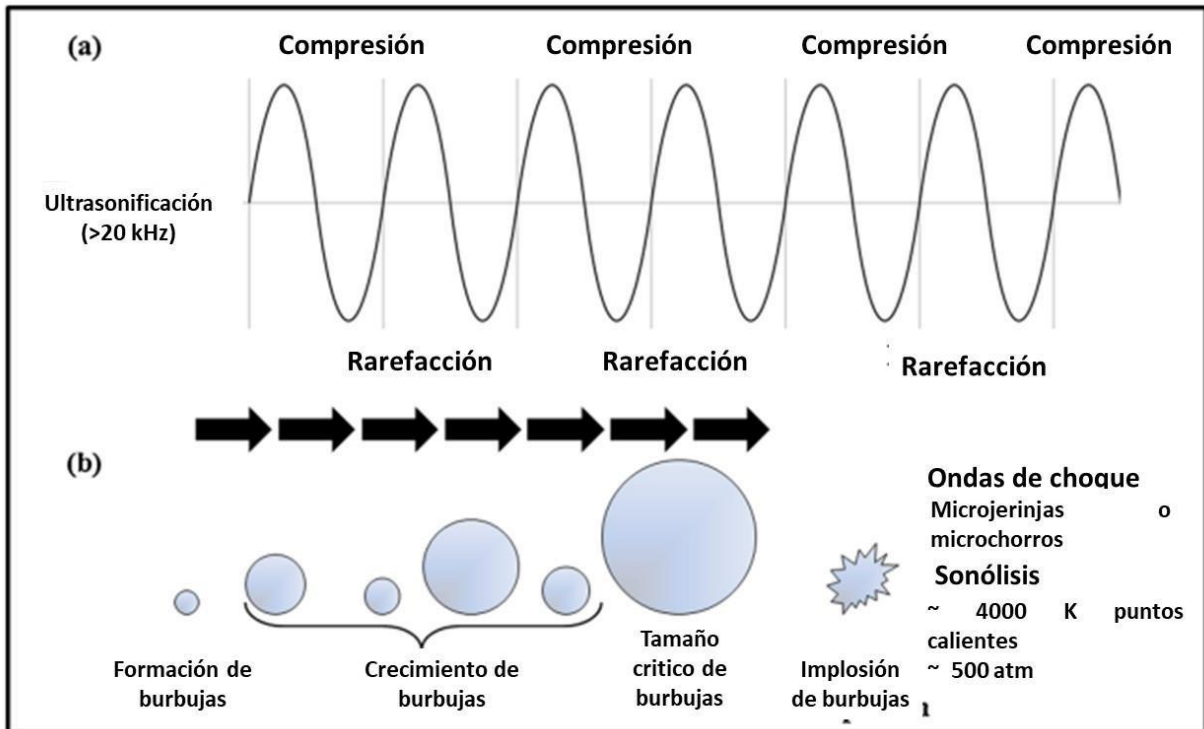
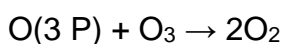
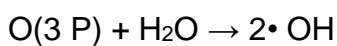
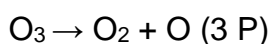
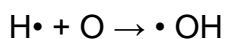
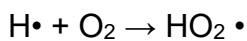
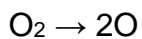
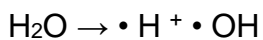


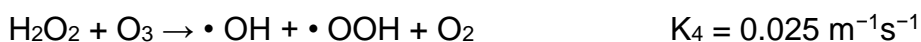
Figura 5. a) Cavitación inducida por la alternancia en los ciclos de compresión y disminución de la densidad de las ondas de ultrasonido, b) choque caótico posterior de las burbujas al superar el tamaño crítico. Un esquema postulado por Abdurahman, Abdullah (2020).

La degradación de sustratos orgánicos puede ocurrir en las burbujas o en el área interfacial principalmente debido a la pirólisis directa de radicales libres que resulta de la sonólisis en fase gaseosa de H₂O para formar radicales libres como H·, OH·, HO₂ formando:



La irradiación ultrasónica combinada con ozonización aumenta los coeficientes de transferencia de masa general durante la ozonización y, en consecuencia, produce más radicales libres, elimina sustratos orgánicos recalcitrantes como m-nitrotolueno, pentaclorofenol y supone que el ultrasonido puede mejorar la descomposición del ozono produciendo más radicales libres y mineralizar los compuestos recalcitrantes (Abdurahman, Abdullah (2020)).

Mecanismo de ozonización-ultrasonido híbrido POA. La irradiación ultrasónica combinada con ozonización (US / O₃) promete evidentemente una mejora deseable para los sistemas de tratamiento de AOP, esta combinación supera la tasa de degradación de los contaminantes orgánicos recalcitrantes a diferencia de los métodos singulares o aplicados por separado, así el ozono se descompone termodinámicamente por el efecto de la irradiación ultrasónica en las burbujas de cavitación y el rendimiento de oxígeno se debe a su transformación en radicales hidroxilo por una reacción directa Abdurahman, Abdullah (2020). En el agua, el ozono una vez disuelto reacciona de manera directa con los componentes orgánicos mediante especies de radicales originados en las moléculas de agua en el proceso de ozonización y sonicación, según expreso Abdurahman, Abdullah, (2020):



Efecto de parámetros operativos. Las condiciones operativas resultan cruciales por que definen la eficiencia de eliminación de los componentes recalcitrantes en un proceso de oxidación avanzada, entre estas condiciones se cuentan la concentración de ozono (gas), tasa de flujo, temperatura, densidad de potencia, pH, eliminador de radicales, concentración inicial del contaminante de interés y el tipo de reactor. Por lo tanto, es necesario encontrar los niveles óptimos de estos parámetros para obtener la mayor eficiencia de degradación posible en aras de una mejor eficiencia de tratamiento y de costos operativos reducidos.

Efecto de la potencia ultrasónica. La potencia ultrasónica o la densidad de potencia (potencia / volumen tratado) influye en la eficiencia de degradación de los componentes orgánicos recalcitrantes ante la combinación de ozono y el ultrasonido, lo que sugiere que la eficiencia de degradación aumenta con el aumento de la potencia ultrasónica, el aumento en la potencia ultrasónica incrementa el colapso de las burbujas, mejorando la degradación es decir la oxidación del radical hidroxilo (OH·), como resultado de la cavitación en el medio acuoso producido a niveles más altos de energía de ultrasonido (Abdurahman, Abdullah, 2020). El **Efecto del pH**, en el proceso global O₃/US altera la velocidad de autodescomposición del ozono y la ruta de reacción que domina en el medio (Xiong et al. 2018). En general, el mecanismo del ozono incluye la oxidación directa por molecular del ozono que predomina en condiciones ácidas, y la oxidación indirecta en la que una condición alcalina favorecerá la formación de OH en el proceso de ozonización. (Abdurahman, Abdullah, 2020). Otro aspecto crucial resulta el **efecto de la dosis de ozono** que puede afectar de manera directa la generación de radicales libres (·OH) y las demás condiciones operativas, por ejemplo la tasa de uso del ozono se calcula a partir de la ecuación:

$$\text{Uso de O}_3 = \left\{ \frac{[\text{O}_3 \text{ (ingreso)} \text{ (mg/L)} - \text{O}_3 \text{ (salida de gas)} \text{ (mg/L)}]}{\text{O}_3 \text{ (ingreso)} \text{ (mg/L)}} \right\} * 100\%$$

Entonces se puede anticipar que el ozono más alto La transferencia de masa puede no terminar con una tasa de utilización de ozono más alta porque KLa es una función de la concentración saturada de ozono y el tiempo, mientras que la tasa de utilización de ozono está relacionada con otras condiciones como la tasa de auto descomposición del ozono (Abdurahman, Abdullah, 2020). **El efecto de la temperatura de reacción**, cuando se trata de una reacción química, la cavitación ultrasónica que conduce a la producción de radicales OH· son muy reactivos a alta temperatura y presión, la temperatura influye en la solubilidad del gas, y el aumento de temperatura en el medio líquido incremento la cantidad de burbujas de cavitación y la presión de vapor produciendo una mayor cantidad de radicales libres, si las burbujas de cavitación se saturan con el vapor de agua, entonces se incrementa la resistencia al movimiento interno o flujo de la burbuja en el proceso de colapso entre burbujas (Chu et al. 2017).

III. METODOLOGÍA

3.1 Tipos y diseño de investigación.

El enfoque de esta investigación es cualitativo narrativo de tópicos pues se describió y se analizó los hallazgos en base a las preguntas de la investigación generadas con el apoyo de la literatura los cuales se basaron de acuerdo al planteamiento del problema y los objetivos del estudio de trabajo sobre la ozonización híbrida con ultrasonido y asistencia de microburbujas y se realizó una recopilación de datos de investigaciones análisis documental y describir los sucesos y hallazgos el cual se realizaron diferentes investigaciones. (DOMINGUEZ, JB., 2015, p.14, 51).

El tipo de investigación es descriptiva, es decir cualitativa y de diseño de revisión sistemática, elaborada a partir de la idea de lo eficiente que resulta la aplicación de las microburbujas en los procesos de oxidación avanzada con uso de ozono para la eliminación de contaminantes recalcitrantes, la información obtenida mediante una revisión documental ha derivado en el análisis de publicaciones compiladas en relación al tema descriptivo. Esta investigación buscó actualizar el enfoque actual sobre los avances en temas de técnicas híbridas, la cual se relaciona con nuevos conocimientos de las prácticas que puedan hacer referencia los análisis teóricos. A su vez esto ha servido para descubrir y analizar preguntas de investigación, con el apoyo de la revisión de literatura para apoyar los planteamientos del problema, el tipo de trabajo realizado es de carácter documental pues analiza las publicaciones compiladas en relación al tema.

3.2 Categorías, Sub categorías y matriz de categorización apriorística.

Este documento sirvió como guía para el contenido de la información requerida, ya que de acuerdo a ellos se tomaron en cuenta los diferentes aspectos del estudio considerando los objetivos del tema investigado, estas categorías fueron clasificadas como: Técnicas híbridas de ozono en POAs, Tipos de contaminantes (emergentes orgánicos, colorantes textiles, residuos m de medicamentos, componentes orgánicos recalcitrantes entre otros) y condiciones de operacion.

Tabla 1. Matriz de categorización

Objetivos Específicos	Problemas Específicos	Categorías	Unidad de Análisis
<p>Evaluar los métodos de generación de microburbujas y flujos de caudal usados en la fase gas y líquido</p>	<p>¿Cuáles son los métodos de generación de microburbujas y flujos de caudal usados en la fase gas y líquido?</p>	<p>Métodos de Generación de burbujas</p>	<p>Juawana et al. (2018), Juwana et al. (2019), Hu y Xia (2018), Xu et al. (2018), Zhang et al. (2018), Majid et al. (2018), Deendarlianto et al. (2017), Sun et al. (2017), Cheng et al. (2019), Gao et al. (2019), Huang et al. (2020), Nam et al. (2021), Wu et al. (2019), Azuma et al. (2019), Liu et al. (2018), Sun et al. (2020), Hanotu et al (2017)</p>
<p>Analizar las condiciones operativas y remoción logrados en procesos de combinación híbrida ozono/ultrasónico y microburbujas</p>	<p>¿Cuáles son las condiciones operativas y remoción logrados en procesos de combinación híbrida ozono/ultrasónico y microburbujas?</p>	<p>Ozono/ultrasonido/microburbujas</p>	<p>Wang, et al. (2019), Shen, et al. (2017), Jawale y Gogate (2018), Wang, et al. (2019), Dietrich et al (2017)</p>

<p>Analizar las condiciones operativas y remoción logrados en procesos de combinación híbrida ozono/DBD y microburbujas</p>	<p>¿Cuáles son las condiciones operativas y remoción logrados en procesos de combinación híbrida ozono/DBD y microburbujas?</p>	<p>Ozono/DBD/microburbujas</p>	<p>Ren et al. (2019), Nian. Et al. (2019), Zheng et al. (2019), Ren et al. (2018), Krupez et al. (2018), J. Wang et al. (2017), G. Zhang et al. (2017), Ma et al. (2018)</p>
---	---	--------------------------------	--

3.3 Escenario de estudio.

Esta investigación responde a una revisión sistematizada de artículos científicos arbitrados a nivel mundial todos relacionados con la aplicación de ozono bajo técnicas híbridas asistidas con microburbujas, por lo que no hubo un escenario de trabajo definido.

3.4 Participantes

Al ser de carácter bibliográfico el trabajo fue realizado exclusivamente por el autor con el apoyo de un asesor en la investigación, así que la recopilación de datos o de información obtenida de artículos publicados en revistas científicas, se basó en el manejo de la base de datos de ScienceDirect, Scielo, Google Académico, Scopus y EBSCO, seleccionados con 5 años de antigüedad como máximo es decir de 2017 al 2021.

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

En este trabajo bibliográfico se obtuvo información de fuentes secundarias de artículos científicos en el cual destaca la técnica de análisis documental (DOMINGUEZ, 2015, p.52). La búsqueda de datos o revisión sistemática se realizó en base a la temática del tratamiento de aguas residuales para la eliminación de contaminantes orgánicos especialmente recalcitrantes sometidos a procesos de oxidación avanzada usando ozono asistido por microburbujas como corresponde a un trabajo de investigación Los cuales se seleccionaron de acuerdo a las categorías y subcategorías, además se consideró la antigüedad de los artículos y la relevancia de acuerdo el tema.

3.6 Procedimientos.

Para la recopilación de datos se revisó diferentes artículos científicos de acuerdo al tema de investigación, cual se utilizaron palabras claves en inglés y español: ozonización, ultrasonido, hibridación, asistido por microburbujas, parámetros de operación, aguas residuales, el cual fueron buscados en la base de datos de :ScienceDirect, Scielo y Google Académico, Scopus, Ebsco, Estos artículos se analizaron de forma minuciosa, como registro de antigüedad de estos artículos es no menor de 5 años y los criterios de exclusión fueron: por no contener

información relevante de acuerdo al tema y por no ser artículos indexados y aquellos que no fuesen de fuentes confiables.

3.7 Rigor científico.

Los artículos utilizados se fundamentaron en descripciones teóricas de autores de revistas indexadas, el cual dará credibilidad de que dichas investigaciones son confiables que contengan dependencia, credibilidad, transferencia confirmación y autenticidad (HERNANDEZ, FERNANDEZ Y BAPTISTA, P. 453-459). Además, estos artículos permiten comprender los métodos e instrumentos utilizados que garanticen la credibilidad de las bases científicas y el autor ha mantenido principios éticos reconociendo cada fuente de información, bajo las citas correspondientes y referencias bibliográficas, el uso de gráficos etc.

3.8 Método de análisis de información

La información se agrupó de acuerdo a las categorías y subcategorías para el desarrollo de todo el trabajo de investigación, comprendieron en lo siguiente: Técnicas híbridas de ozono en POAs, Tipos de contaminantes (emergentes orgánicos, colorantes textiles, residuos m de medicamentos, componentes orgánicos recalcitrantes entre otros) y condiciones de operación. Para esto se usaron palabras claves correspondientes a las categorías y subcategorías incluyendo indicadores de búsqueda.

3.9 Aspectos éticos.

Este trabajo de investigación fue elaborado con citas de fuentes confiables como revistas indexadas, se respetó citas de autores y las referencias bibliográficas, teniendo como referencia el manual ISO 690 de la Universidad César Vallejo, los resultados son respaldados de acuerdo a los criterios de rigor científico según normativa. Se desarrolló en base a las categorías y sub categorías de investigación fundamentados en los objetivos del tema estudiado, con respecto a trabajos que antecedieron a esta tesis para poder realizar el análisis correspondiente

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

OE1: Los métodos de generación de microburbujas y flujos de caudal más usados se presentan en la tabla 4. De acuerdo a John et al. (2020) el enfoque hidrodinámico resulta la metodología más aplicada en la producción de microburbujas debido al balance energético que favorece su control siendo los más usados el de flujo turbulento, cizallamiento mecánico, disolución presurizada y desprendimiento forzado de burbujas. Cheng et al. (2019) ha informado del uso de la bomba mezcladora de gas y líquido empleada para dispersar la mezcla de gas de oxígeno y ozono en numerosas microburbujas de gas con microescala en un reactor de microburbujas, esto genera una mezcla obligada de ozono y las aguas residuales o su mezcla con el sustrato, mejorando la tasa de transferencia de masa. En las aplicaciones de ozono, los sistemas de cizallamiento mecánico y disolución presurizada, resultan en una buena combinación. Silva Henauth et al., 2017 señalan que los generadores de microburbujas de corte mecánico suelen usar dispositivos giratorios y de bombeo, mediante bombas centrífugas, también son usadas las bombas de turbina (Yao et al., 2016) o de mezcla externa (Li et al., 2016). Cheng et al. (2019) ha usado la bomba mezcladora de gas y líquido para dispersar la mezcla de gas de oxígeno y ozono en numerosas microburbujas de gas con microescala en un reactor de microburbujas, obligando a los flujos de ozono y agua residual a mezclarse totalmente, esta acción mejora el proceso de oxidación avanzada y con ella la tasa de transferencia de masa. Gao et al. (2019) usó también un generador de microburbujas, con mezclador de gas con el líquido con giros a una elevada velocidad, así la rotación formó una cavidad de presión negativa en el tanque de mezcla y así logro una gran fuerza de corte. En cambio los generadores de microburbujas de flujo turbulento resultan escalables, con tasas de flujo de líquido reportadas de hasta 30 m³ hr⁻¹ y el generador con oscilador fluídico genera la oscilación del fluido a través de un canal diseñado para provocar el desprendimiento prematuro de burbujas en los orificios del difusor optimizando el proceso (Nam et al. 2021).

Tabla 2. Métodos de generación de microburbujas y flujos de caudal usados en la fase gas y líquido.

Flujo	Tipo	Scala	Gas	Velocidad de flujo de gas (m ³ h ⁻¹)	Velocidad flujo líquido (m ³ h ⁻¹)	Referencia
Turbulento	orificio	laboratorio	aire	0.06	4.8	Juawana et al. (2018), Juwana et al. (2019)
	arremolinedo	laboratorio	ozono	0.24	16.2	Hu y Xia (2018)
		laboratorio	aire	0.53	0.7	Xu et al. (2018)
		laboratorio	ozono	0.02		Zhang et al. (2018)
	Venturi	laboratorio	aire	0.06	4.8	Majid et al. (2018)
		laboratorio	aire	0.06	4.8	Deendarlianto et al. (2017)
		laboratorio	aire	0.12	30	Sun et al. (2017)
	corte mecanico	laboratorio	ozono	0.18		Cheng et al. (2019)
	generador de corte forzado	laboratorio	ozono	0.03		Gao et al. (2019)
	Bomba de mezcla gas-liquido	laboratorio	ozono	0.18		Huang et al. (2020)
	generador de corte forzado	laboratorio	ozono	0.06	4.5	Nam et al.
	bomba centrifuga	laboratorio	ozono	0.03	0.6	Wu et al. (2019)
Disilución presurizada		laboratorio	ozono	0.02		Azuma et al. (2019)
		laboratorio	ozono	0.12		Liu et al. (2018)
Difusor	dispositivo 0.22 - 0.55 um	laboratorio	ozono	0.03		Sun et al. (2020)
desprendimiento de burbujas forzado	oscilacion fluidica	piloto	aire	No informado	No informado	Hanotu et al (2017)

De acuerdo a lo registrado, se presenta la figura, que muestra la tendencia en la aplicación de los flujos de gas (ozono) y de solución acuosa aplicadas en procesos de oxidación avanzada.

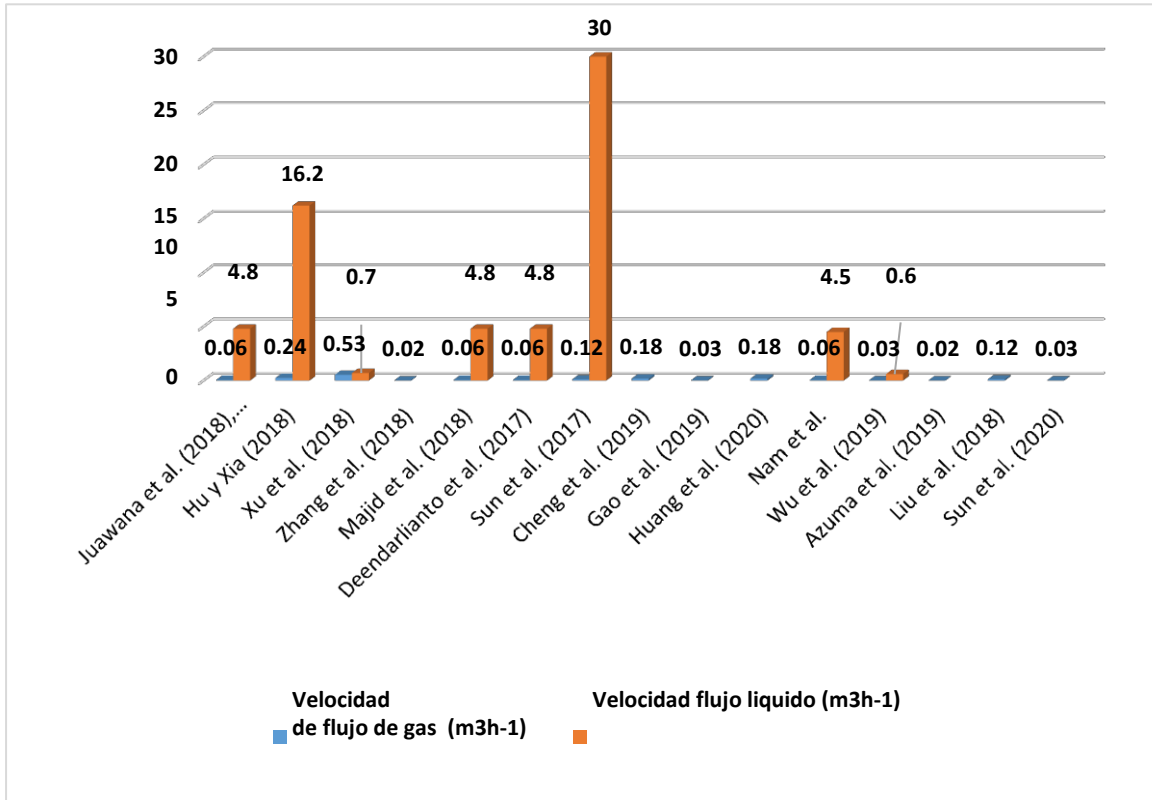


Figura 6. Velocidades de flujos de gas y de solución acuosa reportadas entre 2017 y 2021 con relación a la generación de microburbujas y su uso con el ozono y aire en POAS.

OE2: combinación híbrida Ozono/ultrasonico

Respecto a la combinación ozono/ultrasonido, el efecto sinérgico sobre la constante de velocidad de reacción de debería a la formación de $\text{OH} \cdot$ adicional, al aumento de la potencia de energía de ingreso ultrasónico y a una mayor concentración de ozono que generaron mayores cantidades de $\text{OH} \cdot$ en la fase acuosa, para eliminar los contaminantes refractarios y biorrefractarios (Xiong et al. 2018). Dietric et al (2017) a pH neutro, se logra una óptima eliminación de 1,4-dioxano usando la técnica híbrida del ozono/ultrasonido combinados es impulsada por la formación de radicales $\text{OH} \cdot$, y por la tasa de consumo de ozono. Más aun Xiong et al (2018) enfatiza que los radicales $\text{OH} \cdot$ obedecen a la auto-descomposición del ozono (O_3); seguido de la descomposición térmica del agua; con posterior formación de O atómico el cual reacciona con la molécula de H_2O molecular; y finalmente se genera el colapso de microburbujas. Respecto a las condiciones de operación la aplicación de la energía ultrasónica oscila entre 1000 – 1500 W con frecuencias menores a 50 KHz a temperaturas mesofílicas (Wang et al 2019).

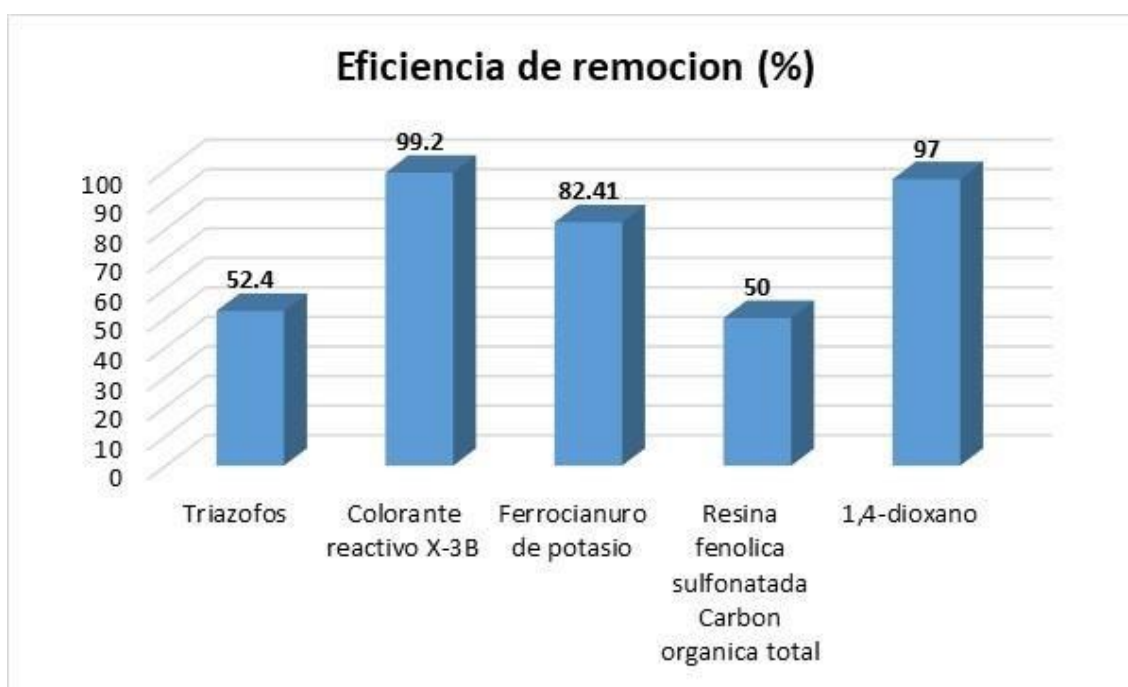


Figura 7. Remociones logradas en distintas aplicaciones de eliminación de contaminantes orgánicos usando la combinación híbrida ozono/ultrasónico.

De acuerdo a la figura, elevadas eficiencias de remoción han sido logradas de 99.2% sobre colorantes sintéticos recalcitrantes y de dioxanos en aguas

residuales, sin embargo cuando se trata de contaminantes demasiado recalcitrantes como resinas fenólicas, la eficiencia disminuye debido a la estabilidad de la estructura molecular, que bajo las técnicas podría no superar el 20% de remoción.

También una revisión de las frecuencias de energía ultrasónica usada, los niveles son menores a los 40 KHz que logra causar el colapso de las microburbujas para la generación de los radicales OH. Que terminan eliminado de manera no selectiva a los contaminantes orgánicos.

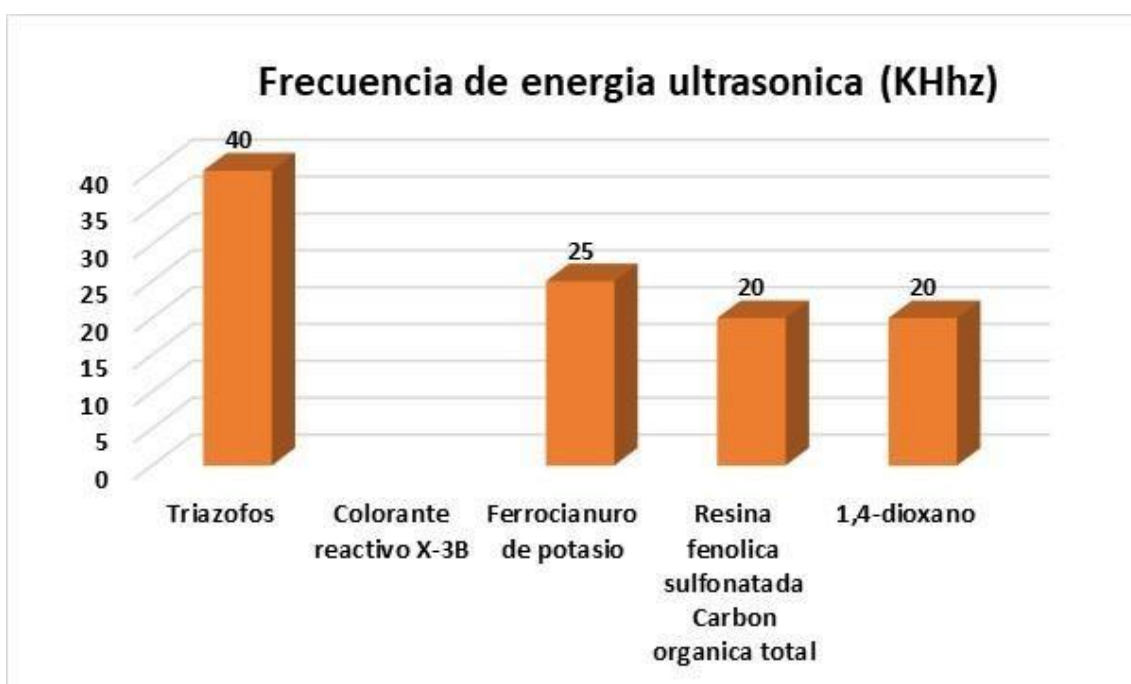


Figura 8 Frecuencia de energía ultrasónica usadas en los tratamientos combinados ozono/ultrasónico.

La tabla presenta los resultados respecto a las condiciones operativas más aplicadas en los procesos combinados ozono/ultrasónico asistidos por microburbujas.

Tabla 3. Condiciones operativas y remoción logrados en procesos de combinación híbrida ozono/ultrasónico y microburbujas

Combinación	Contaminante	Eficiencia de remoción	Condiciones operativas	Referencia
O3/Ultrasonido	Triazofos	Remoción: 52.4% tiempo: 90 min Co=20 mg/L Temperatura inicial = 20 °C Flujo de ozono: 1.2 mgL-1 pHo: 6.85	Temperatura inicial = 37 °C ozono: 400 mg h-1 pH inicial: 3.2 Energía ultrasónica: 1500 W Frecuencia de energía ultrasónica: 40 kHz	Wang, et al. (2019)
O3/Ultrasonico	Colorante reactivo X-3B	Remoción= 99.2% tiempo= 6 min	Flujo de ozono: 40 Lh-1 pH inicial: 6.52 Densidad de energía ultrasónica: 200 WL-1	Shen, et al. (2017)
O3/Ultrasonico	Ferrocianuro de potasio	Remoción: 82.41% tiempo= 90 min concentración=200 mgL-1	Temperatura inicial = 35 °C dosis de ozono: 400 mg h-1 Energía ultrasónica: 1 kW Frecuencia de energía ultrasónica: 25 kHz	Jawale y Gogate (2018).
O3/Ultrasonico	Resina fenólica sulfonatada Carbón orgánico total	Remoción= 50% tiempo= 5 min remoción de carbón orgánico total= 75% tiempo= 120 min	ozono: 300Lh-1 energía ultrasónica=1000 W Frecuencia de energía ultrasónica=20 kHz	Wang, et al. (2019)
O3/Ultrasonico	1,4-dioxano	Remoción= 97% tiempo= 16 min	ozone dosis = 2.5 mg/L Frecuencia de energía ultrasónica = 20-kHz energía ultrasónica = 2 kW	Dietrich etal (2017)

OE3: Condiciones operativas y remoción logrados en procesos de combinación híbrida ozono/DBD y microburbujas

La tecnología combinada de plasma/ozono y microburbujas viene evolucionando en una serie de híbridos con la inclusión de nanopartículas como catalizadores, Sin embargo que la degradación de compuestos orgánicos sintéticos mediante el híbrido DBD/ozono/microburbujas debido a la limitación de una elevada necesidad de electricidad y su mineralización ineficiente, por si solos, la inclusión de catalizadores resulta un enfoque innovador porque incrementa el rendimiento energético de DBD, y mejora la eficiencia de degradación de los contaminantes Ma et al. (2018) señaló la gran eficiencia en la eliminación de aceites usados como fluidos de corte y con microorganismos patógenos *K. pneumoniae*, *P. aeruginosa*, *E. coli* y *P. vulgaris* además de contar con ventajas de bajo consumo de energía y una estructura simple, con la aplicación de 1000 mg/L de ozono inyectado en un reactor de microburbujas que mejoró la reactividad y la tasa de inactivación, logrando una eficiencia de 99,99%. Mientras que Ren et al. (2019) degradó el ácido trans-ferúlico (FA) usando estategica de plasma de descarga de barrera dieléctrica (DBD) de película descendente de agua acoplado a catalizador con una remoción de 98,2% en un tiempo de 10 min con una tensión de 11,2 kV, en este caso la evolución de los radicales mostró una sinérgia del plasma DBD y el catalizador en medio de ozono y de H₂O₂ para formar •OH en lugares activos de la superficie del catalizador. Sin embargo Nian. Et al. (2019) aplico plasma no térmico (DBD) combinado con nanohojas de óxido de grafeno en medio ZnO-rGO para eliminar el metilparabeno (MeP) en solución acuosa, demostró que el efecto de la aplicación de una potencia de descarga de 20 W, concentración inicial del contaminante, pH inicial 7.0 y el caudal de aire usado de 20 L / h en un tiempo de 15 min generaba el 99% de degradación o remoción (ver tabla).

Tabla 4: Condiciones operativas y remoción logrados en procesos de combinación híbrida ozono/DBD y microburbujas

Tipo de equipo/reactor	Contaminante	Condiciones operativas	Volumen de la fase acuosa (cc)	Remoción (%)	Dieléctrico	Fuente de energía	Electrodo	zona de Descarga (mm)	Referencia
DBD reactor cilíndrico	ácido trans-ferúlico (FA)	tiempo=10 min 11.2 KV	300	98.2	cuarzo	AC	acero	10	Ren et al. (2019)
DBD reactor cilíndrico	metilparabeno (MeP)	tiempo=15 min 11.2 KV	1000		cuarzo	AC	acero inoxidable	no indica	Nian. Et al. (2019)
barrera dieléctrica descarga plasma en 3 combinación con Bi ₂ WO ₆ -rMoS ₂ . Reactor en platos	sulfamethoxazole (SMZ)	tiempo=21 min 13 K20W	150	95.5	cuarzo	AC	aluminio	10	Zheng et al. (2019)
DBD reactor cilíndrico	Ácido trans-ferúlico (FA)	tiempo=10 min 11.2 KV	150	62.5	cuarzo	AC	aluminio	5	Ren et al. (2018)
DBD reactor cilíndrico	Nicotina	frecuencia 17 kV 300 Hz Energía 60 W,	500	80	pirex	AC	no indica	4.5	Krupez et al. (2018)

DBD reactor platos	CAFEINA	tiempo=24 min 75W	100	94	cuarzo	AC	aluminio	10	J. Wang et al. (2017)
DBD reactor cilindrico	APAP	tiempo=18 min 24 KW	180	92	cuarzo	AC	cobre	9.38	G. Zhang et al. (2017)
sistema de plasma de descarga de barrera dieléctrica (DBD)	K. pneumoniae, P. aeruginosa, E. coli y P. vulgaris	Remocion= 99.99% 1000 ppm de ozono caudal de aire de 10 L / min. Transformador de 15 kV, 20 kHz		99.99	cuarzo	AC	línea de cobre en espiral como electrodo de tierra		Ma et al. (2018)

V. CONCLUSIONES

OE1: Los métodos de generación de microburbujas y flujos de caudal más usados dependen de la hidrodinámica que determina su balance energético para generar y controlar los flujos turbulentos y de corte mecánico, estos sumados al incremento de presión interna ha logrado una formación forzada de las microburbujas. Esta operación ha logrado un mayor contacto íntimo entre el ozono gaseoso y el sustrato optimizando los coeficientes de transferencia de masa, la cuestión es que estas burbujas contienen una serie de radicales en su interior y la energía de cizalla mecánica y disolución presurizada fomenta la liberación de estos radicales no selectivos. Así la dispersión de las mezclas con giros muy veloces aumenta su rotación produciendo cavidades de succión en el reactor especialmente produce flujos turbulentos que mejoran los procesos de remoción de los contaminantes recalcitrantes.

OE2: La combinación ozono/ultrasonido, asistidos por microburbujas forma parte de las combinaciones híbridas que buscan un efecto sinérgico en la velocidad de reacción para generar radicales libres potentes como $\text{OH} \cdot$, sin embargo el incremento del potencial energético del equipo de ultrasonido para generar las vibraciones también se deben asociar a una mayor concentración de ozono de tal forma que las cavitaciones abruptas que liberan y rompen las microburbujas aceleren la salida de mayores concentraciones de $\text{OH} \cdot$ en el seno del líquido. El efecto del pH depende de la naturaleza de las aguas a tratar, y ejerce una influencia sobre el desarrollo del proceso, así las condiciones de operación incluyen frecuencias cercanas a los 50 KHz y potencia que alcanzan los 2 KW, entre otros factores, resulta obligatorio buscar la disminución de consumo energético, ello viene generando la aplicación de catalizadores para optimizar el proceso de degradación de los contaminantes orgánicos, de patógenos y de componentes recalcitrantes.

OE: La aplicación de DBD/ozono/microburbujas para degradar compuestos orgánicos sintéticos es muy eficiente sin embargo, se produce un mayor consumo de energía eléctrica, para lograr la mineralización, por ello entre las condiciones de operación se viene incorporando la aplicación de catalizadores que aceleran el proceso se requieren entonces grandes dosis de ozono que

pueden bordear los 1000 mg/L para aumentar el rendimiento en la degradación, la potencia, el tipo de electrodo y la forma de aplicación resultan factores relevantes que sumados a los fisicoquímicos de operación como el pH, temperatura y tiempo de reacción sugieren que la inyección de microburbujas mejora la reactividad y la tasa de eliminación del agente contaminante.

VI. RECOMENDACIONES

Los estudios sobre la aplicación de sistemas híbridos combinados de ozono/ultrasonido/microburbujas/plasma y otros deben buscar la disminución del consumo energético, formación de lodos y mayor rendimiento, y deben incluir nuevas rutas que incluyan el manejo de catalizadores de mayor vida o reúso que no ponga en peligro la salud humana debido a la formación de sub productos. Efectos o de la concentración de ozono, el tiempo de tratamiento, la presión del reactor, la intensidad del ultrasonido y los captadores de radicales hidroxilo se pueden investigar usando los distintos enfoques de flujo y diversas condiciones de operación. También es importante investigar en los mecanismos de degradación de los contaminantes, estos deben abordar la cinética de remoción, así como la selección óptima de los electrodos sumados a evaluaciones de consumo de energía y costos de inversión en reactores

REFERENCIAS

- Abdurahman, M. H., & Abdullah, A. Z. (2020). Mechanism and reaction kinetic of hybrid ozonation-ultrasonication treatment for intensified degradation of emerging organic contaminants in water: A critical review. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 154, 108047. doi:10.1016/j.cep.2020.108047
- Ansari, M., Sharifian, M., Ehrampoush, M. H., Mahvi, A. H., Salmani, M. H., & Fallahzadeh, H. (2020). Dielectric barrier discharge plasma with photocatalysts as a hybrid emerging technology for degradation of synthetic organic compounds in aqueous environments: A critical review. *Chemosphere*, 128065. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.128065
- Azuma, T., Otomo, K., Kunitou, M., Shimizu, M., Hosomaru, K., Mikata, S., Mino, Y., & Hayashi, T. (2019). Removal of pharmaceuticals in water by introduction of ozonated microbubbles. *Separation and Purification Technology*, 212, 483–489. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.11.059>
- Boczkaj, G., & Fernandes, A. (2017). Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes at basic pH conditions: A review. *Chemical Engineering Journal*, 320, 608–633. doi:10.1016/j.cej.2017.03.084
- Cheng, W., Jiang, L., Quan, X., Cheng, C., Huang, X., Cheng, Z., & Yang, L. (2019). Ozonation process intensification of p-nitrophenol by in situ separation of hydroxyl radical scavengers and microbubbles. *Water Science and Technology*, 80(1), 25–36. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.227>
- Chu K.H., Y.A.J. Al-Hamadani, C.M. Park, G. Lee, M. Jang, A. Jang, N. Her, A. Son, Y. Yoon, Ultrasonic treatment of endocrine disrupting compounds, pharmaceuticals, and personal care products in water: a review, *Chem. Eng. J.* 327 (2017) 629–647, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.06.137>
- Cuerda-Correa, Alexandre-Franco, & Fernández-González. (2019). Advanced Oxidation Processes for the Removal of Antibiotics from Water. An Overview. *Water*, 12(1), 102. doi:10.3390/w12010102
- Deendarlianto, D., Indarto, I., Juwana, W., Afisna, L., & Nugroho, F. (2017). Performance of porous-venturi microbubble generator for aeration process.

Journal of Energy, 34 A. JOHN ET AL. Mechanical, Material and Manufacturing Engineering, 2(2), 73–79. <https://doi.org/10.22219/jemmme.v2i2.5054>

Dietrich, M., Andaluri, G., Smith, R. C., & Suri, R. (2017). Combined Ozone and Ultrasound for the Removal of 1,4-Dioxane from Drinking Water. *Ozone: Science & Engineering*, 39(4), 244–254. doi:10.1080/01919512.2017.1321981

Gao, Y., Duan, Y., Fan, W., Guo, T., Huo, M., Yang, W., Zhu, S., & An, W. (2019). Intensifying ozonation treatment of municipal secondary effluent using a combination of microbubbles and ultraviolet irradiation. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(21), 21915–21924. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05554-8>

Hanotu, J., Bandulasena, H., & Zimmerman, W. (2017). Aerator design for microbubble generation. *Chemical Engineering Research and Design*, 123, 367–376. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.01.034>

Hu, L., & Xia, Z. (2018). Application of ozone micro-nano-bubbles to groundwater remediation. *Journal of Hazardous Materials*, 342, 446–453. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.08.030>

Huang, X., Cheng, W., Quan, X., Cheng, C., Cheng, Z., & Yang, L. (2018). Catalytic Ozonation of Biologically Treated Leachate from Municipal Solid Waste in a Microbubble Reactor. *Ozone: Science & Engineering*, 1–12. doi:10.1080/01919512.2018.1555027

Huang, X., Quan, X., Cheng, W., Cheng, C., Cheng, Z., Yang, L., & Jiang, L. (2020). Enhancement of ozone mass transfer by stainless steel wire mesh and its effect on hydroxyl radical generation. *Ozone: Science & Engineering*, 42(4), 347–356. <https://doi.org/10.1080/01919512.2019.1676196>

Jawale, R. H., & Gogate, P. R. (2018). Combined treatment approaches based on ultrasound for removal of triazophos from wastewater. *Ultrasonics Sonochemistry*, 40, 89–96. doi:10.1016/j.ultsonch.2017.02.019

- Jawale, R. H., Tandale, A., & Gogate, P. R. (2017). Novel approaches based on ultrasound for treatment of wastewater containing potassium ferrocyanide. *Ultrasonics Sonochemistry*, 38, 402–409. doi:10.1016/j.ultsonch.2017.03.032
- John, A., Brookes, A., Carra, I., Jefferson, B., & Jarvis, P. (2020). Microbubbles and their application to ozonation in water treatment: A critical review exploring their benefit and future application. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1–43. doi:10.1080/10643389.2020.1860406
- Juwana, W. E., Widyatama, A., Dinaryanto, O., Budhijanto, W., & Indarto, D. (2019). Hydrodynamic characteristics of the microbubble dissolution in liquid using orifice type microbubble generator. *Chemical Engineering Research and Design*, 141, 436–448. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.11.017>
- Juwana, W. E., Widyatama, A., Wiratni, I. & Deendarlianto. (2018). An evaluation of the horizontal injection microbubble generator [Paper presentation]. <https://doi.org/10.1063/1.5062742>
- Krupez, J., Kovacevic, V.V., Jovic, M., Roglic, G.M., Natic, M.M., Kuraica, M.M., Obradovic, B.M., Dojcinovic, B.P., 2018. Degradation of nicotine in water solutions using a water falling film DBD plasma reactor: direct and indirect treatment. *J. Phys. D Appl. Phys.* 51 <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aab632>.
- Li, P., Wu, C., Yang, Y., Wang, Y., Yu, S., Xia, S., & Chu, W. (2018). Effects of microbubble ozonation on the formation of disinfection by-products in bromide-containing water from Tai Lake. *Separation and Purification Technology*, 193, 408–414. doi:10.1016/j.seppur.2017.11.049
- Liu, C., Chen, X.-X., Zhang, J., Zhou, H.-Z., Zhang, L., & Guo, Y.-K. (2018). Advanced treatment of bio-treated coal chemical wastewater by a novel combination of microbubble catalytic ozonation and biological process. *Separation and Purification Technology*, 197, 295–301. doi:10.1016/j.seppur.2018.01.005
- Ma, S., Kim, K., Huh, J., Kim, D. E., Lee, S., & Hong, Y. (2018). Regeneration and purification of water-soluble cutting fluid through ozone treatment using an air dielectric barrier discharge. *Separation and Purification Technology*, 199, 289–297. doi:10.1016/j.seppur.2018.02.005

Majid, A., Nugroho, F., Juwana, W., Budhijanto, W., Deendarlianto, I. (2018). On the performance of venturi-porous pipe microbubble generator with inlet angle of 20 and outlet angle of 12 . <https://doi.org/10.1063/1.5050000>

Miklos, D. B., Remy, C., Jekel, M., Linden, K. G., Drewes, J. E., & Hübner, U. (2018). Evaluation of advanced oxidation processes for water and wastewater treatment – A critical review. *Water Research*, 139, 118–131. doi:10.1016/j.watres.2018.03.042

Minamoto, C., Fujiwara, N., Shigekawa, Y., Tada, K., Yano, J., Yokoyama, T., ... Nakayama, S. (2021). Effect of acidic conditions on decomposition of methylene blue in aqueous solution by air microbubbles. *Chemosphere*, 263, 128141. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.1

Nam, G., Mohamed, M., & Jung, J. (2021). Enhanced degradation of benzo[a]pyrene and toxicity reduction by microbubble ozonation. *Environmental Technology*. 42 (12):1853-1860. <https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1683077>

Nian, P., Peng, L., Feng, J., Han, X., Cui, B., Lu, S., Zhang, J., Liu, Q., Zhang, A., 2019. Aqueous methylparaben degradation by dielectric barrier discharge induced non-thermal plasma combined with ZnO-rGO nanosheets. *Separ. Purif. Technol.* 211, 832e842. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.10.048>.

Nishiyama, T., Matsuura, K., Sato, E., Kometani, N., & Horibe, H. (2017). Degradation of Hydrophilic Polymers in Aqueous Solution by Using Ozone Microbubble. *Journal of Photopolymer Science and Technology*, 30(3), 285–289. doi:10.2494/photopolymer.30.285

Pandhal, J., Siswanto, A., Kuvshinov, D., Zimmerman, W. B., Lawton, L., & Edwards, C. (2018). Cell Lysis and Detoxification of Cyanotoxins Using a Novel Combination of Microbubble Generation and Plasma Microreactor Technology for Ozonation. *Frontiers in Microbiology*, 9. doi:10.3389/fmicb.2018.00678

Quan, Xuejun, D. Luo, J. Wu, R. Li, W. Cheng, and S. Ge. 2017. "Ozonation of Acid Red 18 Wastewater Using O₃/Ca(OH)₂ System in a Micro Bubble Gas-Liquid Reactor." *Journal of Environmental Chemical Engineering* 5 (1):283–91. doi: 10.1016/j.jece.2016.12.007

Ren, J., Jiang, N., Li, J., Shang, K., Lu, N., Wu, Y., (2018). Synergistic degradation of transferulic acid in aqueous solution by dielectric barrier discharge plasma combined with ozone. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25, 35479e35491. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3276-4>.

Ren, J., Jiang, N., Shang, K., Lu, N., Li, J., Wu, Y., (2019). Synergistic degradation of transferulic acid by water falling film DBD plasma coupled with cobalt oxyhydroxide: performance and mechanisms. *Chem. Eng. J.* 321e331. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.147>.

Ryskie, S., Gonzalez-Merchan, C., Neculita, C. M., & Genty, T. (2020). Efficiency of ozone microbubbles for ammonia removal from mine effluents. *Minerals Engineering*, 145, 106071. doi:10.1016/j.mineng.2019.106071

Shangguan, Y., Yu, S., Gong, C., Wang, Y., Yang, W., & Hou, L. (2018). A Review of Microbubble and its Applications in Ozonation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 128, 012149. doi:10.1088/1755-1315/128/1/012149

Shen, Y.J.; Xu, Q.H.; Wei, R.R.; Ma, J.L.; Wang, Y. Mechanism and dynamic study of reactive red X-3B dye degradation by ultrasonic-assisted ozone oxidation process. *Ultrason. Sonochem.* 2017, 38, 681–692. [CrossRef] [PubMed]

Sun, L., Mo, Z., Zhao, L., Liu, H., Guo, X., Ju, X., & Bao, J. (2017). Characteristics and mechanism of bubble breakup in a bubble generator developed for a small TMSR. *Annals of Nuclear Energy*, 109, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.05.015>

Sun, Z., Chen, X., Yang, K., Zhu, N., & Lou, Z. (2020). The progressive steps for TPH stripping and the decomposition of oil refinery sludge using microbubble ozonation. *The Science of the Total Environment*, 712, 135631. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135631>

Wang, B.; Xiong, X.G.Y.; Shui, Y.Y.; Huang, Z.Y.; Tian, K. A systematic study of enhanced ozone mass transfer for ultrasonic-assisted PTFE hollow fiber membrane aeration process. *Chem. Eng. J.* (2019), 357, 678–688. [CrossRef]

Wang, J., & Chen, H. (2019b). Catalytic ozonation for water and wastewater treatment: Recent advances and perspective. *Science of The Total Environment*, 135249. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.135249

Wright Alexander; Bandulasena Hemaka; Ibenegbu Christopher, Leak David; Holmes Thomas, Zimmerman William; Shaw Alex; Iza Felipe. 2018. Dielectric Barrier Discharge Plasma Microbubble Reactor for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass. *AIChE Journal* published by Wiley Periodicals, Inc. on behalf of American Institute of Chemical Engineers. Vol. 64, No. 11

Wu, C., Li, P., Xia, S., Wang, S., Wang, Y., Hu, J., ... Yu, S. (2019). The role of interface in microbubble ozonation of aromatic compounds. *Chemosphere*, 220, 1067–1074. doi:10.1016/j.chemosphere.2018.12.174

Xiong, X., Wang, B., Zhu, W., Tian, K., & Zhang, H. (2018). A Review on Ultrasonic Catalytic Microbubbles Ozonation Processes: Properties, Hydroxyl Radicals Generation Pathway and Potential in Application. *Catalysts*, 9(1), 10. doi:10.3390/catal9010010

Xu, X., Ge, X., Qian, Y., Zhang, B., Wang, H., & Yang, Q. (2018). Effect of nozzle diameter on bubble generation with gas self-suction through swirling flow. *Chemical Engineering Research and Design*, 138, 13–20. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.04.027>

Yang, T., Peng, J., Zheng, Y., He, X., Hou, Y., Wu, L., & Fu, X. (2018). Enhanced photocatalytic ozonation degradation of organic pollutants by ZnO modified TiO₂ nanocomposites. *Applied Catalysis B: Environmental*, 221, 223–234. doi:10.1016/j.apcatb.2017.09.025

Yasui, F., Sekiguchi, K., & Tamura, H. (2019). Decomposition of 2-Propanol in the Liquid Phase Using a Photocatalyst Immobilized on Nonwoven Fabric and Ozone Microbubbles. *Water, Air, & Soil Pollution*, 230(11). doi:10.1007/s11270-019-4292-9

Yu, L., Li, Y., Yu, H., Zhang, K., Wang, X., Chen, X., ... Wang, S. (2018). A fluorescence probe for highly selective and sensitive detection of gaseous ozone based on excited-state intramolecular proton transfer mechanism. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 266, 717–723. doi:10.1016/j.snb.2018.03.175

Zhang, J., Huang, G., Liu, C., Zhang, R., Chen, X., & Zhang, L. (2018). Synergistic effect of microbubbles and activated carbon on the ozonation treatment of synthetic dyeing wastewater. *Separation and Purification Technology*, 201, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.02.003>

Zhang, Siyu, C Wu, Y Zhou, Y Wang, and X. He. 2018b. "Effect of Wastewater Particles on Catalytic Ozonation in the Advanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent." *Chemical Engineering Journal* 345:280-89.

Zhang, M., Cai, Z., Xie, L., Zhang, Y., Tang, L., Zhou, Q., ... Pan, X. (2019). Comparison of coagulative colloidal microbubbles with monomeric and polymeric inorganic coagulants for tertiary treatment of distillery wastewater. *Science of The Total Environment*, 694, 133649. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.133649

Zheng, K., Sun, Y., Gong, S., Jiang, G., Zheng, X., Yu, Z., 2019. Degradation of sulfamethoxazole in aqueous solution by dielectric barrier discharge plasma combined with Bi₂WO₆-rMoS₂ nanocomposite: mechanism and degradation pathway. *Chemosphere* 222, 872e883. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.004>

Zheng, T., Wang, Q., Zhang, T., Shi, Z., Tian, Y., Shi, S., ... Wang, J. (2015). Microbubble enhanced ozonation process for advanced treatment of wastewater produced in acrylic fiber manufacturing industry. *Journal of Hazardous Materials*, 287, 412–420. doi:10.1016/j.jhazmat.2015.01.069

Zimmerman, W. B., & Kokoo, R. (2018). Esterification for biodiesel production with a phantom catalyst: Bubble mediated reactive distillation. *Applied Energy*, 221, 28–40. doi:10.1016/j.apenergy.2018.03.147

ANEXO 1:

Matriz de categorización

Objetivos Específicos	Problemas Específicos	Categorías	Unidad de Análisis
<p>Evaluar los métodos de generación de microburbujas y flujos de caudal usados en la fase gas y líquido</p>	<p>¿Cuáles son los métodos de generación de microburbujas y flujos de caudal usados en la fase gas y líquido?</p>	<p>Métodos de Generación de burbujas</p>	<p>Juawana et al. (2018), Juwana et al. (2019), Hu y Xia (2018), Xu et al. (2018), Zhang et al. (2018), Majid et al. (2018), Deendarlianto et al. (2017), Sun et al. (2017), Cheng et al. (2019), Gao et al. (2019), Huang et al. (2020), Nam et al. (2021), Wu et al. (2019), Azuma et al. (2019), Liu et al. (2018), Sun et al. (2020), Hanotu et al (2017)</p>
<p>Analizar las condiciones operativas y remoción logrados en procesos de combinación hibrida ozono/ultrasónico y microburbujas</p>	<p>¿Cuáles son las condiciones operativas y remoción logrados en procesos de combinación hibrida ozono/ultrasónico y microburbujas?</p>	<p>Ozono/ultrasonido/microburbujas</p>	<p>Wang, et al. (2019), Shen, et al. (2017), Jawale y Gogate (2018), Wang, et al. (2019), Dietrich et al (2017)</p>
<p>Analizar las condiciones operativas y remoción logrados en procesos de combinación hibrida ozono/DBD y microburbujas</p>	<p>¿Cuáles son las condiciones operativas y remoción logrados en procesos de combinación hibrida ozono/DBD y microburbujas?</p>	<p>Ozono/DBD/microburbujas</p>	<p>Ren et al. (2019), Nian. Et al. (2019), Zheng et al. (2019), Ren et al. (2018), Krupez et al. (2018), J. Wang et al. (2017), G. Zhang et al. (2017), Ma et al. (2018)</p>



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO


**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

Declaratoria de Originalidad del Autor / Autores

Nosotros, Garcia Jara Segundo Jhon y Meza Ayala Yanitza Rosana estudiantes de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA y Escuela Profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO, declaramos bajo juramento que todos los datos e información que acompañan al Trabajo de Investigación / Tesis titulado: "Aplicación de Microburbujas/Ozonización/Ultrasonido y Plasma en el Tratamiento de Aguas Residuales: Revisión Sistemática 2021.", es de nuestra autoría, por lo tanto, declaramos que nuestra Tesis:

1. No ha sido plagiado ni total, ni parcialmente.
2. Hemos mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda citatextual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicado ni presentado anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumimos la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

Apellidos y Nombres del Autor	Firma
Garcia Jara Segundo Jhon DNI: 47794709 ORCID: 0000 - 0003 - 2348 - 037X	
Meza Ayala Yanitza Rosana DNI: 70263993 ORCID: 0000 - 0002 - 9041 - 3575	