

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE SÓLIDOS Y GRASAS DE AGUAS RESIDUALES
DEL PROCESAMIENTO DE AVES, USANDO UN PROTOTIPO DE INYECCIÓN DE
MICROBURBUJAS POR CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA.**



GUSTAVO ADOLFO LEGARDA BERMÚDEZ

Trabajo de grado de Maestría en Automática.

Director:

Ph.D Carlos Alberto Gaviria López.

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN AUTOMÁTICA INDUSTRIAL
MAESTRÍA EN AUTOMÁTICA
POPAYÁN, NOVIEMBRE DE 2022

GUSTAVO ADOLFO LEGARDA BERMÚDEZ.

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE SÓLIDOS Y GRASAS DE AGUAS RESIDUALES
DEL PROCESAMIENTO DE AVES, USANDO UN PROTOTIPO DE INYECCIÓN DE
MICROBURBUJAS POR CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA.**

Trabajo de grado presentado a la Facultad de Ingeniería
Electrónica y Telecomunicaciones de la
Universidad del Cauca para la obtención del
Título de
Magíster en Automática

Director:

Ph.D Carlos Alberto Gaviria López.

Popayán, noviembre de 2022.

Aceptación

NOTA DE ACEPTACIÓN

Jurado

Jurado

Dedicatoria

Esta tesis está dedicada a toda mi familia, especialmente a mi esposa y mi hija por todo su apoyo, paciencia y amor incondicional. Nunca han dejado de creer en mí.

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a Dios por darme salud, paciencia y fortaleza para realizar este trabajo de tesis en medio de la pandemia por COVID-19. Me gustaría agradecer a mi director de trabajo de grado Ph.D Carlos Alberto Gaviria López, por su acompañamiento, supervisión y comentarios permanentes. A la Universidad del Cauca, por el apoyo técnico y con materiales para el desarrollo de esta investigación. También agradezco al Ministerio de Ciencia y Tecnología e Innovación – Minciencias por el apoyo financiero para el desarrollo de mis estudios de maestría en marco de la convocatoria 823-2018. Finalmente, mi gratitud es para mí familia por estar conmigo todo el tiempo apoyándome de forma incondicional.

Tabla de Contenido

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	12
1.1 Contexto y planteamiento del problema.	12
1.2 Objetivos	14
1.3 Relevancia del estudio y aporte principal.	14
1.4 Limitaciones del estudio.....	15
1.5 Organización de la monografía	15
CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LA LITERATURA	16
2.1 Marco conceptual	16
2.1.1 Propiedades fundamentales de las microburbujas.....	18
2.1.2 Importancia del tamaño de las burbujas	19
2.1.3 Sistemas generación de microburbujas	20
2.1.4 Sistemas de flotación por aire inducido o disperso	24
2.1.5 Sistemas Venturi.....	25
2.1.6 Cavitación Hidrodinámica	26
2.1.7 Medición de microburbujas	27
2.1.8 Características de las aguas residuales de la industria avícola	28
2.1.9 Regulación ambiental.....	30
2.2 Brecha de investigación y proposición que da origen a la investigación	30
2.2.1 Dificultades asociadas al tratamiento de aguas residuales con sistemas de flotación, reportados en el sector avícola.....	31
2.2.2 Optimización de eficiencia en sistemas DAF mediante ajuste de parámetros operativos.....	32
2.2.3 Optimización de sistemas DAF mediante modificaciones de condiciones de diseño y operación.....	33
2.2.4 Importancia del tamaño de la microburbuja generada:	36
2.2.5 Desarrollos tecnológicos recientes en sistemas de generación de microburbujas basados en cavitación hidrodinámica.	38
2.2.6 Brecha de investigación	38
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	40
3.1 Caracterización del inyector de microburbujas.	42
3.1.1 Medición del tamaño de microburbuja generado.	42
3.2 Diseño de celda de flotación	46

3.3	Simulación con modelación numérica computacional CFD.	48
3.3.1	Análisis del patrón de flujo de agua.	50
3.3.2	Análisis del patrón de flujo dinámico de aire.	50
3.3.3	Análisis de fracción volumétrica de aire	51
3.4	Estudio experimental	52
3.4.1	Cuadrado latino y análisis de datos.	52
3.5	Flujo de aire aplicado al inyector.	53
3.6	Tratamiento de coagulación-floculación empleado.	54
3.7	Solución sintética de agua residual.	54
3.8	Recolección y análisis de muestras	55
CAPÍTULO 4: PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS Y DISCUSIÓN		56
4.1	Resultados obtenidos asociados al tamaño de las microburbujas generadas por el inyector	56
4.2	Resultados obtenidos en pruebas con soluciones sintéticas.	57
4.3	Impacto potencial de los resultados	63
CAPÍTULO 5: CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES		65
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.		67
ANEXOS		79
7.1	Código de MATLAB® para medir el diámetro de las burbujas.	79
7.2	DETALLE DEL PROCESO REALIZADO PARA EL DISEÑO DE LA CELDA DE FLOTACIÓN EMPLEANDO DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.	86
7.2.1	Diseños y pruebas iniciales:.....	88

Lista de figuras

Figura 1, Velocidades de ascenso de la burbuja en función del tamaño de la burbuja para 5°C y 20°C, fuente:[35].	18
Figura 2, Diferentes sistemas de generación de microburbujas, fuente: Huang et al. 2020 [46].	21
Figura 3, Modo de operación de los sistemas DAF, (a) flujo completo, (b) flujo dividido, (c) flujo reciclado. Fuente: Palaniandy et al. [58].	23
Figura 4, Sistema DAF con tanque de flotación rectangular con flujo de reciclaje. Fuente: Palaniandy et al. [58].	24
Figura 5, (A) flotación por aire inducido, (B) flotación por espuma empleado impulsor o turbina. Fuente: Palaniandy et al. [58].	25
Figura 6, Esquema de un generador de burbujas tipo Venturi, así como sus parámetros geométricos. Fuente: Sun et al. [61]	25
Figura 7, Flujo vs variación de presión durante la cavitación hidrodinámica. Gogate y Pandit [63].	26
Figura 8, Secuencia metodología desarrollada en el proyecto de investigación.	41
Figura 9, Representación esquemática del inyector de microburbujas CARMIN D2 Single Assembly.	42
Figura 10, Esquema del montaje experimental para identificar las condiciones operativas del inyector de microburbujas.	43
Figura 11, Representación esquemática del proceso de imágenes para medición del tamaño de microburbuja.	44
Figura 12, fotografías del montaje experimental del proceso de adquisición de imágenes.	44
Figura 13, Resultado del procesamiento digital de imágenes para medir el tamaño de las burbujas. (A) Imagen original, (B) Imagen con la microburbuja identificada y medida.	45
Figura 14, portaobjetos de calibración de micrómetros para microscopio marca Lakelab. Se empleo el punto de referencia de 0.07mm y 0.15mm.	45
Figura 15, Imágenes del punto de referencia de 70 µm para calibración del tamaño de píxel.	46
Figura 16, Validación de la calibración con fotografía de punto de referencia de 150 µm.	46
Figura 17, plano detallado de la celda de flotación (unidad de medida mm).	48
Figura 18, Diseño de la celda de flotación en 2D y 3D.	49
Figura 19, Perfiles de velocidad de la fase líquida.	50
Figura 20, perfiles de velocidad de las microburbujas de aire obtenidas en simulación 3D.	51
Figura 21, (a) fracción volumétrica de aire obtenida en simulación (b) fotografía obtenida en el tanque durante una de las pruebas de funcionamiento.	52
Figura 22, Diagrama de cajas del tamaño de burbuja acorde a los cambios del flujo de aire aplicado al inyector.	56
Figura 23, Fotografías obtenidas durante las pruebas del sistema empleando soluciones sintéticas.	57
Figura 24, Gráfico de efectos principales que presenta la relación estadística entre los factores iniciales (TSS inicial, PAC y tamaño de microburbuja) con el valor medio de los porcentajes de eliminación de TSS.	60
Figura 25, Gráfico de efectos principales que presenta la relación estadística entre los factores iniciales (O&G inicial, PAC y tamaño de microburbuja) con el valor medio de los porcentajes de eliminación de O&G.	60
Figura 26, Porcentaje de remoción de TSS, empleando una dosis fija de 24mg/l de PAC.	62

Figura 27, Diagrama de flujo del proceso de los sistemas de flotación: (A) Sistema DAF convencional, (B) Prototipo de sistema DAF modificado con un inyector de microburbujas Carmin.	64
Figura 28, Imágenes del punto de referencia de 70 μm para calibración del tamaño de píxel..	83
Figura 29, Validación de la calibración con fotografía de punto de referencia de 150 μm	83
Figura 30, Ejemplos de fotografías de microburbujas procesadas.	84
Figura 31, Ejemplos de fotografías de microburbujas procesadas.	85
Figura 32, Diseño de la celda de flotación propuesta por Rocha e Silva et al [84] y Rodrigues et al [85].	87
Figura 33, Diseños de celdas de flotación desarrollados.	88
Figura 34, Resultados obtenidos con el diseño de prueba inicial en 2D usando Ansys Fluent...	88
Figura 35, Resultados obtenidos con el diseño de prueba No 2 en 2D usando Ansys Fluent. ...	89
Figura 36, Resultados obtenidos con el modelo en 2D de la celda de flotación propuesta.	89
Figura 37, Resultados obtenidos con el modelo en 3D de la celda de flotación propuesta.	90
Figura 38, Diagrama de construcción con detalle de dimensiones.....	91

Lista de tablas

Tabla 1, Métodos comunes empleados para remoción de sólidos suspendidos y aceites y grasas, fuente:[30].	17
Tabla 2, Resumen de la literatura sobre. importancia de tamaño de microburbujas en sistemas de flotación.	20
Tabla 3, Técnicas de generación de burbujas.	21
Tabla 4, Resumen de los métodos de caracterización del tamaño de la burbuja.	27
Tabla 5, Parámetros reportados para diferentes fuentes de agua residual de las plantas de procesamiento de aves.	29
Tabla 6, Límites permisibles de vertimientos de aguas residuales de plantas de procesamiento de aves de corral, Resolución 631 de 2015, Minambiente.	30
Tabla 7, Resumen de la literatura sobre estrategias de optimización de parámetros operativos DAF.	32
Tabla 2, Resumen de la literatura sobre estrategias de optimización de componentes en DAF.	35
Tabla 3, Resumen de la literatura sobre. importancia de tamaño de microburbujas en sistemas de flotación.	37
Tabla 7, Parámetros operativos de la celda de flotación obtenidos con la caracterización del inyector.	43
Tabla 8, Parámetros de diseño de la celda de flotación: Celda cuadrada acorde a diseños de sistemas DAF convencionales.	47
Tabla 9, Ecuaciones para el diseño de celda de flotación.	47
Tabla 10, Datos de operación y condiciones de frontera.	49
Tabla 11, Modelos y parámetros numéricos usados en la modelación numérica computacional.	49
Tabla 12, Descripción de los factores.	53
Tabla 13, Descripción de variables dependientes.	53
Tabla 14, Diseño del cuadrado latino.	53
Tabla 15, Composición química de las soluciones sintéticas.	55
Tabla 16, ANOVA - Modelo lineal general: % de remoción de TSS versus flujo de aire (ml/min), PAC (mg/l) y TSS inicial (mg/l).	58
Tabla 17, ANOVA - Modelo lineal general: % de eliminación de O&G versus flujo de aire (ml/min), PAC (mg/l) y O&G inicial (mg/l).	59
Tabla 18, Coeficientes de correlación de Pearson calculados para la remoción de TSS y O&G.	61
Tabla 19, Table 4. Información de las variables operativas del sistema.	86
Tabla 20, Parámetros de configuración establecidos en simulación.	87

Lista de abreviaturas y siglas

CFD	Dinámica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics)
DAF	Flotación por aire disuelto (Dissolved Air Flotation)
IAF	Flotación por aire inducido (Induced Air Flotation)
MB	Microburbujas (Microbubbles)
O&G	Aceites y grasas (Oil and Grease)
SS	Sólidos en suspensión (Suspended Solids)
TSS	Sólidos Suspendidos Totales (Total Suspended Solids)

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto y planteamiento del problema.

Las plantas de procesamiento de aves generan aguas residuales principalmente en el proceso de sacrificio industrial, en el lavado de equipos e instalaciones y en la producción de subproductos. Estas aguas residuales se caracterizan por contar con altas concentraciones de materia orgánica, nitrógeno y fósforo [1], lo que las hacen aptas para aplicaciones de tratamiento biológico [2]. Sin embargo, se necesita un separador eficiente antes del uso de un proceso biológico ya que dichas aguas residuales contienen altas concentraciones de sólidos en suspensión (SS), así como aceite y grasa (O&G), que pueden conducir a la inestabilidad del proceso. Para su tratamiento primario, el sistema de flotación de aire disuelto (DAF) es el sistema mayormente utilizado para separar partículas suspendidas y/o grasas del líquido [1], [3], [4]. En términos ideales, se espera que un sistema DAF remueva cerca del 80% de SS y 99% de O&G. Sin embargo, en la práctica se registran eliminaciones del orden del 38–70% SS y 63–95% de O&G [1], [5]–[7] y esta variación depende principalmente de las condiciones del diseño del sistema, parámetros de operación, y pretratamiento químico empleado. Alcanzar mayores niveles de eficiencia podría reducir el tamaño y el tiempo de retención de las grandes lagunas de tratamiento, lo que a su vez reduciría el tiempo total de tratamiento, aumentaría la producción y optimizaría los costos de tratamiento.

Para optimizar los niveles de eficiencia en el tratamiento de este tipo de agua residual se han realizado estudios detallados del funcionamiento y operación de sistemas DAF; así como de sistemas de generación de microburbujas alternativos como la flotación por aire inducido (IAF) y la cavitación hidrodinámica. Estas tecnologías son bien conocidas y practicadas comercialmente, tienen amplias aplicaciones en el tratamiento de aguas residuales y la separación de corrientes suspendidas [8], [9]. IAF es reconocida por la formación de burbujas relativamente grandes mediante agitación mecánica o inyección de aire por aspersión; a diferencia de la generación de microburbujas basada en cavitación hidrodinámica que genera microburbujas de tamaño reducido a partir de cambios en la geometría de la cavidad por donde fluye el fluido como sucede en un tubo Venturi, placa de orificio o tubos de cavitación [10].

En términos operativos, la cavitación hidrodinámica parece ser la técnica de generación de microburbujas, más económica y energéticamente eficiente, empleada tanto en la industria minera como en el tratamiento de aguas residuales, reconocida por su facilidad de escalamiento y controlabilidad respecto a un sistema DAF convencional. Las boquillas que emplean este principio permiten generar micro y nano burbujas de tamaño uniforme y controlado que pueden ser aplicadas en tratamiento de aguas residuales. El tamaño de las microburbujas generadas a través de un cavitador hidrodinámico puede ser controlado a partir de cambios en la velocidad y presión del agua inyectada, logrando altas eficiencias en tratamiento de aguas residuales en comparación con sistemas convencionales [11], [12]. Sin embargo, sistemas de flotación que generen microburbujas mediante esta técnica son considerados como algo nuevo en el ámbito industrial, y no se ha evaluado en el sector avícola hasta donde se conoce del estado del arte.

Para entender el contexto y antecedentes del estudio, es importante analizar la eficiencia de remoción en función de la capacidad del sistema para generar microburbujas de tamaño reducido. En [13] y [14] se afirma que la remoción de materia orgánica empleando un sistema

DAF puede ser superior al 98% si se logra controlar el tamaño de las microburbujas generadas. En la zona de contacto del tanque de flotación se generan colisiones y uniones entre flóculos y burbujas de aire, generando la posibilidad de rompimiento de flóculos si se generan burbujas de mayor tamaño [13], [15]–[17], cuanto más pequeñas son las burbujas se incrementa la eficiencia del sistema, las partículas finas o coloidales (micro y nano) son capturadas eficazmente por las burbujas finas y no por las grandes. La presencia de microburbujas y especialmente nano burbujas mejoran la separación de sólidos suspendidos y grasas por flotación [18]–[20].

En términos simples, en la operación de los sistemas DAF se presuriza aire y agua en un tanque de saturación con la finalidad de disolver el aire en el agua, posteriormente el agua saturada pasa a través de una válvula reductora de presión para generar microburbujas al liberar el agua saturada [21]. El diseño de estos sistemas depende de factores como el volumen de aguas residuales a tratar, el grado y la naturaleza de la contaminación, la extensión del tratamiento requerido y cualquier tratamiento posterior que se requiera para la concentración del producto recuperado [22]. Estos factores, a su vez, definen la presión del tanque de saturación, la temperatura, el caudal, el tiempo de retención, la relación de reciclaje, el pretratamiento coagulante y floculante, el diseño del tanque de flotación y la configuración del deflector adecuados para el tratamiento deseado, haciendo complejo el control de las condiciones operativas para lograr microburbujas de tamaño reducido.

Por otro lado, un inyector de microburbujas tipo cavitador, produce microburbujas, comparables a las obtenidas con el proceso convencional de flotación por aire disuelto (DAF). Sin embargo, este generador no requiere disolver gas en líquido previamente (no hay saturador de alta presión como es necesario en el proceso DAF). Para su funcionamiento requiere un flujo de agua a alta presión para producir una zona de cavitación hidrodinámica en la cual se inyecta aire que posteriormente se fracciona y disuelve en una nube de microburbujas dispersas. Una de las principales ventajas de este generador es la capacidad de control que ofrece sobre las microburbujas generadas. El tamaño de las burbujas generadas puede oscilar entre 10 μm a 200 μm (no restrictivo) pero que puede ser ajustado regulando el flujo de aire inyectado, y esta es su principal ventaja, ya que facilita el control del sistema.

En ese sentido, el objetivo de este estudio consistió en evaluar la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos (SS) y grasas (O&G) en aguas residuales de la industria de procesamiento de aves, usando un prototipo de unidad flotación de aire disuelto basado en un inyector de cavitación hidrodinámica, en función del flujo del aire aplicado al cavitador, ante cambios en las propiedades químicas del fluido tratado.

Considerando esta problemática, en este trabajo se presenta el diseño de un prototipo de unidad de flotación basado en un sistema DAF, empleando un inyector de microbubujas de cavitación hidrodinámica comercial en la cual se controle el caudal y presión de aire aplicado para variar el tamaño de microburbuja generado y evaluar las eficiencias de remoción de sólidos suspendidos y grasas, empleando una solución sintética de agua residual que presenta características fisicoquímicas similares a las generadas por una planta de procesamiento de aves buscando dar respuesta a la pregunta de investigación ¿cuál es la correlación estadística entre las variaciones del flujo de aire aplicado al inyector de microburbujas de cavitación hidrodinámica, y la eficiencia de remoción de sólidos (SS) y grasas O&G?

1.2 Objetivos

Objetivo general

Evaluar la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos (SS) y grasas (O&G) en aguas residuales de la industria de procesamiento de aves, usando un prototipo de unidad flotación de aire disuelto basado en un inyector de cavitación hidrodinámica, en función del flujo del aire aplicado al cavitador, ante cambios en las propiedades químicas del fluido tratado.

Objetivos específicos

1. Determinar propiedades fisicoquímicas comunes de los fluidos en las aguas residuales de las plantas de sacrificio de aves, con base a revisión bibliográfica.
2. Determinar experimentalmente, en un prototipo de unidad flotación, las condiciones de flujo de aire aplicadas al inyector que maximizan la remoción de sólidos suspendidos y grasas, utilizando una solución que emule características fisicoquímicas de las aguas residuales de plantas de sacrificio de aves.
3. Analizar estadísticamente la correlación entre el caudal de aire aplicado al inyector, con la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos y grasas, ante cambios en propiedades químicas del fluido.

1.3 Relevancia del estudio y aporte principal.

Este estudio es importante en la medida que se requiere más investigación en aplicaciones industriales de tratamiento de aguas residuales con sistemas de generación de micro y nano burbujas basados en boquillas o inyectores que aprovechan la cavitación hidrodinámica como estrategia de generación y que a su vez, de forma simple permitan controlar el tamaño de las burbujas generadas. Este tipo de tecnología podría potencialmente reemplazar los sistemas DAF convencionales, ya que la configuración del generador de microburbujas de este tipo es simple, es flexible y no requiere la construcción ni el mantenimiento de recipientes presurizados, representan un consumo energético menor en cuanto su operación y es altamente escalable.

El principal aporte de este trabajo ha sido demostrar la viabilidad de utilización de un cavitador hidrodinámico comercial de reciente fabricación que no ha sido previamente usado para este tipo de aplicaciones, como inyector en un DAF para separación de sólidos suspendidos totales (TSS) y O&G en aguas residuales de la industria avícola. Los resultados obtenidos en laboratorio empleando soluciones sintéticas son prometedores en la medida que los niveles de eficiencia media de remoción de TSS superan el 65 % en condiciones de alta concentración de partículas en suspensión (1560 mg/l) y el 80 % en condiciones de menor concentración de sólidos en suspensión (795 mg/l). En términos de eliminación de aceite y grasa (O&G), se obtuvo un 70 % de eliminación de O&G con una concentración inicial alta de O&G (400 mg/l) y una eficiencia de eliminación del 90 % con una concentración baja de O&G (100 mg/l). El diseño de la celda de flotación basado en un sistema de flotación por aire disuelto y la simplicidad del inyector empleado permite que en un futuro se pueda escalar el diseño para aplicaciones a nivel industrial.

1.4 Limitaciones del estudio

Es importante establecer que este estudio presenta los resultados obtenidos en un dispositivo a escala de laboratorio y que en lugar de procesar aguas residuales de la industria avícola se ha elaborado una solución sintética que es solo una aproximación fisicoquímica de ese tipo de aguas residuales, razón por la cual se necesitan futuros estudios para evaluar el desempeño del sistema propuesto en condiciones reales.

1.5 Organización de la monografía

La presente monografía está organizada en 6 capítulos. El segundo capítulo detalla la exploración de la bibliografía y las teorías pertinentes a cada uno de los conceptos clave sobre sistemas DAF, generación de microburbujas y características de las aguas residuales de las plantas de procesamiento de aves. El tercer capítulo presenta la metodología de investigación empleada, detallando el diseño del prototipo y diseño experimental propuesto. El capítulo cuarto presenta los resultados obtenidos con relación a la pregunta de investigación. El quinto capítulo, detalla la discusión de los resultados. Finalmente, el sexto capítulo expone las conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LA LITERATURA

Este capítulo tiene dos objetivos. El primero es presentar un marco conceptual donde se establecen los principales conceptos que tienen influencia en los métodos empleados para obtener los resultados de la investigación. El segundo objetivo es declarar, desde el estado del arte elaborado para el anteproyecto de esta investigación, cuál ha sido la brecha de investigación y la proposición que da origen a la investigación.

2.1 Marco conceptual

La eliminación de los sólidos suspendidos totales (TSS) y de los aceites y grasas (O&G) presentes en las aguas residuales de las plantas de procesamiento de aves tiene una importancia predominante, ya que estos dos factores no sólo contribuyen al deterioro de la calidad del agua, sino que también son actualmente los causantes de graves problemas medioambientales [17]. Los TSS hacen referencia a la concentración (mg/l) de materias inorgánicas y orgánicas retenidas como material particulado en la columna de agua [23]. Por otra parte, el aceite y la grasa (O&G) son una clase de contaminantes con muy baja afinidad por el agua. Su eliminación de las aguas residuales suele ser un desafío e implica la combinación de diferentes tecnologías de tratamiento. Además de su impacto ecológico, los residuos de O&G afecta la operación de las plantas de tratamiento de aguas residuales tradicionales, inhibiendo la actividad biológica en los reactores de lodos activados y causando obstrucciones y ensuciamiento de bombas y tuberías [24].

Muchos procesos industriales requieren combinación de diferentes tecnologías o métodos de tratamiento de agua para lograr la calidad de efluente deseada, la Tabla 1 presenta varias de estas tecnologías indicando su principio de funcionamiento, ventajas y desventajas. De estos métodos, es de interés principal para este proyecto los sistemas de tratamiento de agua mediante flotación de microburbujas de aire, comúnmente empleados en la industria para el tratamiento de aguas residuales para eliminar principalmente TSS y O&G.

En los sistemas de flotación se pueden generar microburbujas a través de varios métodos, como lo son: cavitación acústica, oscilación microfluídica, membranas porosas y cavitación hidrodinámica [25]. Sin embargo, los sistemas de flotación por aire disuelto (DAF) son los más empleados. Los tamaños de burbuja típicos producidos por este sistema son del orden de 100 μm [26], y se considera que estos sistemas pueden eliminar más del 90 % del aceite y los sólidos en suspensión (SS) de las aguas residuales de las plantas de procesamiento de aves con la adición de coagulantes [1], [27], [28]. Estudios recientes tienen tendencia hacia el uso de microburbujas de tamaños reducido del orden de 10 μm para el tratamiento de aguas residuales [29]. Esto se debe al hecho de que las microburbujas brindan un área de superficie de contacto más grande y tienen un tiempo de residencia más prolongado, lo que mejora la eficiencia de la separación de aceite y SS en el tratamiento de aguas residuales [25]. En ese sentido es necesario comprender las propiedades fundamentales de las microburbujas y su generación de forma controlada.

Tabla 1, Métodos comunes empleados para remoción de sólidos suspendidos y aceites y grasas, fuente:[30].

No	Tecnología	Principio de funcionamiento	Ventajas	Desventajas
1	Decantación por gravedad (recipientes Skim, tanques API)	Basado en la gravedad específica de los fluidos inmiscibles.	Adecuado para la eliminación de grandes sólidos en suspensión y aceite libre.	Las gotas pequeñas y la emulsión agua-aceite estable requieren un tiempo de sedimentación excesivo.
		Tanques API adecuados para la eliminación de gotas de aceite >150 µm [31] con posible concentración de efluentes en el rango de 50 a 100 mg L ⁻¹ [32].	Equipos sencillos con mínimos costes de operación y mantenimiento.	No apto para la eliminación de aceite disuelto.
		Tecnología empleada principalmente en la industria de hidrocarburos	Se puede utilizar eficazmente como primer paso de tratamiento para eliminar aceites y grasas.	
2	Tratamiento químico	Adición de coagulantes y floculantes para des emulsionar, coalescer y agregar partículas de aceite para formar gotas más grandes.	Las gotas/flóculos de aceite más grandes son mucho más fáciles de eliminar.	Los coagulantes inorgánicos convencionales (sales de aluminio y hierro) podrían plantear problemas adicionales debido a la presencia de contenido metálico en los efluentes [33].
			Contribuye a la eliminación de carbono sólido y orgánico.	Se produce un gran volumen de lodo [33]. <i>Contribuye significativamente al costo de operación (Coagulación química y costo de bombeo).</i>
3	Flotación por aire	Un mecanismo de flotación donde la densidad total de aceite/partículas sólidas se reduce significativamente al agregarlas con burbujas de gas. Estos agregados se elevarán rápidamente y eventualmente se desprenderán.	Partículas más ligeras y pequeñas que son difíciles de asentar y se pueden eliminar fácilmente mediante flotación con gas.	Difícil de eliminar el aceite disuelto y, por lo general, requiere un pretratamiento químico para eliminar el aceite emulsionado.
			Los sistemas de flotación de gas son compactos y ocupan poco espacio en comparación con los tanques de sedimentación por gravedad.	No es rentable producir grandes volúmenes de microburbujas que son más pequeñas que las gotas de aceite.
			Mejor manejo de sólidos y buen espesamiento por flotación.	
4	Tratamiento biológico	El tratamiento biológico (lodo activado) junto con la separación por membrana (MBR) se puede usar de manera efectiva para descomponer y eliminar compuestos orgánicos y sustancias oleosas en las aguas residuales.	MBR tiene efluentes de alta calidad con baja producción de lodos	El agua contaminada con aceite hipersalino (p. ej., agua producida en yacimientos petrolíferos) podría afectar el metabolismo de los microorganismos y conducir a la deshidratación celular (plasmólisis) [34].
			MBR es un sistema compacto con alta tasa de carga y menor costo de energía [34].	Los sistemas biológicos son sensibles a la carga de afluentes, donde los cambios abruptos en la carga podrían afectar seriamente el equilibrio biológico en el reactor.
5	Separación de membrana	Las membranas impulsadas por presión (microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa) desempeñan un papel importante en la eliminación de aceite y grasa de las aguas residuales.	La variación en la calidad del agua de alimentación tendrá un impacto mínimo en la calidad del permeado.	Las membranas están sujetas a ensuciamiento por aceite/grasa y contenido biológico en el afluente.
		La microfiltración se puede usar de manera efectiva para eliminar sólidos en suspensión y partículas finas, mientras que la ultrafiltración se puede usar para eliminar coloides y aceite emulsionado.	Diseño modular que facilita su manejo.	

2.1.1 Propiedades fundamentales de las microburbujas

Las microburbujas son pequeñas burbujas esféricas compuestas de gas o aire, que permanecen distintas entre sí y tienen un rango de tamaño micrométrico, generalmente de 1 a 100 μm [25]. Presentan varias características que las hacen atractivas en diferentes tecnologías de tratamiento de aguas residuales. Algunas de las propiedades únicas e importantes de microburbujas se discuten a continuación.

2.1.1.1 Velocidad de ascenso

La ecuación (1) se conoce como ecuación de Stokes y se usa para calcular las velocidades de ascenso (v_b) de las burbujas libres, es decir, no adheridas a los flóculos. La velocidad de ascenso de la burbuja depende en gran medida del diámetro de la burbuja, d_b , la diferencia de densidad o fuerza impulsora entre el agua y el aire ($\rho_w - \rho_b$) y la viscosidad del agua, μ_w . La Figura 1 muestra las velocidades de ascenso de las burbujas en función del diámetro de las burbujas para condiciones de agua fría (5°C) y tibia (20°C). Las burbujas más grandes tienen mayores tasas de ascenso que las más pequeñas, y las burbujas se elevan más rápido en aguas más cálidas [35]. Las propiedades físicas del líquido afectan la velocidad de ascenso de las burbujas [36].

$$v_b = \frac{g(\rho_w - \rho_b)d_b^2}{18\mu_w} \quad (1)$$

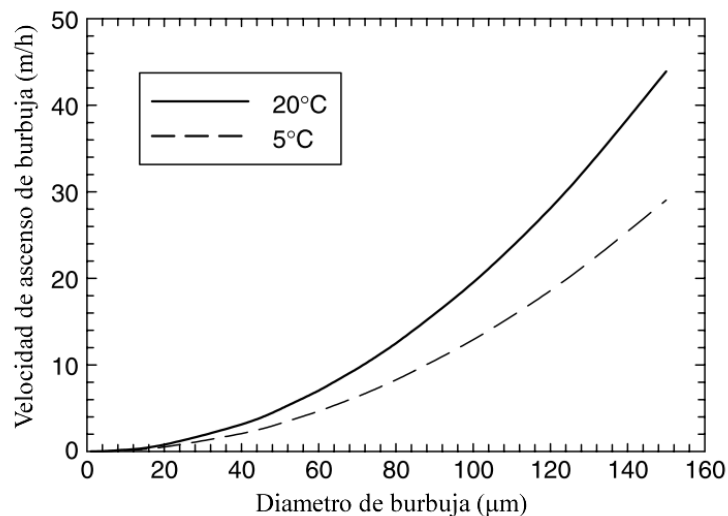


Figura 1, Velocidades de ascenso de la burbuja en función del tamaño de la burbuja para 5°C y 20°C, fuente:[35].

Las burbujas tienen forma esférica y los números de Reynolds son inferiores a 1, lo que indica un flujo laminar para las líneas de flujo alrededor de la burbuja ascendente [37].

2.1.1.2 Potencial Zeta

El potencial zeta es un potencial eléctrico de burbuja utilizado para medir la magnitud de la repulsión o atracción electrostática entre partículas y burbujas [38]. Predice la estabilidad de las partículas en suspensión. Ayuda a predecir la estabilidad de suspensiones y emulsiones. Las

partículas en suspensión que tienen un potencial negativo grande tienden a repelerse entre sí, pero si las partículas tienen un potencial zeta bajo, entonces no habrá fuerzas para evitar que la partícula se acerque y flocularán [10]. El potencial zeta se determina mediante la ecuación (2) conocida como ecuación de Smoluchowski.

$$\zeta = \frac{\mu m'}{\epsilon} \quad (2)$$

donde ζ es la potencial zeta (V), m' es la movilidad ($\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{V}^{-1}$) y ϵ es la permitividad del líquido ($\text{kg}^{-1} \text{m}^{-3} \text{s}^2 \text{C}^2$). Takahashi [39] encontró que el potencial zeta de microburbujas en agua destilada es aproximadamente -35 mV. Informó que no existe una relación entre el potencial zeta y el tamaño de la burbuja. También identificó que la adición de electrolito provoca una reducción en el potencial zeta y que el valor negativo del potencial zeta aumentó al aumentar el pH de la solución [10].

Aunque todas las propiedades anteriores de las microburbujas son muy importantes, solo el tamaño y sus funciones correspondientes en la remoción de TSS y O&G son la principal preocupación de esta investigación.

2.1.2 Importancia del tamaño de las burbujas

La eficiencia de flotación está estrechamente ligada a los fenómenos de adherencia de partículas y burbujas. Por lo tanto, el tamaño de la burbuja es un factor vital para el proceso de flotación [40]. El tamaño de burbuja reducido da como resultado una mejor eficiencia del proceso debido a una mayor transferencia de masa a través de la interfaz gas-líquido [21]. La flotación con burbujas finas es considerada como un proceso eficiente en la recuperación de sólidos suspendidos ($<13 \mu\text{m}$ de diámetro) y en el tratamiento de agua / aguas residuales. Cuanto más pequeñas son las burbujas, mejor es el rendimiento de la flotación porque las partículas finas o coloidales (micro y nano) son capturadas eficazmente por las burbujas finas y no por las grandes. Recientemente, estudios revelaron que la presencia de microburbujas y especialmente nano burbujas mejoran la separación por flotación [18]–[20]. En términos de remoción de O&G la literatura reporta preferencia de las burbujas pequeñas debido a sus grandes áreas superficiales que son útiles para la agregación de gotitas de aceite o grasa. Por otro lado, las burbujas grandes tienden a elevarse rápidamente, lo que resulta en una menor eficiencia de colisión [30]. Las gotas de aceite de más de $20 \mu\text{m}$ [41] son adecuadas para fines de flotación. Es posible que las gotas de aceite pequeñas ($<10 \mu\text{m}$) no se eleven debido al movimiento browniano [42]. Se ha informado que el uso de la burbuja más pequeña posible para levantar la gota más grande posible conducirá a una eficiencia de flotación óptima [30]. En la Tabla 2, se presenta un resumen de las contribuciones identificadas en diversos estudios sobre la importancia del control del tamaño de la microburbuja generada.

Tabla 2, Resumen de la literatura sobre. importancia de tamaño de microburbujas en sistemas de flotación.

Referencia	INDUSTRIA	AREA APLICACIÓN	DE	CONTRIBUCIÓN RESUMIDA
[18]	Industria Minera	Generación y aplicaciones de nano burbujas	y de	la inyección de nano burbujas (200–720 nm) junto con burbujas gruesas convencionales (400–800 µm) mejoró las recuperaciones por flotación de partículas finas y ultrafinas de cuarzo. mejorando la recuperación del cuarzo muy fino en un 20-30%. Respecto al tratamiento exclusivo con burbujas convencionales.
[43]	Industria procesamiento de alimentos	Optimización boquilla DAF		DAF junto con una boquilla de hendidura de burbujeo de tamaño micro / nano seleccionable (1–100 µm) se diseñó para eliminar de manera eficiente los aceites de tamaño micro (<20 µm) que pueden no ser eliminados por las macro burbujas. Este sistema eliminó los sólidos en suspensión que contienen contaminantes de aceite, lo que corresponde a un 95% de eliminación de DQO y un 95% de recuperación.
[44]	Industria Minera	Regulación de tamaño de microburbujas	de	Las burbujas generadas evolucionan continuamente (es decir, se deforman, rompen y se fusionan) para formar burbujas de un tamaño estable en la celda de flotación. y el tamaño de la burbuja depende del equilibrio de la ruptura y la coalescencia.
[45]	Tratamiento de agua	Aplicación de nano burbujas		Los agregados formados por los NB adheridos obtuvieron una muy alta eficiencia de formación (X) debido a su muy alta eficiencia de unión, pero muy baja eficiencia de separación (Y) debido a su muy lenta velocidad de ascenso. Los resultados proponen que las burbujas híbridas son mejores que las nano burbujas puras para separar partículas finas en el agua.
[18]	Industria Minera	Generación y aplicaciones de nano burbujas	y de	la inyección de nano burbujas (200–720 nm) junto con burbujas gruesas convencionales (400–800 µm) mejoró las recuperaciones por flotación de partículas finas y ultrafinas de cuarzo. mejorando la recuperación del cuarzo muy fino en un 20-30%. Respecto al tratamiento exclusivo con burbujas convencionales.

2.1.3 Sistemas generación de microburbujas

Se espera que la tecnología de generación de microburbujas para el tratamiento de aguas residuales sea rentable en términos económicos, respetuosa con el medio ambiente, con capacidad de generación burbujas de menor tamaño, mayor densidad numérica y tamaño controlable según los fines de las aplicaciones prácticas [46]. En términos generales, las cuatro formas reconocidas para generar burbujas son los métodos hidrodinámicos [12], [47], [48], los de generación acústica [49], electroquímica [50], [51] y mediante agitación mecánica [52]. Adicionalmente existen otras tecnologías empleadas a nivel de laboratorio e industria para generar microburbujas, ver Tabla 3.

Los desarrollos actuales de los sistemas de flotación se centran en lo siguiente [30]:

- Reducción del tiempo de aireación (por ejemplo, recipiente a presión con partición de medios porosos, acumulador de presión, método de descarga eléctrica, bomba DAF, etc.)
- Distribución uniforme de burbujas de gas (por ejemplo, modificación de la estructura interna de la celda de flotación, aireador de anillo para distribución radial, deflectores parabólicos, etc.)
- Marco integrado (flotación disuelta de múltiples etapas, combinación híbrida con coalescedor, ciclón, filtro, etc.)

Debido al bajo consumo de energía y a su amplia aplicación en diversos entornos como en el tratamiento de agua residual, la generación mediante métodos hidrodinámicos es más frecuente en las aplicaciones industriales empleando sistemas basados en generación mediante flujo de líquido en espiral, flotación por aire disuelto (DAF), eyectores de burbujas y sistemas tipo Venturi, como se muestra en la Figura 2.

Tabla 3, Técnicas de generación de burbujas.

Referencia	Técnica/dispositivo de flotación	de	Sistema de generación de burbujas	Rango de tamaño de burbujas (μm)
Rubio et al. [53]	Flotación de aire inducido (IAF)		Sistema de inyección de aire o agitador mecánico	700–1500
Oliveira et al. [54]	CavTube – Tubos de cavitación		Sparger de acero inoxidable – Cavitación hidrodinámica	1-100 μm 100 – 550 nm
Rubio et al. [53]	Flotación a reacción (Jet Flotation)		Boquilla de aspiración de gas para dibujar el aire en agua reciclada en una esquina hacia abajo	100–600
Han et al. [55]	Electroflotación		Electrólisis de soluciones acuosas diluidas (burbujas H ₂ y O ₂)	0.1 – 27
Prakash et al. [21]	Flotación de microcelda		Inyección de mezcla de agua/aire a través de mezclas estáticas	<600
Edzwald [22], [35]	Flotación de aire disuelto (DAF)		Reducción de la presión del agua que se sobresaturada a alta presión	10–100
Kim et al. [56]	Ultrasonido.		Método de circulación de agua de gas seguido de acoplamiento del electrodo de paladio con ultrasonido.	0.3–0.5
Prakash et al. [21]	Afrones de gas coloidales (Colloidal gas aphanes - CGA)		Burbujas estables de varias capas rodeadas por una fina capa de tensioactivo usando un agitador a alta velocidad (8000 rpm)	10-100
Nakatake et al. [57]	Boquilla de Cavitación hidrodinámica.		El agua sobresaturada pasa a través de la boquilla (reducción de la presión)	5–40
Prakash et al. [21] Rubio et al. [53]	Flotación de columna con inyectores		Boquillas e inyectores	800–2000

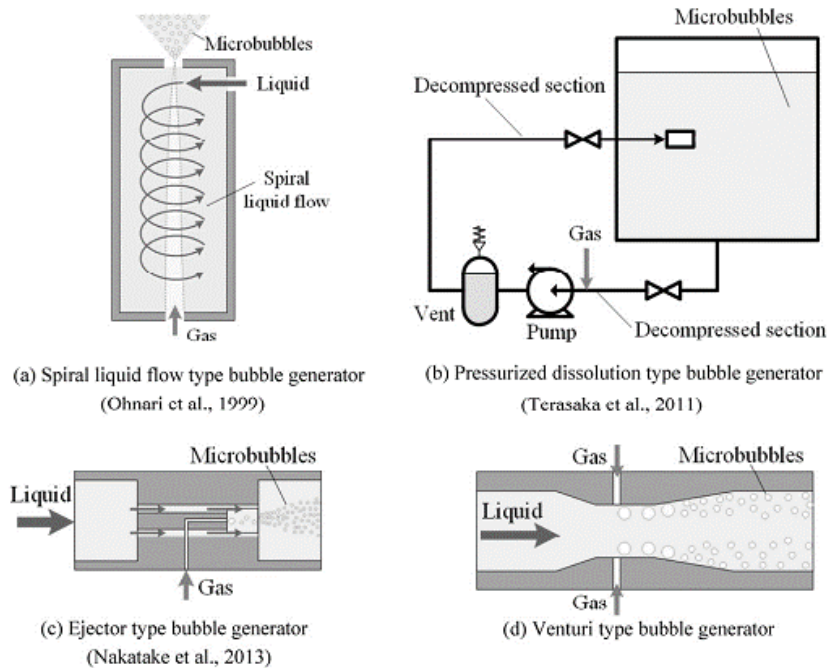


Figura 2, Diferentes sistemas de generación de microburbujas, fuente: Huang et al. 2020 [46].

2.1.3.1 Generación de microburbujas mediante flujo rotativo en espiral

En este método, se bombea agua a presión para crear un flujo de líquido de tipo rotativo en espiral que provoca secuencialmente una reducción de la presión en su parte axial central. El gas es inducido automáticamente a la zona de presión reducida. La mezcla aire-líquido desarrolla microburbujas debido al efecto de centrifugación y a la fuerte fuerza de cizallamiento causada por un flujo de líquido que gira a alta velocidad [46], ver Figura 2 (a).

2.1.3.2 Sistemas de Flotación por Aire Disuelto (DAF)

En estos sistemas de tratamiento primario, se disuelve aire en el agua aplicando una presión de aproximadamente 3-4 atm, posteriormente el agua saturada de aire se expulsa a través de una boquilla y se libera a presión atmosférica a través de una válvula de aguja o boquilla, lo que produce pequeñas burbujas de aire [10].

La Figura 3, presenta los tipos de configuraciones o modos de operación que se pueden utilizar para esta tecnología.

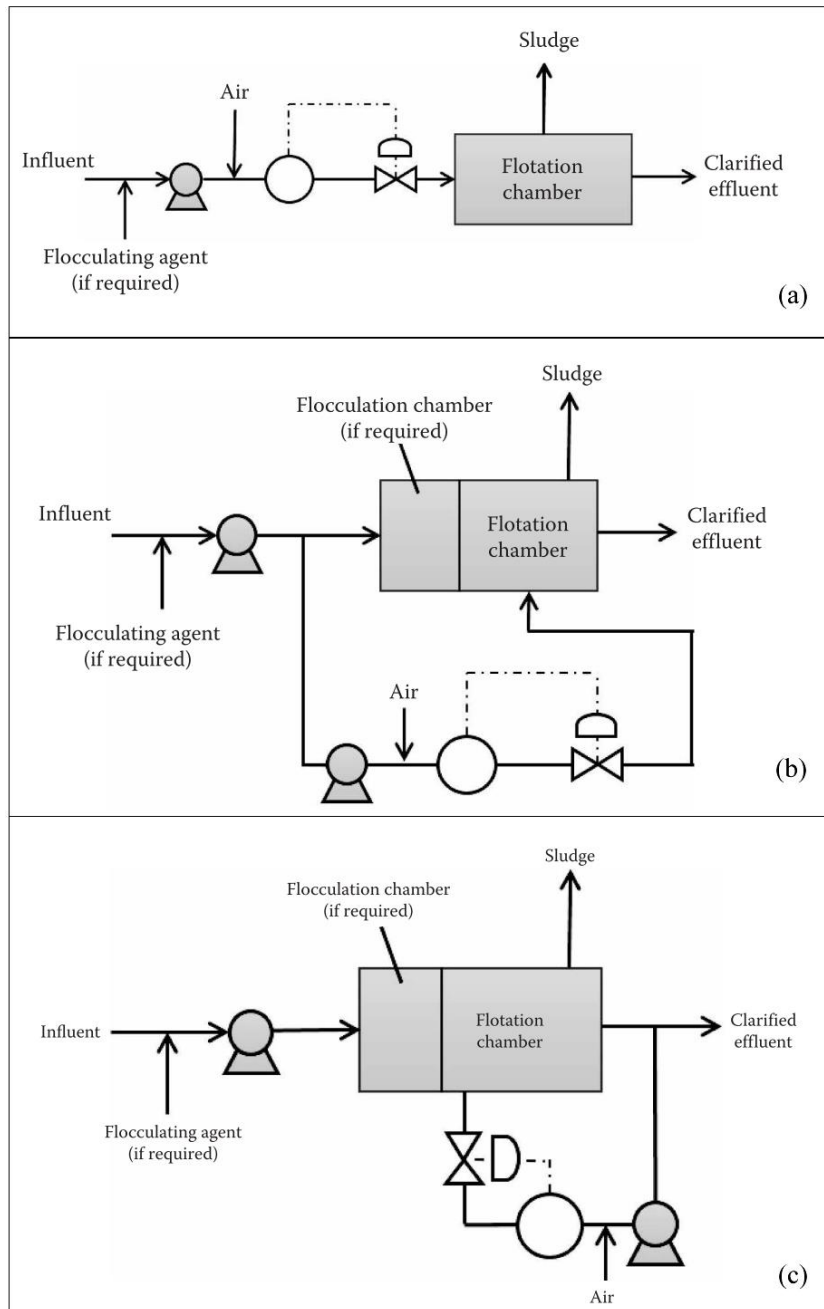


Figura 3, Modo de operación de los sistemas DAF, (a) flujo completo, (b) flujo dividido, (c) flujo reciclado. Fuente: Palaniandy et al. [58].

2.1.3.3 Flujo completo:

Todo el afluente es presurizado y luego liberado en el tanque de flotación, donde se forman las burbujas. Este tipo de flotación se utiliza para influentes que no necesitan floculación pero que requieren grandes volúmenes de burbujas de aire, ver Figura 3 (a).

2.1.3.4 Flujo dividido:

Una parte del afluente se presuriza y el resto fluye directamente al tanque de floculación o flotación. Este tipo de flujo es rentable en comparación con la flotación a presión de flujo completo, porque el saturador y la bomba de alimentación manejan sólo una parte del flujo total, por lo que se requiere un saturador y una bomba de alimentación más pequeños. Sin

embargo, el flujo dividido proporciona menos aire en el sistema. En consecuencia, tiene que funcionar a alta presión para proporcionar la misma cantidad de aire. Este tipo de flujo se utiliza para influentes que contienen partículas en suspensión susceptibles a los efectos de cizallamiento de una bomba de presión. También es adecuado para influentes con partículas en suspensión de baja concentración, debido a la baja necesidad de aire, ver Figura 3 (b).

2.1.3.5 Flujo reciclado:

El afluente fluye hacia el tanque de floculación o flotación si no se requiere un proceso de floculación. Una parte del afluente tratado se recicla, se presuriza, se satura con aire y se libera al tanque de flotación. Este tipo de flujo se aplica a los afluentes que necesitan coagulación y floculación. Es un tipo de flujo común, y se utiliza más a menudo que otros tipos, ver Figura 3 (c) y Figura 4.

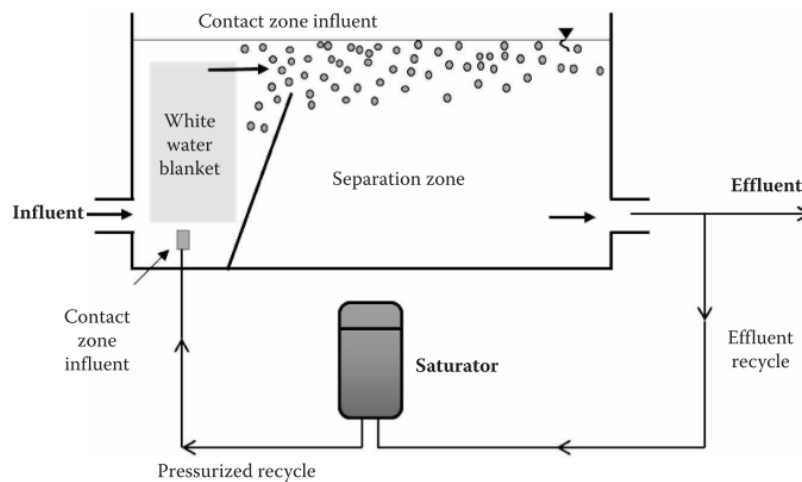


Figura 4, Sistema DAF con tanque de flotación rectangular con flujo de reciclaje. Fuente: Palaniandy et al. [58].

2.1.4 Sistemas de flotación por aire inducido o disperso

La flotación por aire inducido o disperso tiene dos sistemas diferentes para generar burbujas, a saber, la flotación por aire inducido se generan burbujas forzando el aire a través de un medio poroso de cerámica, plástico o metal sinterizado. La Figura 5(a) muestra una configuración típica para la generación de burbujas a través de un medio o difusor. En el sistema de flotación por espuma ilustrado en la Figura 5(b), se utiliza un impulsor de alta velocidad que gira en la solución para producir burbujas de aire. La flotación por aire disperso produce normalmente grandes burbujas de aire de más de 1 mm de diámetro.

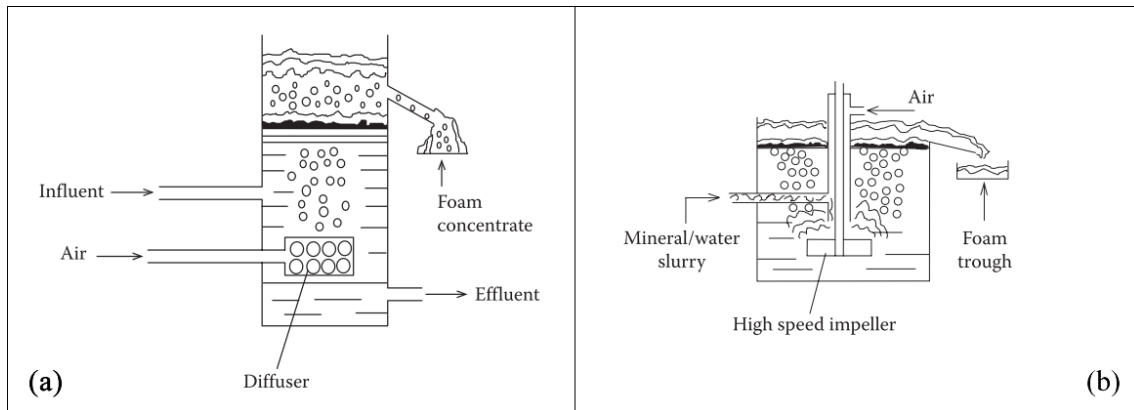


Figura 5, (A) flotación por aire inducido, (B) flotación por espuma empleado impulsor o turbina. Fuente: Palaniandy et al. [58].

Este tipo de sistemas de flotación se utilizan principalmente para la separación de minerales y la eliminación de materiales hidrofóbicos como las emulsiones de grasa en el tratamiento de aguas residuales seleccionadas. Este proceso se evaluó para el tratamiento de agua potable, pero se consideró inadecuado [47].

2.1.5 Sistemas Venturi.

Los generadores de burbujas tipo Venturi aprovechan el cambio de presión intensificado del flujo de alta velocidad que surge de la variación del área de la sección transversal para generar burbujas finas con un diámetro medio inferior a $100\ \mu\text{m}$ [46]. La concentración y el tamaño de las burbujas producidas es en un amplio rango desde decenas de micras hasta milímetros y son controlables operando los caudales de líquido y gas. Presenta ventajas por su estructura simple, de una instalación conveniente, de no tener partes móviles internas, de un menor mantenimiento y de una buena fiabilidad, siendo empleado en la industria minera y en aplicaciones de tratamiento de agua [59]. Una de sus ventajas representativas es que el bajo consumo de energía lo convierte en una alternativa económica para mejorar la transferencia de masa gas-líquido [60]. La Figura 6 presenta un esquema de un generador de microburbujas tipo Venturi.

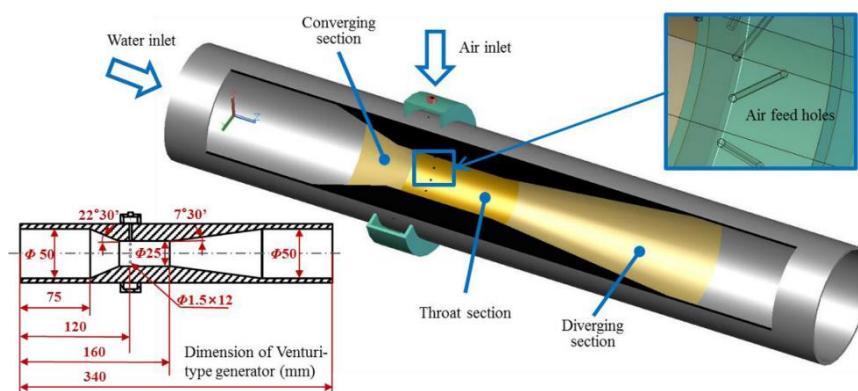


Figura 6, Esquema de un generador de burbujas tipo Venturi, así como sus parámetros geométricos. Fuente: Sun et al. [61]

2.1.6 Cavitación Hidrodinámica

La cavitación describe un fenómeno particular que ocurre dentro de un líquido cuando se somete a cambios en el campo de presión a lo largo del tiempo y la distancia. Estos cambios dependen de que el líquido se enrarezca a una presión crítica suficientemente baja, provocando la formación de vacíos, llenos de vapor del líquido, así como gases disueltos en el líquido. Luego, tras una compresión violenta, estos vacíos, llenos de vapor y gas, implosionan [62]. La cavitación hidrodinámica puede generarse mediante una placa de orificio, un Venturi o una válvula de estrangulación en un flujo de líquido [59]. La relación presión-velocidad del fluido que fluye, es explicada por la ecuación de Bernoulli. En la constricción, la energía cinética del líquido aumenta a expensas de la caída de presión, como se representa esquemáticamente en la Figura 7.

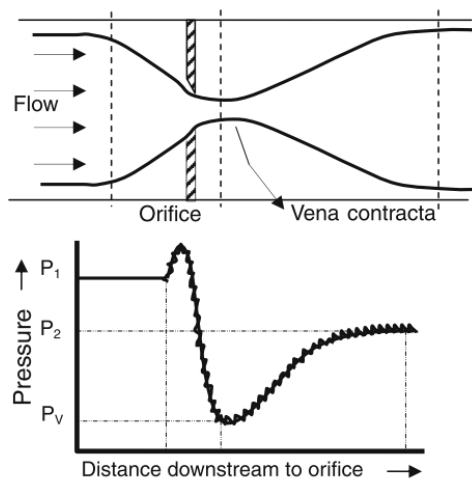


Figura 7, Flujo vs variación de presión durante la cavitación hidrodinámica. Gogate y Pandit [63].

Si la estrangulación es suficiente para que la presión alrededor del punto donde se ha producido la contracción caiga por debajo de la presión umbral para la cavitación (normalmente la presión de vapor del medio a la temperatura de funcionamiento), se generan cavidades. Posteriormente, a medida que el chorro de líquido se expande reduciendo la velocidad media, la presión aumenta, lo que provoca el colapso de las cavidades.

Durante el paso del líquido a través de la constricción, se produce la separación de la capa límite y se pierde una cantidad sustancial de energía en forma de caída de presión permanente debido a la turbulencia local. También se genera una turbulencia de fluido de muy alta intensidad aguas abajo de la constricción; su intensidad depende de la magnitud de la caída de presión y de la tasa de recuperación de la presión, que, a su vez, dependen de la geometría de la constricción y de las condiciones de flujo del líquido, es decir, de la escala de turbulencia [63]. La intensidad de la turbulencia tiene un profundo efecto en la intensidad de la cavitación. Así, controlando las condiciones geométricas y de funcionamiento del reactor, se puede generar la intensidad de cavitación necesaria para el cambio físico o químico deseado con la máxima eficiencia energética. Un número adimensional conocido como el número de cavitación (Cv) se ha utilizado generalmente para relacionar las condiciones de flujo con la intensidad de la cavitación (Yan et al. 1988) [63]:

$$C_v = \frac{P_2 - P_v}{\frac{1}{2}\rho v_o^2} \quad (3)$$

Donde P_2 es la presión aguas abajo totalmente recuperada, P_v es la presión de vapor del líquido y v_o es la velocidad del líquido en la constricción. El número de cavitación al que se produce el inicio de la cavitación se conoce como número de inicio de la cavitación C_{vi} . Idealmente, el inicio de la cavitación ocurre en $C_{vi} = 1$, y hay efectos de cavitación significativos en C_v menos de 1. Sin embargo, se ha encontrado que la cavitación ocurre en un número de cavitación más alto (en el rango de 2 a 4), también posiblemente debido a la presencia de gases disueltos o algunas impurezas en el medio líquido.

Al buscar en la base de datos SCOPUS utilizando la palabra clave “Cavitación hidrodinámica”, después de 2013, se puede observar un aumento de más del 20 % en el número anual de publicaciones en ingeniería [64]. La eficiencia de la cavitación hidrodinámica ha sido demostrada en tratamiento de agua y sector minero, todavía existen algunas lagunas en la investigación que exigen más estudios con el objetivo de establecer la eficacia para otra matriz de efluentes, por ejemplo, aguas residuales de mataderos de aves.

2.1.7 Medición de microburbujas

Los pasos críticos en los experimentos de caracterización de burbujas son la adquisición de muestras de líquido burbujeante, la medición del tamaño de la burbuja y el análisis de datos. Si bien los métodos basados en análisis digital de imágenes fotográficas han sido los más utilizados, otras técnicas incluyen difracción de luz, análisis de flujo de deriva, placa porosa, electrorresistividad y detectores ópticos. El análisis de datos abarca desde la medición manual del tamaño de las burbujas individuales hasta métodos automatizados sofisticados que, por ejemplo, pueden determinar el tamaño de las burbujas dentro de los grupos [65]. La Tabla 4, muestra los diversos métodos empleados para caracterizar las distribuciones de tamaño de las burbujas.

Tabla 4, Resumen de los métodos de caracterización del tamaño de la burbuja.

Configuración experimental	Medición	Análisis	Rango de tamaño	Referencia
Muestras extraídas en un contador de partículas en línea láser	Difracción de luz (Chemtrac PC2400 D, EE. UU.)	Conversión de difracción a tamaño de burbuja	15–85 μm	Han et al. [66]
Muestras extraídas en un contador de partículas tipo lote	Resistividad eléctrica (Multisizer II, Coulter)	Conversión de resistividad a tamaño de burbuja	13–96 μm	Han et al. [66]
Muestras perforadas en la celda de visualización Perspex (0,08 m, 0,08 m y 0,015 m)	Fotografía	Software de análisis de imágenes <i>Image-Pro plus</i>	10–150 μm	Li et al. [67]
Unidad DAF a escala de laboratorio con muestras extraídas en la cámara de visualización.	Cámara digital y retroiluminación	Software analizador de tamaño de burbuja <i>LabVIEW</i> (BASF)	60–131 μm	Gulden et al. [68]
Burbujas generadas por difusores en tanque	Espectrometría acústica	Análisis de señales obtenidas por sistema de espectrómetro de burbuja acústica mediante software	80–500 μm	Rehman et al. [69]

Columna de flotación piloto	Velocidad de gas y retención de gas	Análisis de flujo de deriva	350–1100 μm	Filippov et al. [70]
Burbujas individuales transferidas a una cubeta	Cámara de alta velocidad	Análisis manual de imágenes	10–120 μm	Parkinson et al. [71]
Burbujas individuales generadas en celda de electroforesis	Fotodetector	Velocimetría láser Doppler	$\approx 80 \mu\text{m}$	Kelsall et al. [72]

El procesamiento y análisis de imágenes para identificar la posición y el diámetro de las burbujas que están enfocadas se realiza con la ayuda de herramientas software de análisis numérico computacional como las que proporciona el toolbox de procesamiento de imágenes de Matlab®. Por lo general la identificación se basa en la exclusión de objetos de la imagen en base a tres factores; binarización de la imagen, excentricidad e intensidad mínima del objeto.

La binarización de la imagen se utiliza como un medio para seleccionar burbujas eliminando la imagen de fondo. Esto se hace mediante una simple decisión de exclusión/inclusión basada en la oscuridad de cada píxel. La excentricidad se utiliza como un medio para excluir/incluir burbujas en función de la redondez de los objetos dentro de la imagen. La intensidad mínima se utiliza como un medio para incluir/excluir objetos en función de la oscuridad de cada objeto. Por ejemplo, las burbujas desenfocadas y más pequeñas aparecerán más claras que las burbujas enfocadas. Los umbrales de los tres parámetros pueden configurarse manualmente y probarse para optimizar la identificación de burbujas [65].

2.1.8 Características de las aguas residuales de la industria avícola

Las aguas residuales de mataderos avícolas (PSWW) presentan una composición compleja, con alta cantidad de compuestos orgánicos, sólidos en suspensión, aceite y grasa, nitrógeno y fósforo y pueden contener metales pesados, como Co y Zn. Por lo tanto, se considera como agua residual de alta resistencia. La mayor parte de la materia orgánica se origina como sangre de aves, que puede representar hasta el 90% de la DBO5 total. La complejidad de PSWW también puede aumentar por la presencia de productos químicos utilizados para la desinfección y limpieza de máquinas, que representan alrededor del 18-20 % del total de aguas residuales generadas.

Además, la composición de estas aguas residuales varía según el tipo de ave, el tipo de sistemas, el equipo, los métodos de operación, las cargas de procesamiento y la capacidad de cada instalación de procesamiento avícola. Esta variabilidad se puede ver en la diversa composición de estas aguas residuales presentada en la Tabla 5. Se resaltan los valores de TSS y O&G que son las variables de interés de este estudio [64].

Tabla 5, Parámetros reportados para diferentes fuentes de agua residual de las plantas de procesamiento de aves.

parámetros	Unidades	Cabo Occidental - Sudáfrica Basitere et al. [73]	México Chávez et al. [74]	Turkia Debik and Coskun [75]	Brasil Del Nery et al. [27]	Malasia Rajab et al. [76]	Brasil Nardi et al. [28]	Colombia Fernández, et al. [77]	Colombia Cáceres et al. [78]
pH	–	6.13–7.24	6.1–7.1	6.17	6.85 ± 1.25	6.8 ± 0.2	6.65 ± 0.35		
Alcalinidad Total (CaCO ₃)	mg/L	499 ± 158	7.5–12.1	185.25	1315 ± 785	160 ± 21	NR		
Demanda Química de Oxígeno (COD)	mg/L	5126 ± 2534	5800–11600	2360.49	6880 ± 1400	2711 ± 487	3124 ± 594	755 - 2060	6750
Demanda Bioquímica de Oxígeno (BOD ₅)	mg/L	2477 ± 1347	4524–8700	NR	NR	930 ± 96	2025 ± 352	483 - 1320	2880
Nitrógeno Total (TN)	mg/L	NR	10.5–11150	NR	NR	153 ± 32	NR		
Amonio (AM)	mg/L	216 ± 56	6–95	NR	335 ± 140	85 ± 32	NR		
Fosfatos Totales (TP)	mg/L	NR	7.17–12.74	NR	8.95 ± 3.15	NR	NR		
Aceites y Grasas (O&G)	mg/L	715 ± 506	147–666	535.33	NR	281 ± 63	182 ± 29	89 - 124	1830
Sólidos Suspendidos Totales (TSS)	mg/L	1654 ± 1695	762–1462	NR	2800 ± 950	835 ± 162	861 ± 204	246 - 436	1910
Sólidos Disueltos Totales (TDS)	mg/L	1138 ± 294	NR	515	NR	917 ± 135	NR		
Sólidos volátiles Totales (TVS)	mg/L	NR	124–1492	1386	NR	NR	816 ± 207		
Nitratos	mg/L	3.33 ± 4.45	NR	NR	NR	NR	NR		
Sulfatos	mg/L	NR	561–1496	NR	NR	NR	NR		123
Fosfatos	mg/L	38 ± 6	2.75–7.81	NR	NR	51 ± 2	NR		1,7
Conductividad eléctrica	mS/cm	1.6 ± 0.414	8.61 – 14.70	NR	NR	0.8 ± 0.109	NR		
Salinidad	mg/L	916 ± 179	NR	NR	NR	NR	NR		
Turbidez	NTU	719 ± 201	NR	NR	NR	>1000	NR		

NR: No reporta.

2.1.9 Regulación ambiental

El Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible mediante la Resolución 631 de 2015 del 17 de marzo de 2015 «Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones». Estableció los límites permisibles asociados los parámetros fisicoquímicos a monitorear asociados a los vertimientos de agua residuales provenientes de la actividad agroindustrial asociada al beneficio de aves de corral, estos valores se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6, Límites permisibles de vertimientos de aguas residuales de plantas de procesamiento de aves de corral, Resolución 631 de 2015, Minambiente.

Parámetro	Unidades	Límite permisible (Ganadería de aves de corral - Beneficio)
Generales		
pH	unidades de pH	6,00 a 9,00
Demanda Química de oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	650
Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	300
Sólidos Suspendidos Totales (TSS)	mg/L	100
Grasas y aceites	mg/L	2
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	mg/L	40
Compuestos de Fosforo		
Ortofosfatos (P – PO ₄ ³⁻)	mg/L	Análisis y Reporte
Fosforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte
Compuestos de Nitrógeno		
Nitratos (N – NO ₃)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitritos (N – NO ₂)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitrógeno amoniacal (N- NH ₃)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitrógeno total (N)	mg/L	Análisis y Reporte
Iones		
Cloruros (Cl ⁻)	mg/L	250
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	250
Otros parámetros para análisis y reporte		
Acidez total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte
Alcalinidad total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte
Dureza cálcica	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte
Dureza total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte
Color real	m ⁻¹	Análisis y Reporte

2.2 Brecha de investigación y proposición que da origen a la investigación

Para el desarrollo de esta investigación se estableció un estado del arte para responder a las preguntas: ¿qué se conoce de los sistemas DAF en tratamiento de aguas residuales del sector avícola?, ¿qué dificultades se han reportado en el tratamiento de aguas residuales en el sector avícola?, ¿qué oportunidades existen para la optimización de sistemas DAF mediante ajuste de

sus parámetros operativos?, ¿qué oportunidades existen para la optimización de sistemas DAF mediante modificación de las condiciones de diseño del sistema?, ¿qué importancia tiene el tamaño de la microburbuja generada por el inyector en el desempeño del DAF?, ¿qué desarrollos tecnológicos recientes en sistemas de generación de microburbujas existen?. El resultado de la búsqueda sistemática en la literatura científica desde el año 2014 hasta el año 2020 que permitió dar respuesta a esas preguntas se presenta a continuación:

2.2.1 Dificultades asociadas al tratamiento de aguas residuales con sistemas de flotación, reportados en el sector avícola

A pesar de la importancia del tratamiento de las aguas residuales de la industria avícola, son escasos los informes generales y específicos sobre plantas de tratamiento de aguas residuales a gran escala que muestran sus dificultades y estrategias de resolución de problemas, lo que dificulta la evaluación de las tecnologías empleadas en esta industria. Nardy y Del Nery [1], [4], [27], [28], evaluaron el rendimiento y la estabilidad del proceso de una planta de tratamiento del matadero avícola Céu Azul Alimentos Ltda, (Brasil) durante una operación de 4 años considerándose necesarias mejoras a la unidad DAF para cumplir con los objetivos de diseño de remoción de SS y O&G. El sistema analizado está compuesto por una unidad DAF y un reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) a gran escala. Inicialmente la planta contaba con un sistema de flotación por aire inducido (IAF) pero debido a los bajos niveles de remoción, instalaron un sistema DAF obteniendo eficiencias medias de remoción de O&G 51 % y SS de 37% resultados inicialmente no satisfactorios. El uso de productos químicos mejoró las eficiencias de eliminación de la DQO total (TCOD), los sólidos en suspensión (SS) y la O&G al 77%, 74% y 99%, respectivamente.

Por otro lado, Dassey [17], estudio el tratamiento primario de aguas residuales de una planta de sacrificio de aves de corral en USA. Empleó una planta DAF a escala de laboratorio y evaluó la idoneidad de once coagulantes metálicos y un polielectrolito como pretratamiento químico. En su investigación buscó el punto de operación que maximiza la generación de microburbujas en el sistema DAF e identificó la combinación de cloruro férrico y Floccin como aditivos químicos adecuados para tratar las aguas residuales con más de un 97% ($\pm 0,5$) de eliminación de TSS, 96% ($\pm 1,1$) de VSS, 91% de eliminación de DQO y 100 % de eliminación de O&G. Sin embargo, las concentraciones de aditivos químicos utilizadas fueron demasiado altas para ser económicamente viables. Una de las dificultades presentadas con el sistema DAF empleado se asoció al flujo máximo de microburbujas producido por el sistema (30 ml de aire por litro de agua). Este valor se consideró bajo en comparación con otros sistemas, pero los intentos de aumentar el volumen de microburbujas en el sistema dieron como resultado la fusión y coalescencia de microburbujas debido a condiciones turbulentas que afectaron el pretratamiento químico. Su investigación permitió identificar la importancia del control del tamaño de microburbuja generado para el tratamiento de aguas residuales en el sector avícola.

2.2.2 Optimización de eficiencia en sistemas DAF mediante ajuste de parámetros operativos

Los parámetros operativos que inciden en la eficiencia de remoción de contaminantes usando sistema DAF son la velocidad de flujo, presión de saturación, tiempo de retención hidráulica, pretratamiento químico y boquilla de salida [79]. Varios estudios se han realizado buscando identificar las condiciones operativas que maximizan la eficiencia del sistema. En [1] se presenta uno de los estudios más representativos de optimización de un sistema DAF en el tratamiento primario de aguas residuales del sector avícola. Evaluaron los parámetros operativos que maximizan la remoción de SS y O&G en una planta de gran escala realizando pruebas en una planta a escala de laboratorio; evaluaron los costos del proceso de coagulación / floculación y las estrategias operativas del sistema DAF en estudio logrando identificar las condiciones que maximizan la eficacia de remoción del sistema disminuyendo costos operativos logrando pasar de remociones del 57% de SS y 60% de O&G al 74% de SS y al 99% de O&G. Para este fin, consideraron factores de inestabilidad del sistema asociados a la variabilidad de las características de calidad del efluente industrial, la insuficiencia de las adiciones químicas y la presurización del influente total en el sistema DAF [27]. Por lo tanto, la mejora de la calidad del efluente de DAF lograría gestionando el pretratamiento químico y las condiciones operativas de DAF.

De forma similar, [80] y [81] presentan un estudio de optimización a nivel de laboratorio de un sistema DAF para el tratamiento de aguas residuales de productos lácteos, mediante un diseño experimental estudiaron los factores presión, relación de recirculación, pH, dosis y tipo de coagulante identificando las condiciones operativas que maximizan los índices de remoción. Se utilizó un diseño factorial para probar cinco factores y su rango de valores: presión de saturación (4–10 bar); relación de recirculación (20-100%); pH (3-12); dosis de coagulante Sulfato ferroso (0–1000 mg L⁻¹) y polímero orgánico catiónico TanFloc (0–50 mg L⁻¹). Como resultado del experimento se pudo verificar que los factores que de manera significativa ($p \leq 0.1$) afectaron el proceso de flotación fueron la presión de saturación (generación de microburbujas), pH (del efluente) y dosis de coagulante. En la Tabla 7, se presenta un resumen la literatura sobre estrategias de optimización de sistemas DAF a partir del ajuste de sus parámetros operativos.

Otros estudios de optimización de sistemas DAF [9], [17], [20], [82]–[85], se han centrado en estudiar el pretratamiento químico de floculación y coagulación como estrategia principal de optimización en términos de remoción. Estas investigaciones proponen diferentes dosificaciones de coagulantes orgánicos e inorgánicos durante el pretratamiento químico para obtener los mayores índices de remoción de SST y O&G sin modificar significativamente las condiciones de operación del DAF.

Tabla 7, Resumen de la literatura sobre estrategias de optimización de parámetros operativos DAF.

AUTOR	INDUSTRIA	AREA DE APLICACIÓN	CONTRIBUCIÓN RESUMIDA
[84] Zouboulis & Avravas	Industria & Hidrocarburos	Tratamiento de emulsión aceite - agua	La aplicación de un tratamiento de flotación con pre-acondicionamiento químico (a nivel de laboratorio) resultó en una reducción superior al 95% del contenido de aceite en el efluente tratado.

[1] de Nardi et al.	Industria Avícola	Optimización DAF	La operación inicial de un sistema DAF logró eficiencias de eliminación promedio insatisfactorias de $43 \pm 15\%$ SS y $49 \pm 8\%$ O&G. Usando DAF a escala de laboratorio con presurización de un 40% de efluente de DAF reciclado a 450 kPa, sin pretratamiento químico, aumentaría la eliminación de SS y O&G a 57 ± 3 y $60 \pm 14\%$, respectivamente. Al usar los mismos productos químicos las eficiencias de remoción aumentaron al 74% de SS y al 99% de remociones de O&G.
[4] Nery et al.	Industria Avícola	Tratamiento global de aguas residuales de la industria avícola	Estudios de DAF a escala de laboratorio mostraron que la implementación de la presurización de un 40% de efluente de DAF reciclado a 450 kPa sin pretratamiento químico da como resultado eliminaciones de SS y O&G de $57 \pm 3\%$ y $60 \pm 14\%$, respectivamente. Además, el uso de productos químicos mejoró las eficiencias de eliminación de la DQO total (TCOD), los sólidos en suspensión (SS) y la O&G al 77%, 74% y 99%, respectivamente
[20] Etchepare et al.	Hidrocarburos	Remoción de aceite en agua salada	DAF con presión de saturación 5 Bar, junto a floculación con 5 mg K-1 de Dismulgan a PH/, mostro eficiencia de remoción superior al 99%
[85] Adlan et al	Tratamiento de aguas residuales urbanas	Tratamiento de Lixiviados	Uso de metodología RSM (Response Surface Methodology) para identificar la dosificación de coagulante y floculante que optimiza la remoción.

2.2.3 Optimización de sistemas DAF mediante modificaciones de condiciones de diseño y operación.

Son varios los enfoques bajo los cuales se han propuesto modificaciones del sistema DAF buscando mejorar la generación de microburbujas, disminuir consumo energético o simplificar el diseño. En [20] y en [86] presentan un nuevo método de generación de micro y nano burbujas mediante un sistema DAF modificado que emplea una bomba centrífuga multifásica, válvulas de aguja para regulación de caudal y una boquilla de cavitación hidrodinámica CavTube® (inyector de microburbujas patentado por la compañía Eriez), produciendo micro y nano burbujas con retención del aire del orden de 16%, nano burbujas (diámetro medio = 230– 280 nm) concentración de $6,4 \times 10^8$ NBs mL⁻¹ para aplicaciones de flotación de minerales [87]. Este diseño no requiere de tanque de saturación y unidad de compresión de aire, para generar microburbujas. La mezcla de agua y aire se bombean a través de una contracción y expansión repentinas en la boquilla, lo que provoca una alta velocidad de flujo en la garganta del

dispositivo, provocando la nucleación y formación de micro y nano burbujas y se considera que las concentraciones de nano burbujas son mayores en comparación con los resultados obtenidos con el DAF convencional [88].

Por otro lado, [43] presenta un sistema híbrido DAF-EAOP (DAF- Flotación por aire disuelto & EAOP - proceso de oxidación avanzada electroquímica) para aplicaciones en la industria química y alimenticia, que puede eliminar aceites de alta concentración, compuestos orgánicos volátiles y metales pesados de las aguas residuales industriales. El proceso EAOP se usa para la degradación de compuestos orgánicos volátiles y el pretratamiento, la flotación de aire disuelto con una boquilla de hendidura modificada, que genera micro / nano burbujas de tamaño ajustable (1–100 μm) y se diseñó para eliminar de manera eficiente los aceites de tamaño micro (<20 μm) que pueden no ser eliminados por las macro burbujas. Este sistema eliminó el 93,5% de la demanda química de oxígeno (DQO). El aumento del tamaño de las burbujas en el rango de 2 a 20 μm condujo a la eliminación efectiva de partículas de aceite con un tamaño comparable al de las burbujas incluso con una baja cantidad de coagulante. Es uno de los estudios más recientes que demuestra la aplicabilidad del control del tamaño de microburbujas en el proceso de flotación para incrementar la eficiencia de remoción. De igual forma la modificación de la boquilla con hendidura modificada es novedad en estos sistemas.

Similar al estudio anterior, en [89] proponen una optimización del sistema DAF modificando la boquilla de salida del tanque saturación, empleando dos boquillas desarrolladas en colaboración con Pyramoon Water and Energy Engineering Company, Irán. Para su desarrollo emplearon una impresora 3D para producir diseños con ácido poliláctico (PLA). Las boquillas fueron recubiertas con una funda de aluminio y se conectaron a la salida del tanque de saturación. Las pruebas operativas se realizaron en una planta DAF a escala real, logrando identificar que la cantidad de burbujas pequeñas está determinada predominantemente por la presión del saturador y no por el caudal a través de la boquilla. Este resultado es considerado importante por los autores debido a que permitirá un desarrollar un tanque de saturación más pequeño y un menor número de boquillas (mayor caudal a través de cada una). Por lo tanto, estas medidas pueden ayudar a reducir los costos de capital en el diseño y construcción del sistema DAF. En la Tabla 8, se presenta las contribuciones de diferentes estudios sobre estrategias de optimización de componentes del sistema DAF.

De igual forma, se encuentran estudios que se han enfocado en la importancia y los efectos del sistema de generación de microburbujas en la eficiencia del tratamiento [11], [90], [91], y se han hecho comparaciones de eficiencia del sistema usando una boquilla simple, un eyector impulsado por aire y un eyector tipo tubo de cavitación hidrodinámica [92], encontrando que esta última maximiza la eficiencia en generación de microburbujas de 8 veces mayor producción en comparación con la boquilla simple y el eyector impulsado por aire. En aplicaciones industria, se ha logrado incrementar la remoción de minerales como sílice y sulfuro de zinc usando este tipo de boquillas [93].

La cavitación hidrodinámica es considerada uno de los métodos de generación de burbujas más económico y energéticamente eficiente reconocido por su facilidad de escalamiento y controlabilidad respecto a otras tecnologías [11], [12], [22].

Tabla 8, Resumen de la literatura sobre estrategias de optimización de componentes en DAF.

AUTOR	INDUSTRIA	AREA DE APLICACIÓN	CONTRIBUCIÓN RESUMIDA
[89] Kouhestani et al.	Tratamiento de agua de mar	Optimización boquilla DAF	Las pruebas de boquillas de cavitación hidrodinámica en DAF, la cantidad de burbujas pequeñas está determinada predominantemente por la presión del saturador y no por el caudal a través de la boquilla. Esto reduce el tamaño del saturador y número de boquillas (mayor caudal a través de cada una) permitiendo reducir los costos de construcción del sistema DAF.
[43] Lee et al.	Industria procesamiento de alimentos	Optimización boquilla de DAF	DAF junto con una boquilla de hendidura de burbujeo de tamaño micro / nano seleccionable (1–100 µm) se diseñó para eliminar de manera eficiente los aceites de tamaño micro (<20 µm) que pueden no ser eliminados por las macro burbujas. Este sistema eliminó los sólidos en suspensión que contienen contaminantes de aceite, lo que corresponde a un 95% de eliminación de DQO y un 95% de recuperación.
[94] Lecoffre et al.	Tratamiento de agua	Optimización boquilla DAF	Los tanques de alta presión no son necesarios. Las técnicas que utilizan saturadores de baja presión pueden lograr el mismo rendimiento. Los inyectores CARMIN no necesitan sobresaturación y son más amigables con la energía. Todos estos generadores se pueden emplear para el tratamiento del agua como desgasificación o flotación.
[95] Féris et al.	Industria Minera	DAF - DIFUSOR	DAF modificado que trabaja a presión de 2 atm, mediante la reducción de la tensión interfacial aire / agua con el uso de un surfactante (colector / espumador) en el saturador como mecanismo de optimización del consumo energético. Adicionalmente se adaptó un difusor tipo hongo para disminuir la sedimentación de agregados de partículas de burbujas.

[96] Etchepare et al.	Industria Minera	Generación de nano burbujas	las bombas multifase centrífuga (CMP) tienen un gran potencial para la mayor generación nano burbujas a alta velocidad, alcanzando una concentración máxima nano burbujas (4.1×10^9 nano burbujas ml^{-1})
[3] Irshad et al.	Tratamiento de agua	Control de turbidez en agua mediante automatización DAF	Se implemento controlador Fuzzy logic para clarificación de agua. Los resultados indican que la variable turbidez presenta mayor sensibilidad al control de la válvula de aguja respecto al control de la presión del saturador.

2.2.4 Importancia del tamaño de la microburbuja generada:

En términos de tamaño de microburbujas, estudios recientes indican que el tamaño de burbuja reducido da como resultado una mejor eficiencia del proceso debido a una mayor transferencia de masa a través de la interfaz gas-líquido [21]. La flotación con burbujas finas es considerada como un proceso eficiente en la recuperación de sólidos suspendidos ($<13 \mu\text{m}$ de diámetro) y en el tratamiento de agua / aguas residuales. Cuanto más pequeñas son las burbujas, mejor es el rendimiento de la flotación porque las partículas finas o coloidales (micro y nano) son capturadas eficazmente por las burbujas finas y no por las grandes. Recientemente, estudios revelaron que la presencia de microburbujas y especialmente nano burbujas mejoran la separación por flotación [18]–[20], [97].

Según varios estudios que aplicaron nano burbujas (NB 150-800 nm) y microburbujas (MB, 30-100 μm) para la eliminación de minerales en agua y para el tratamiento de aguas residuales por flotación [96], [98], las nano burbujas ayudan a las microburbujas a formar agregados debido a sus propiedades únicas y la eficiencia de eliminación de los agregados aumenta gracias a la presencia de microburbujas en el proceso de flotación [45]. En la Tabla 9, se presenta un resumen de las contribuciones identificadas en diversos estudios sobre la importancia del control del tamaño de la microburbuja generada.

Por otro lado, la cavitación hidrodinámica genera microburbujas a través de la formación de cavidades cuando el líquido fluye a través de una geometría simple como un tubo Venturi o una placa de orificio [10]. El tamaño de las microburbujas generadas a través de tubos de cavitación se puede variar para adaptarse a la variación en el caudal de alimentación y lograr una eficiencia de tratamiento comparable de las aguas residuales. Sin embargo, el uso de microburbujas generadas mediante esta técnica es algo nuevo en el ámbito industrial.

En [93], el autor manifiesta que un mecanismo de optimizar los sistemas de flotación es ampliando la distribución del tamaño de las burbujas con burbujas de tamaño mediano o gruesas, bien conocidas en la flotación de minerales, pero no en el tratamiento de agua y aguas residuales.

Tabla 9, Resumen de la literatura sobre. importancia de tamaño de microburbujas en sistemas de flotación.

AUTOR	INDUSTRIA	AREA DE APLICACIÓN	CONTRIBUCIÓN RESUMIDA
[18] Calgaroto, et al.	Industria Minera	Generación y aplicaciones de nano burbujas	la inyección de nano burbujas (200–720 nm) junto con burbujas gruesas convencionales (400–800 μm) mejoró las recuperaciones por flotación de partículas finas y ultrafinas de cuarzo. mejorando la recuperación del cuarzo muy fino en un 20-30%. Respecto al tratamiento exclusivo con burbujas convencionales.
[43] Lee et al.	Industria procesamiento de alimentos	Optimización boquilla DAF	DAF junto con una boquilla de hendidura de burbujeo de tamaño micro / nano seleccionable (1–100 μm) se diseñó para eliminar de manera eficiente los aceites de tamaño micro (<20 μm) que pueden no ser eliminados por las macro burbujas. Este sistema eliminó los sólidos en suspensión que contienen contaminantes de aceite, lo que corresponde a un 95% de eliminación de DQO y un 95% de recuperación.
[44] Wang et al.	Industria Minera	Regulación de tamaño de microburbujas	Las burbujas generadas evolucionan continuamente (es decir, se deforman, rompen y se fusionan) para formar burbujas de un tamaño estable en la celda de flotación. y el tamaño de la burbuja depende del equilibrio de la ruptura y la coalescencia.
[45] Kim et al.	Tratamiento de agua	Aplicación de nano burbujas	Los agregados formados por los NB adheridos obtuvieron una muy alta eficiencia de formación (X) debido a su muy alta eficiencia de unión, pero muy baja eficiencia de separación (Y) debido a su muy lenta velocidad de ascenso. Los resultados proponen que las burbujas híbridas son mejores que las nano burbujas puras para separar partículas finas en el agua.
[18] Calgaroto, et al.	Industria Minera	Generación y aplicaciones de nano burbujas	la inyección de nano burbujas (200–720 nm) junto con burbujas gruesas convencionales (400–800 μm) mejoró las recuperaciones por flotación de partículas finas y ultrafinas de cuarzo. mejorando la recuperación del cuarzo muy fino en un 20-30%. Respecto al tratamiento exclusivo con burbujas convencionales.
[99] Parmar et al.	Química	Coagulación Floculación y DAF	Las microburbujas proporcionan una mayor superficie por unidad de volumen que las mili y macro burbujas convencionales. Las microburbujas proporcionan un alto coeficiente de transferencia de masa en comparación con las burbujas convencionales.

2.2.5 Desarrollos tecnológicos recientes en sistemas de generación de microburbujas basados en cavitación hidrodinámica.

La cavitación hidrodinámica parece ser la mejor forma práctica de generar micro y nano burbujas a alta velocidad, a nivel piloto e industrial. Las nano burbujas se agregan a partículas en agua y se adhieren fácilmente a las superficies mediante fuerzas hidrófobas y atractivas [11]. A continuación, se presentan dos dispositivos de generación de micro y nano burbujas que emplean esta técnica:

2.2.5.1 *CAVTUBE:*

Los boquillas o inyectores de tubo de cavitación “CavTubes®” patentada por la compañía Eriez son utilizadas en celdas de flotación tipo columna. Se emplean para maximizar la generación de burbujas finas y mejorar las tasas de colisión de burbujas y partículas. También se pueden utilizar como parte de un sistema de pre-aireación que se puede aplicar de forma independiente en una línea de alimentación de flotación o como parte de un paquete de equipo separado para aumentar la recuperación de circuitos sobrecargados o mejorar la respuesta de flotación. Este tipo de solución es espacialmente usado en la industria minera. [87]. Por ejemplo, en [86] se empleó un tubo de cavitación (CavTube®) produciendo Micro y Nano Burbujas con retención del aire del orden de 16% y generando nano burbujas diámetro medio = 230– 280 nm y concentración de $6,4 \times 10^8$ NBs mL⁻¹.

2.2.5.2 *Inyectores CARMIN:*

Los inyectores CARMIN, son boquillas que aprovechas la cavitación hidrodinámica para producir grandes cantidades de microburbujas muy finas. A diferencia de los procesos DAF convencionales, su implementación, solo requiere una bomba de agua y no requiere sistema de compresión de aire y tanque de saturación.

El tamaño de burbuja generado por el inyector CARMIN, es comparable con el producido por un sistema DAF, posible inyección de diferentes tipos de gases (a diferencia de los procesos DAF), tamaño de burbuja fácilmente ajustable (normalmente entre 10 µm y 100 µm) que permite un control optimizado y simple del proceso y la producción de microburbujas no se produce burbuja milimétrica lo que maximiza el tiempo de contacto y la superficie de intercambio entre el líquido y el gas [94],

2.2.6 Brecha de investigación

La revisión permitió identificar la importancia del tamaño de las microburbujas aplicadas a los sistemas de tratamiento de agua por flotación y las ventajas de aplicación de micro y nano burbujas. Se identifica que son pocos los estudios de tratamiento de aguas residuales del sector alimenticio que abordan la eficiencia de remoción de SS y O&G desde la perspectiva del tamaño de la microburbuja aplicada como sucede en el sector minero. En ese sentido se identifica que se requiere más investigación en aplicaciones industriales de tratamiento de aguas residuales con sistemas de generación de micro y nano burbujas basados en boquillas o inyectores que

aprovechan la cavitación hidrodinámica como estrategia de generación y que a su vez, de forma simple permitan controlar el tamaño de las burbujas generadas.

De igual forma, con la revisión permite concluir que existe un potencial de aplicación industrial en el campo del procesamiento de aguas residuales de la industria avícola para inyectores de microburbujas de cavitación hidrodinámica, que permitiría sustituir a los sistemas DAF convencionales, ya que la configuración del generador de microburbujas de este tipo es simple, es flexible y no requiere la construcción ni el mantenimiento de recipientes presurizados, representan un consumo energético menor en cuanto su operación y es altamente escalable.

La hipótesis alternativa de esta investigación es que, al igual que en los casos reportados en la industria minera, el tamaño de las microburbujas generadas por el inyector tiene incidencia en la remoción de sólidos suspendidos y O&G en las aguas residuales de la industria avícola. Por lo tanto, el usar un inyector de cavitación hidrodinámica que permita un fácil ajuste del tamaño de la microburbuja generada tendría una oportunidad de innovación en este campo. Para tal fin, el presente estudio se enfoca en evaluar la viabilidad de tal propuesta.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

En este trabajo de investigación se construyó un prototipo de unidad de flotación a escala de laboratorio empleando un inyector de microburbujas de cavitación hidrodinámica como elemento principal para experimentar los efectos de la variabilidad del tamaño de las burbujas generadas y evaluar sus efectos en la eficiencia de eliminación de TSS y O&G. Para este fin se empleó una solución artificial que emula algunas de las propiedades fisicoquímicas de las aguas residuales de las plantas de procesamiento de aves, y de esta forma determinar su potencial como sistema de generación de microburbujas para este campo de aplicación.

El enfoque de esta investigación es del tipo evaluativa, con el fin de establecer la correlación existente entre el tamaño de microburbujas generado con el inyector y la remoción de sólidos suspendidos y O&G. Si esa correlación existe, sería viable alcanzar altos niveles de eliminación de TSS y O&G en el tratamiento de aguas residuales de la industria avícola utilizando el sistema propuesto. Para confirmar la hipótesis de investigación se deben seguir una serie de pasos conducentes a poder establecer la evaluación y responder a la pregunta de investigación.

La Figura 8, presenta el diagrama de flujo de los métodos y actividades desarrollado en esta investigación.

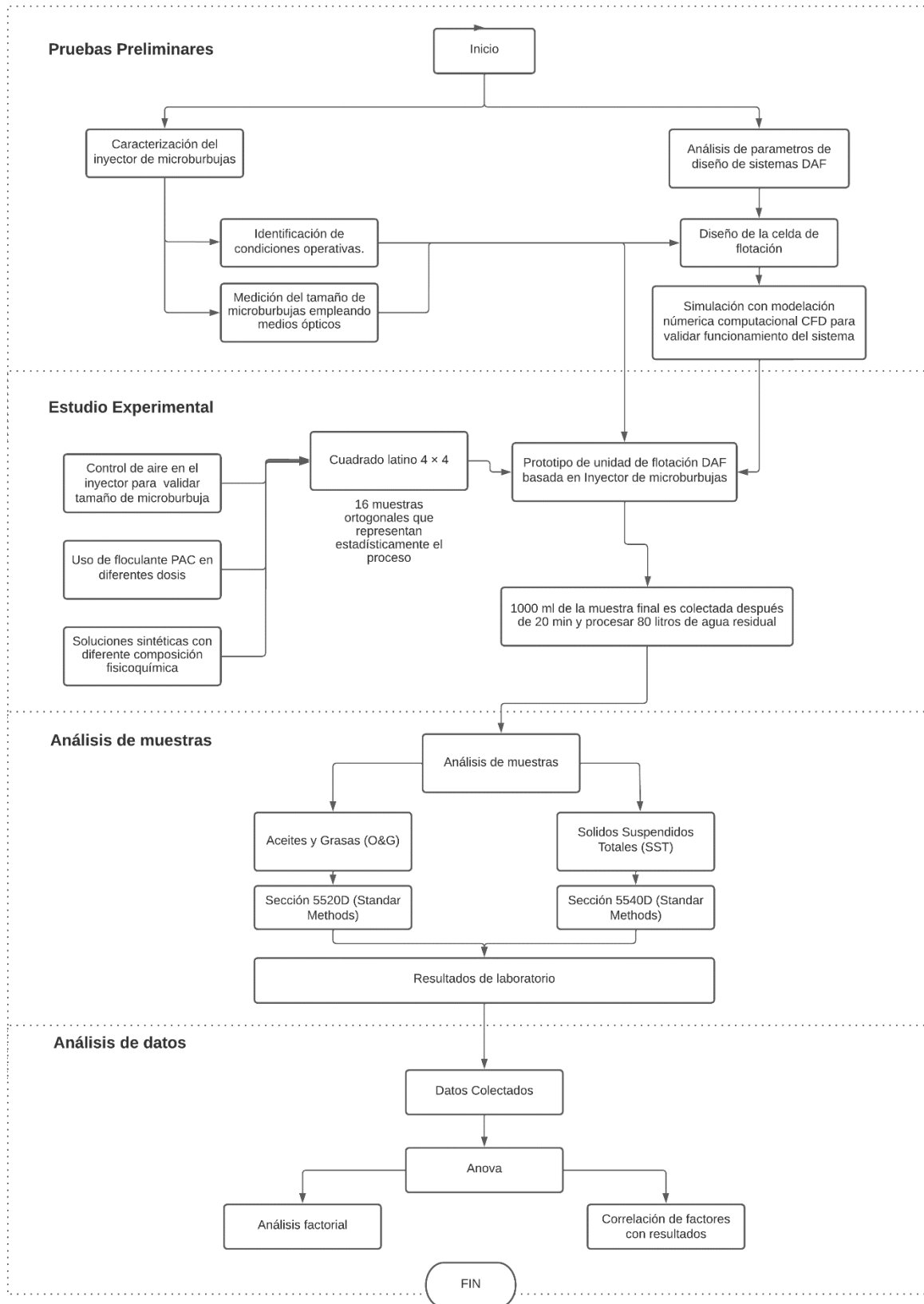


Figura 8, Secuencia metodología desarrollada en el proyecto de investigación.

3.1 Caracterización del inyector de microburbujas.

El diseño de la unidad de flotación se basa en un inyector de microburbujas CARMIN D2 PMMA Single Assembly, fabricado por YLEC Consultants [100]. Este inyector genera microburbujas por cavitación hidrodinámica, similar a un tubo Venturi, que consta de una boquilla de líquido, una cámara de succión, un tubo de mezcla y una sección divergente. El líquido se bombea al sistema a alta velocidad a través de la boquilla de inyección de agua (water input) y la fase gaseosa se aspira a la cámara de succión por la boquilla de aire. Las dos fases se mezclan en la cámara y posteriormente el flujo burbujeante se libera a presión atmosférica en la salida, ver Figura 9. El efecto de cavitación se genera cuando la presión en la boquilla de inyección de agua es inferior a la presión de vapor a medida que el fluido fluye a través de la cámara de succión, se produce una rápida transición de fase de líquido a vapor [101], [102].

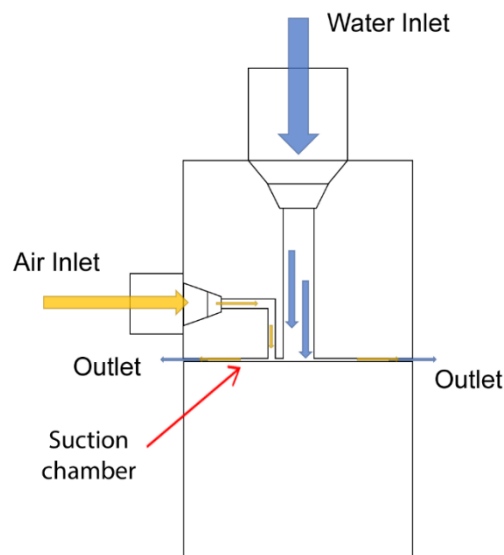


Figura 9, Representación esquemática del inyector de microburbujas CARMIN D2 Single Assembly.

3.1.1 Medición del tamaño de microburbuja generado.

Para realizar la caracterización del inyector, se realizaron mediciones del tamaño de microburbuja generado controlando el flujo de aire aplicado al inyector, manteniendo el caudal y presión de agua constante tal como se describe en la Figura 10, las condiciones de operación del sistema se presentan en la Tabla 10. Se empleó un microscopio portable de referencia Carson MicroFlip MP250, con un zoom óptico de 200 x y lente asférica para garantizar simetría de las imágenes, adaptado a un celular Motorola G6 Plus con cámara de 12 Megapíxeles, se utilizó un portaobjetos de calibración de microscopio fabricado Lakelab para identificar el tamaño de los píxeles empleando un punto de referencia de 70 μm , y el sistema óptico se montó por encima de la superficie del tanque para obtener imágenes de las microburbujas (ver Figura 10). La bomba de agua utilizada es una bomba de diafragma de referencia OMMO - 60W (4,5L/Min, 85

PSI) y para el flujo de aire se utilizó el compresor de tanque de aire OPHIR de referencia AC090 (1/6HP) con caudalímetro analógico, este compresor se caracteriza por su capacidad de generar aire seco libre de humedad y grasa.

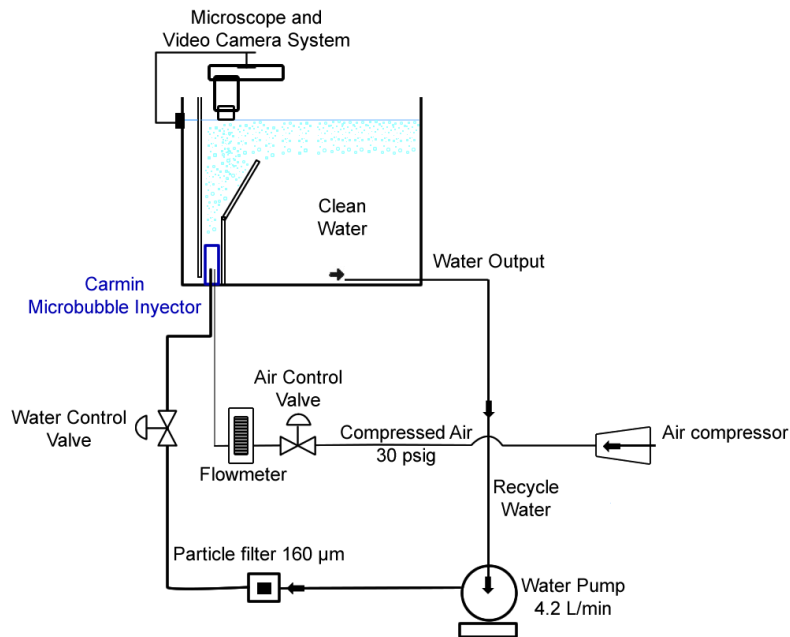


Figura 10, Esquema del montaje experimental para identificar las condiciones operativas del inyector de microburbujas.

Tabla 10, Parámetros operativos de la celda de flotación obtenidos con la caracterización del inyector.

Descripción	Valor	Tipo de variable
Bomba de agua	4±2 l/min	Fijo
Presión de la línea de agua	500±27 kPa (72.5±4 psi)	Fijo
Flujo de la línea de agua (inyector input)	1.5±2 l/min	Fijo
Presión de la línea de aire	207±13 kPa (30±2 psi)	Fijo
Flujo de aire (inyector input)	5±1 ml/min to 40±1 ml/min	Variable

Se diseñó un algoritmo para calcular el diámetro medio de las burbujas generadas en Matlab® R2020a (Mathworks, Inc., Natick, MA, USA) para el procesamiento de imágenes el cual está basado en segmentación. Inicialmente se realizó ajuste del histograma de cada una de las imágenes obtenidas, posteriormente se eliminaron píxeles huérfanos mediante técnicas de dilatación y erosión. Posteriormente se enmascara la región de observación del microscopio para conservar solo la información de interés, se aplicó segmentación por umbral para eliminar el fondo de la imagen y dejar la información asociada a las microburbujas. Se realizó relleno de objetos y se empleó la función `regiónprops` del toolbox de procesamiento de imágenes para medir los objetos identificados en la imagen y ubicar su centroide. La Figura 11, presenta esquemáticamente el proceso de detección de imágenes realizada paso a paso con el algoritmo diseñado. La Figura 12, presenta fotografías del montaje experimental empleado para la

adquisición de imágenes y la Figura 13 se presenta una de las imágenes procesadas con el algoritmo. El código del algoritmo empleado se presenta en el anexo 1.

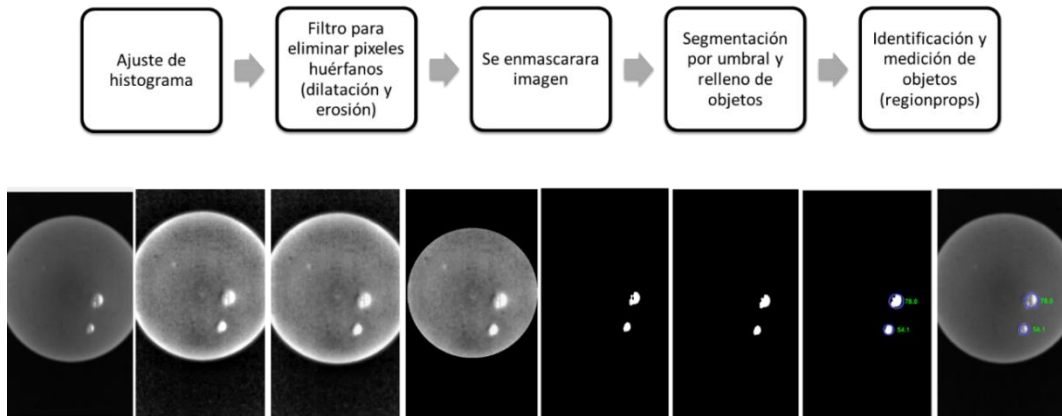


Figura 11, Representación esquemática del proceso de imágenes para medición del tamaño de microburbuja.



Figura 12, fotografías del montaje experimental del proceso de adquisición de imágenes.

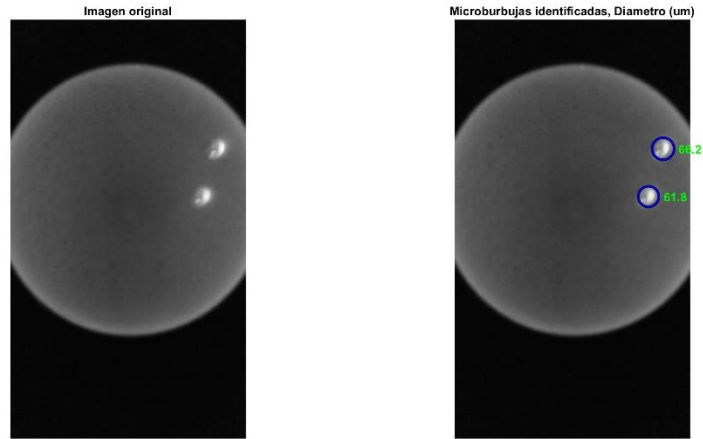


Figura 13, Resultado del procesamiento digital de imágenes para medir el tamaño de las burbujas. (A) Imagen original, (B) Imagen con la microburbuja identificada y medida.

El proceso de calibración del tamaño de píxel empleando el portaobjetos de calibración ver Figura 14, se obtuvieron imágenes del punto de referencia de 70 μm usando el zoom óptico del microscopio a 200x, auto foco de la imagen desactivado e ISO 400 (Figura 15, Imágenes del punto de referencia de 70 μm para calibración del tamaño de píxel. Figura 15). Posteriormente se obtuvieron imágenes del punto de referencia de 150 μm para validar el algoritmo diseñado corroborando la medida de esta referencia (Figura 16). Una de las características del microscopio empleado es el uso de lentes esféricas para no deformar la imagen y garantizar la simetría de la imagen obtenida. Así mismo, presentó una distancia focal reducida, razón por la cual las imágenes obtenidas permiten ver a detalle una cantidad limitada de microburbujas y el fondo fuera de la zona de foco no es visible en la imagen. Ver Figura 13.



Figura 14, portaobjetos de calibración de micrómetros para microscopio marca Lakelab. Se empleó el punto de referencia de 0.07mm y 0.15mm.

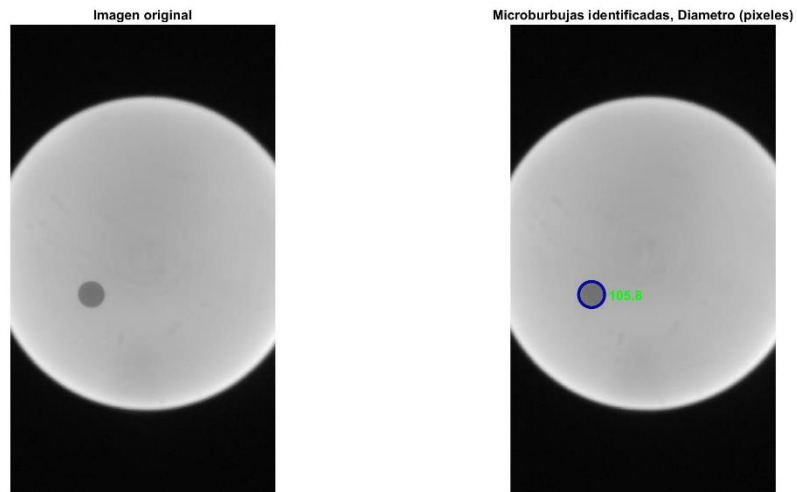


Figura 15, Imágenes del punto de referencia de 70 μm para calibración del tamaño de píxel.

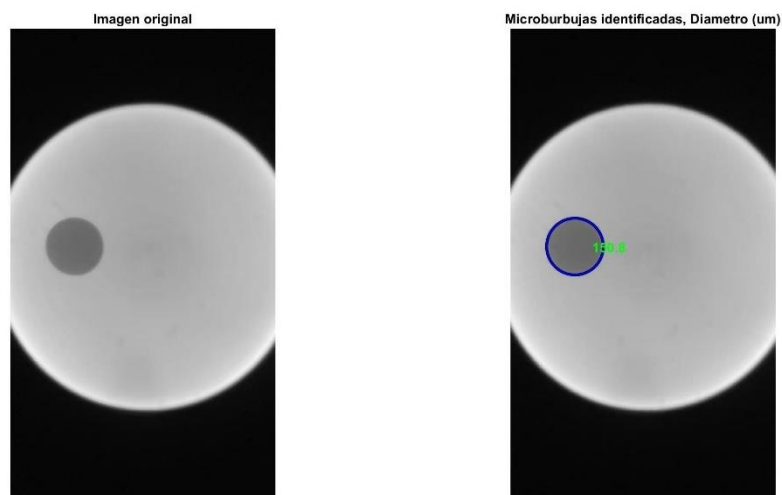


Figura 16, Validación de la calibración con fotografía de punto de referencia de 150 μm .

3.2 Diseño de celda de flotación

El diseño de la celda de flotación estudiado en este trabajo se basó en la geometría propuesta por Rocha e Silva et al [103] y Rodrigues et al [104]. Los parámetros operativos considerados para el diseño se presentan en la Tabla 11. La tasa de reciclaje se estableció en 50%, valor que puede ser considerado alto comparado con sistemas DAF. Sin embargo, teniendo en cuenta que el inyector funciona principalmente con agua a presión se asignó un mayor valor para este parámetro. Los cálculos asociados a la geometría y forma de la celda de flotación se realizaron empleando las ecuaciones presentadas en la Tabla 12, siguiendo los trabajos en [22], [105] y

[58]. Se consideraron los valores típicos de referencia para la carga hidráulica y tiempo de retención hidráulica de sistemas DAF convencionales.

Tabla 11, Parámetros de diseño de la celda de flotación: Celda cuadrada acorde a diseños de sistemas DAF convencionales.

Descripción	Valor	Tipo de parámetro
Flujo de agua (Inyector input):	1.5 l/min	Parámetros específicos de diseño de la unidad propuesta.
Flujo de entrada del efluente (Agua a tratar)	3 l/min	
Tasa de reciclaje	50 %	
Tiempo de retención hidráulica (min):	10-20 min	Para metros de diseño convencionales de unidades DAF.
Carga hidráulica (zona de contacto):	20 -100 m/h	
Carga hidráulica (zona de separación):	3 – 15 m/h	
División zona contacto de zona de separación (Baffle):	70% Altura 60° Inclinación	

Tabla 12, Ecuaciones para el diseño de celda de flotación.

Ecuación	Descripción de las variables
$v_{nom-hl} = \frac{Q}{A}$	Tasa de carga hidráulica (Vnom-hl) Q: Caudal de agua tratado A: superficie bruta del tanque
$R = \frac{Q_r}{Q}$	Tasa de reciclaje (R) Q_r : flujo o caudal de agua reciclada
$v_b \geq v_{sz-hl} = \frac{Q + Q_r}{A_{sz}}$ $v_{fb} \geq v_{sz-hl} = \frac{Q + Q_r}{A_{sz}}$	Tasa de carga hidráulica en la zona de separación (Vsz-hl) v_b : Velocidad de ascenso de las burbujas. v_{fb} : Velocidad de ascenso de los flocúlos A_{sz} : Superficie de la zona de separación.
$V_D = Q\theta_f$	Volumen de diseño (VD) Q: Caudal de agua tratado θ_f : Tiempo mínimo de retención de la celda de flotación. (min).

Se realizaron los cálculos numéricos integrando las ecuaciones y modelos de referencia mencionadas teniendo en cuenta los parámetros de diseño establecidos a partir de la caracterización del inyector. El plano a detalle de de la celda de flotación se presenta en la Figura 17.

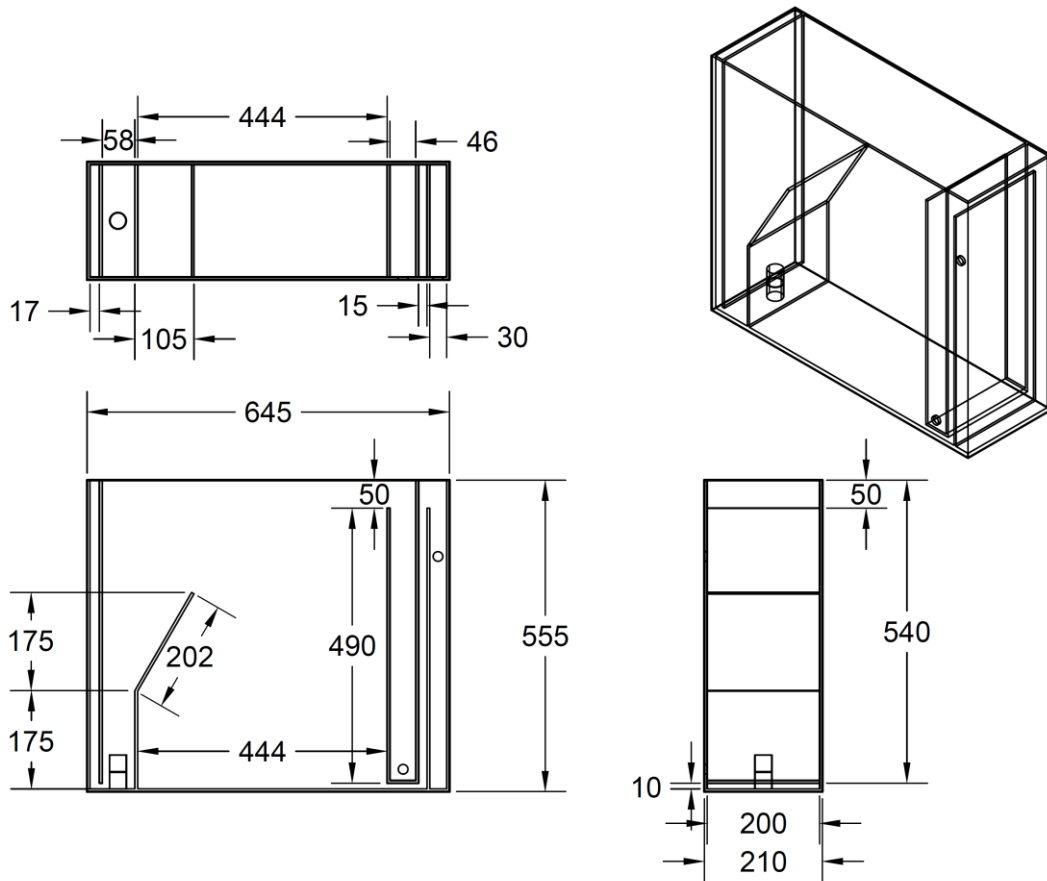


Figura 17, plano detallado de la celda de flotación (unidad de medida mm).

3.3 Simulación con modelación numérica computacional CFD.

Como herramienta de diseño y validación del tanque de flotación, se empleó dinámica de fluidos computacional usando el software Ansys Fluent 2020 R2 para estudiar la respuesta del sistema. La geometría de la celda de flotación se construyó usando el software Ansys Spapce Claim 2020 R2. Estas pruebas permitieron ajustar las dimensiones de la celda en cuanto largo, ancho y profundidad, así como el diseño de la sección que divide la zona de contacto de la zona de separación (Baffle) buscando garantizar las condiciones de diseño en cuanto a carga hidráulica de la zona de contacto y la de la zona de separación y tiempos de retención hidráulica.

La Figura 18, presenta el diseño final de la celda, tiene 645 mm de largo, 200 mm de ancho y 555 mm de alto con 45 litros de capacidad. La malla computacional se subdividió para obtener 66791 elementos en el modelo 2D y 491679 elementos para el modelo 3D. La magnitud de la velocidad y la concentración de volumen de aire y agua en las entradas se calcularon de acuerdo con los datos operativos experimentales y las secciones transversales los cuales se presentan en la Tabla

13. Las ecuaciones que gobiernan el flujo de dos fases se resuelven mediante los métodos de volumen finito (FVM) [106].

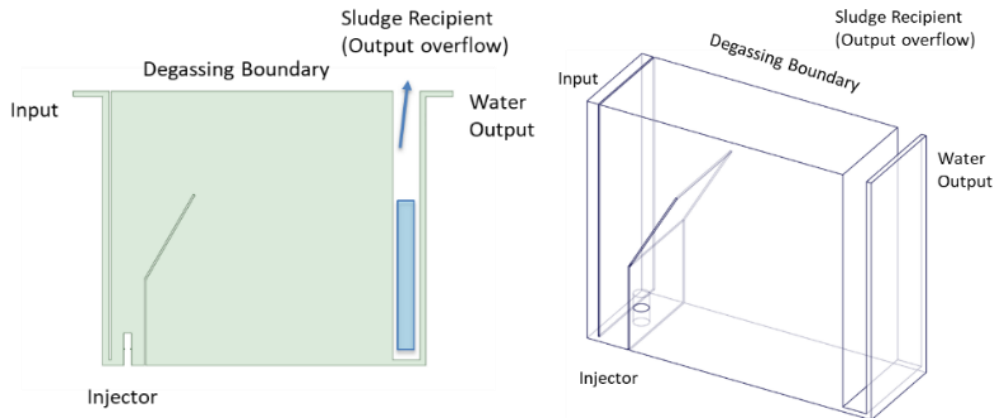


Figura 18, Diseño de la celda de flotación en 2D y 3D.

El agua se estableció como fase primaria y microburbujas de aire de 50 μm como fase secundaria. Los modelos empleados para resolver numéricamente el sistema y los órdenes de discretización empleados se detallan en la Tabla 13 y Tabla 14. Estos valores fueron seleccionados teniendo en cuenta investigaciones en CFD de tanques de flotación similares [104], [106]–[110].

Tabla 13, Datos de operación y condiciones de frontera.

variable	Boundary condition	
Inlet - water	Velocity inlet	0.020833333 m/s
Inlet – water Area		0.0024 m ²
Recycle inlet - water and air	Velocity inlet	0.947350852 m/s
Recycle inlet - area		2.63894E-05 m ²
Recycle inlet - ratio of total air	-	0.026
Outlets	Pressure outlet	-
Walls and baffles	Wall	-
Surface of flotation tank	Degassing	-
Bubble diameter	-	50 μm

Tabla 14, Modelos y parámetros numéricos usados en la modelación numérica computacional.

Information	Adopted condition
<i>Multiphase model</i>	Euler (Denominación establecida por software / Modelo no homogéneo)
<i>Turbulence model</i>	κ - ϵ realizable
<i>Drag Model</i>	Universal drag
<i>Gravity</i>	9.81 m/s ²
<i>Surface tension</i>	0.072 N/m
<i>Inhomogeneous discrete method</i>	2nd order upwind
<i>Discretization scheme for the volume fraction equation</i>	1st Order Upwind
<i>Discretization scheme for the turbulent kinetic energy equation</i>	2nd order upwind
<i>Discretization scheme for the turbulence dissipation rate equation</i>	2nd order upwind

<i>Average time step Total</i>	1/3 s
<i>simulated flow time</i>	600 s

Se especificó una condición de límite de desgasificación para la superficie agua-aire en la parte superior de la celda de flotación. Respecto a las superficies de las paredes y los deflectores se trataron como paredes sin deslizamiento, donde la constante de rugosidad y la altura de rugosidad en las paredes sin deslizamiento se establecieron como 0.5 y 0.0, respectivamente [111].

3.3.1 Análisis del patrón de flujo de agua.

El patrón de flujo de agua identificado en la simulación es similar presentado en los resultados de [104], [109], [110] y [112]. Se identifica existencia de flujo rotacional en la zona de contacto generado por la geometría de la sección interna de la celda. La presencia de flujos rotacionales en la zona de contacto se ha explorado mediante la simulación CFD de los tanques de flotación [113]. Los vectores de flujo se mueven en la dirección de la zona de desbordamiento del lodo beneficiando la remoción de contaminantes y las velocidades registradas son acordes a las velocidades de flujo del efluente y del inyector, como se aprecia en la Figura 19.

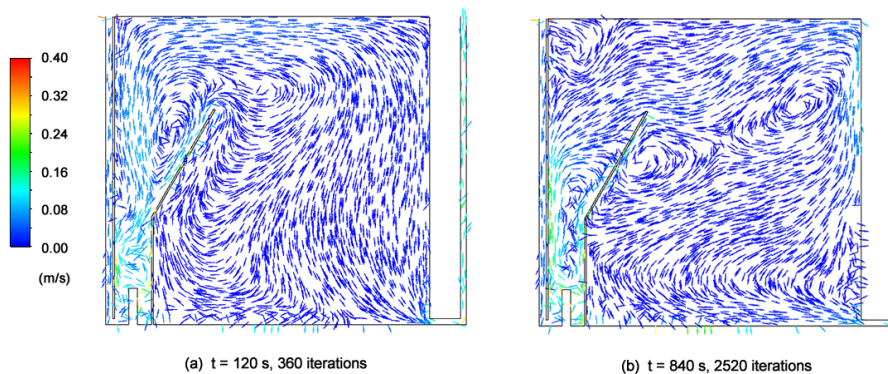


Figura 19, Perfiles de velocidad de la fase líquida.

3.3.2 Análisis del patrón de flujo dinámico de aire.

Los resultados de las simulaciones permitieron identificar que los vectores de velocidad de las fases presentaban flujo estratificado horizontal cerca de la superficie del tanque y flujo vertical de "tapón" dentro del tanque similar a lo descrito por Rodrigues en su estudio [114]. La hidrodinámica (patrones de flujo y velocidades) del tanque de flotación es de gran importancia ya que afecta significativamente la eficiencia de remoción del sistema. [115]. El flujo estratificado es muy importante en el proceso de separación, la presencia de microburbujas en superficie aumenta la capacidad de eliminación de flóculos debido a que el contacto de estos

con las microburbujas favorecer su flotación. En la Figura 20 se identifican los perfiles de velocidad de las microburbujas de aire, se identifica un comportamiento similar al registrado en los perfiles de velocidad de la fase líquida, los vectores de flujo se mueven en la dirección de la zona de desbordamiento del lodo beneficiando la remoción de contaminantes.

Es importante resaltar que la condición de desgasificación establecida en simulación es una condición fundamental ya que representa una condición real del sistema asociada a la extracción de aire en la superficie [109]–[111].

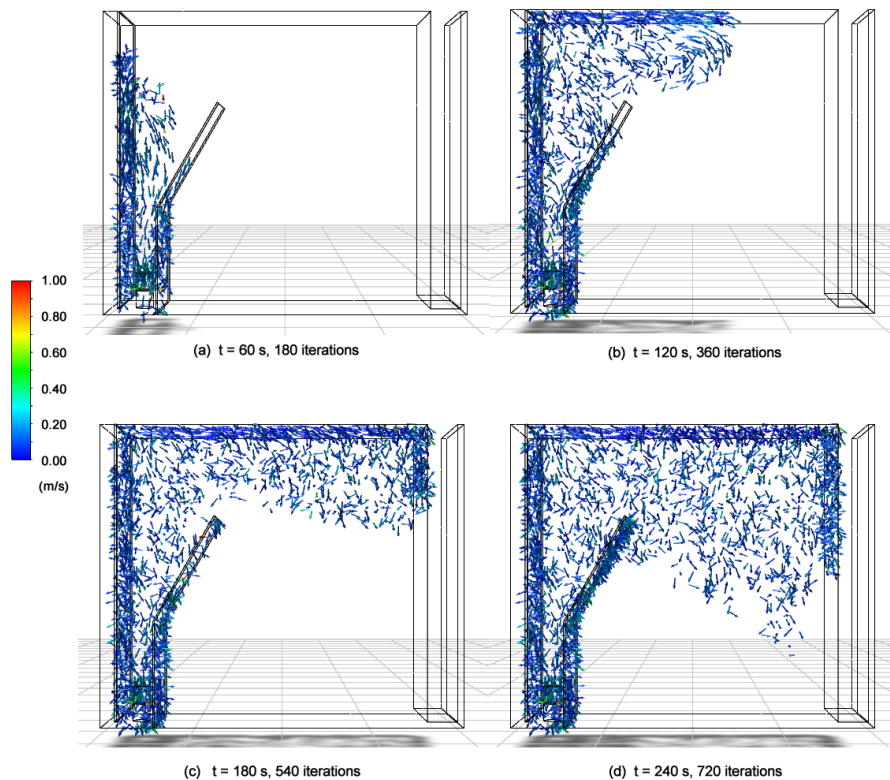


Figura 20, perfiles de velocidad de las microburbujas de aire obtenidas en simulación 3D.

3.3.3 Análisis de fracción volumétrica de aire

El análisis de la fracción volumétrica de aire se empleó para identificar de forma intuitiva la zona con mayor presencia de microburbujas. El término vívido, "zona de aguas blancas", se ha empleado con frecuencia para describir el área donde la concentración de aire es superior a 1 ml / L [106]. La Figura 21, presenta los resultados obtenidos en simulación de la fracción en volumen de aire identificando una presencia significativa de la zona de aguas blancas en la celda de flotación, en la comparación con la imagen fotográfica del sistema durante las pruebas realizadas usando solo el inyector de microburbujas como entrada se logra identificar de forma visual la coherencia de los resultados obtenidos en simulación respecto al funcionamiento del equipo real en operación.

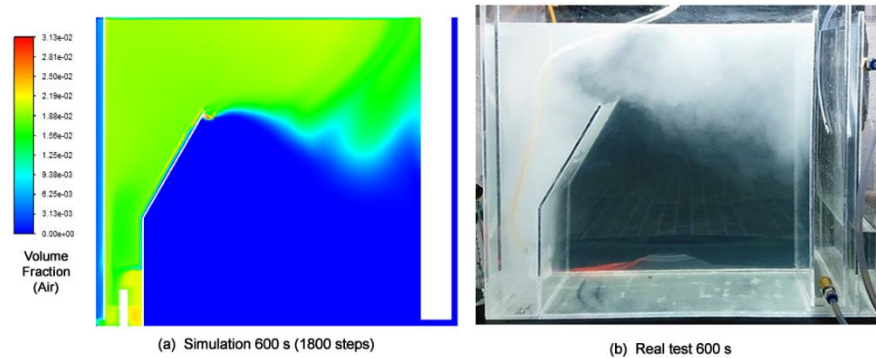


Figura 21, (a) fracción volumétrica de aire obtenida en simulación (b) fotografía obtenida en el tanque durante una de las pruebas de funcionamiento.

Para obtener estos resultados y diseño definitivo se realizaron múltiples validaciones en el software de modelamiento. Este proceso de validación se detalla en el anexo 2.

3.4 Estudio experimental

Se realizaron pruebas en la unidad de flotación para estudiar la eficacia de eliminación de TSS y O&G generando variaciones en las condiciones de funcionamiento del inyector, el uso de floculantes, y los cambios en el efluente a tratar. Se eligió un diseño experimental basado en un cuadrado latino para combinar estos factores y evaluar la respuesta del sistema. Para emular las aguas residuales vertidas por una planta de procesamiento avícola típica, se emplearon soluciones sintéticas que presentan propiedades químicas similares a la de este tipo de agua residual, su composición química se detalla en la sección 3.7.

3.4.1 Cuadrado latino y análisis de datos.

Los cuadrados latinos se utilizan ampliamente para diseñar experimentos en los que los factores de bloqueo y tratamiento tienen el mismo número de niveles [116]. Este diseño minimiza el número de muestras a procesar y optimiza la captura de datos y constituye una muestra estadísticamente representativa. Analizamos tres factores, el flujo de aire aplicado al inyector, la dosis de floculante y la solución sintética; cada factor tiene cuatro niveles. La solución sintética se incluyó entre los factores de control porque una alta carga de SS es característica de las aguas residuales de las plantas de procesamiento de aves, que contienen aceite y grasa, nitrógeno y fósforo. Estos contenidos varían de una planta a otra, dependiendo del proceso industrial y del agua consumida por pollo sacrificado [117].

La variación de la composición de las aguas residuales es fundamental para evaluar el sistema. Los niveles y los puntos centrales se dispusieron en bloques para aplicar el cuadrado latino, con posterior aleatorización realizada hasta completar 16 combinaciones ortogonales. Esta estrategia de muestreo se seleccionó porque minimizaría la perturbación de los factores perturbadores (comunes a las aplicaciones de tratamiento de aguas residuales, dada la alta variabilidad de las condiciones experimentales) de forma relativamente eficiente en cuanto al tamaño de la muestra [118]. Las ventajas de los diseños de cuadrado latino son que pueden

controlar mayores grados de variación que los diseños completamente aleatorizados o de bloques completos aleatorizados debido a la estratificación bidireccional. Los resultados presentan un valor medio menor al error cuadrático [119]. La Tabla 17 enumera las configuraciones de cuadrado latino empleadas en el diseño experimental, detallando cada factor componente.

Se utilizó el análisis de la varianza (ANOVA) y los gráficos factoriales de efectos principales para estudiar la respuesta del sistema y analizar los datos. Para este fin, se consideró un valor de prueba F con un nivel de confianza del 95% para determinar los factores significativos que afectan al proceso [119]. La Tabla 15 presenta el detalle de los factores y la Tabla 16 las variables dependientes estudiadas.

Tabla 15, Descripción de los factores.

Factor	Tipo	Niveles	Valores
Solución sintética	Fijo	4	1; 2; 3; 4
PAC (mg/L)	Fijo	4	0; 24; 60; 96
Flujo de aire	Fijo	4	Free; 20; 40; 60

Tabla 16, Descripción de variables dependientes.

Variable	Rango
% remoción O&G	0 – 100 %
% remoción TSS	0 – 100 %

Tabla 17, Diseño del cuadrado latino

	PAC (0 mg/L)	PAC (24 mg/L)	PAC (60 mg/L)	PAC (96 mg/L)
Solución sintética No1	Input Air flow (40 mL/min)	Input Air flow (60 mL/min)	Input Air flow (20 mL/min)	Input Air flow (free)
Solución sintética No2	Input Air flow (20 mL/min)	Input Air flow (free)	Input Air flow (40 mL/min)	Input Air flow (60 mL/min)
Solución sintética No3	Input Air flow (60 mL/min)	Input Air flow (40 mL/min)	Input Air flow (free)	Input Air flow (20 mL/min)
Solución sintética No4	Input Air flow (free)	Input Air flow (20 mL/min)	Input Air flow (60 mL/min)	Input Air flow (40 mL/min)

* PAC: Cloruro de poli aluminio.

3.5 Flujo de aire aplicado al inyector.

El flujo de aire aplicado al inyector se reguló en cuatro niveles de flujo de inyección para controlar el tamaño de las microburbujas. La configuración con el menor flujo de aire inyectado que hace funcionar el inyector en condiciones de presión negativa se denominó "free" y se representó como "flujo de aire de 0 mL/min" en el experimento. Para los niveles siguientes, se utilizó una fuente de aire presurizado que inyectaba aire a 20, 40 y 60 mL/min.

3.6 Tratamiento de coagulación-floculación empleado.

La eficiencia del sistema de flotación puede mejorarse mediante la adición de polímeros y otros floculantes para el ajuste del pH y la floculación de la materia particulada [7]. Estos coagulantes o floculantes pueden ser orgánicos o inorgánicos, incidiendo en aspectos como la cantidad de formación de lodos o el pH del agua a tratar [120]. En este trabajo se utilizó el cloruro de polialuminio (PAC) (DQI S.A., Colombia) como floculante en este estudio. El PAC tiene una mayor carga neta que las sales de aluminio monoméricas, siendo así más efectivo en la ruptura de la emulsión. Este tipo de polímeros, promueven la floculación al formar puentes entre las partículas coaguladas, formando flóculos que son más fáciles de separar de la fase acuosa [121].

Se seleccionó el PAC como coagulante por su amplia aplicación industrial en el tratamiento de aguas residuales procedentes del procesado avícola. Las concentraciones aplicadas en este estudio se seleccionaron en base a los estudios de Dassey [17] y Nardi et al. [27], [28], que identificaron las dosis óptimas de PAC (96 y 24 mg/l, respectivamente) para el tratamiento de este tipo de aguas residuales. También se utilizó la dosis media entre estos dos valores y se realizaron pruebas sin la adición de coagulante.

Es importante señalar que se ha determinado que los floculantes químicos, como el sulfato de aluminio y el cloruro férrico, así como la poliacrilamida, son muy eficaces. Sin embargo, son caros, no son biodegradables y pueden tener un efecto nocivo en el medio ambiente; además, se ha determinado que son tóxicos para los seres humanos. Por esta razón, los biofloculantes han recibido mucha atención últimamente y es importante considerar este tipo de polímeros en estudios posteriores [122].

3.7 Solución sintética de agua residual.

Para realizar una prueba global del sistema se emplearon soluciones sintéticas que presentan las propiedades químicas de las aguas residuales de una planta de sacrificio de aves, este tipo de agua residual es compleja de simular en la medida que está compuesta por gran cantidad de compuestos orgánicos e inorgánicos, sólidos suspendidos y grasas. Con el objetivo de tener un acercamiento de la respuesta del sistema a escala de laboratorio se fabricó una solución basada en la fórmula propuesta en [123] consistente en extracto de carne, glicerina, cloruro de amonio, cloruro de sodio, ortofosfato de hidrógeno potásico, cloruro de calcio, sulfato de magnesio. Adicionalmente, se consideró la fórmula propuesta para aguas residual sintética de Pinheiro [124] y teniendo en cuenta que para el proyecto es de interés validar la respuesta ante cambios en las propiedades fisicoquímicas de las aguas residuales se consideró generar cuatro soluciones diferentes variando la concentración de los elementos químicos que conforman la solución sintética similar a lo propuesto por Sirianuntapiboon en su estudio [125]. Como fuente de sólidos suspendidos se empleó bentonita y como fuente de grasas, aceite vegetal. La composición de las soluciones sintéticas se presenta en la Tabla 18.

Tabla 18, Composición química de las soluciones sintéticas.

Componente	Cantidad en mg por L de agua destilada.			
	Sol. sintética No 1	Sol. sintética No 2	Sol. sintética No 3	Sol. sintética No 4
Extracto de carne	600	800	1000	1200
glicerina (C ₃ H ₈ O ₃)	400	600	800	1000
Glucosa	200	300	400	500
Cloruro de amonio (NH ₄ Cl)	120	240	360	480
Cloruro de sodio (NaCl),	20	35	50	65
Cloruro de Hierro (FeCl ₂)	0.5	0.75	1	1.25
Ortofosfato de dihidrógeno potásico (KH ₂ PO ₄)	30	40	50	60
Cloruro de calcio (CaCl ₂)	24	30	36	42
Sulfato de magnesio (MgSO ₄ -7H ₂ O)	6	12	18	24
Bicarbonato de sodio (NaHCO ₃)	70	140	210	280
Bentonita	700	900	1100	1200
Aceite de soya	110	220	330	440
Diammonium phosphate (DAP)	0	150	0	300

Se seleccionó como agente coagulante y floculante el Policloruro de Aluminio (PAC) teniendo en cuenta su alta aplicación a nivel industrial, las concentraciones aplicadas en este estudio se seleccionaron teniendo en cuenta las investigaciones de Nardy y Dassey [17], [28] los cuales identificaron las dosis óptimas para el tratamiento de aguas residuales de plantas de sacrificio de aves. Para controlar el tamaño de microburbujas aplicado se reguló el flujo de aire aplicado al inyector en cuatro presiones de inyección: succión atmosférica, 20, 40 y 60 mLPM.

3.8 Recolección y análisis de muestras

Las muestras se recogieron en el puerto de salida del agua tratada de la unidad de flotación. Se utilizaron botellas de vidrio de 1 L preesterilizadas para la recolección y remisión al laboratorio. Se tomo un litro de agua tratada después de 20 minutos de funcionamiento del sistema, procesando 80 L de agua residual en total utilizando la unidad prototipo a escala de laboratorio. Las variables de estudio fueron los contenidos de O&G y TSS.

Los análisis también se realizaron en el laboratorio certificado de la corporación autónoma regional del Cauca en concordancia con los métodos estándar globales [126], secciones 5520 D para O&G y 2540 D TSS.

CAPÍTULO 4: PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en cada actividad de la secuencia metodológica presentada en el capítulo 3. Inicialmente se presenta los resultados obtenidos asociados a la caracterización del inyector de microburbujas, posteriormente se presentan los resultados obtenidos en las 16 corridas realizadas conforme la configuración de cuadrado latino y se discuten los resultados.

4.1 Resultados obtenidos asociados al tamaño de las microburbujas generadas por el inyector

El análisis estadístico se realizó con ANOVA de una vía utilizando MATLAB® para analizar la variación del tamaño de la microburbuja generada por el inyector al modificar la tasa de flujo de aire aplicada. Para analizar la variación del tamaño de la microburbuja generada se procesaron grupos conformado por 100 fotografías de microburbujas obtenidas para cada configuración. Como hipótesis nula, se asumió que el flujo de aire no modifica el tamaño de la microburbuja generada y que todas las medias eran iguales. También se estableció la hipótesis alternativa de que no todas las medias eran iguales, con un nivel de significación $\alpha = 0,05$. Las varianzas no se asumieron iguales para este análisis. La Figura 22 presenta las distribuciones de los valores obtenidos para las mediciones de los diámetros de las burbujas generadas. Se identifica que el tamaño de las burbujas aumentó bajo condiciones de mayor caudal de aire aplicado al inyector. La zona central de la caja azul presenta la mediana y los percentiles 25 y 75. El pequeño valor p obtenido (1.92×10^{-45}) indica que las diferencias entre las medias de las columnas son significativas. La hipótesis nula no es válida. Por lo cual se puede confirmar que el caudal de aire aplicado al inyector modifica el tamaño medio de las burbujas generadas. El tamaño de las burbujas se incrementa con la aplicación de un mayor caudal de aire al inyector.

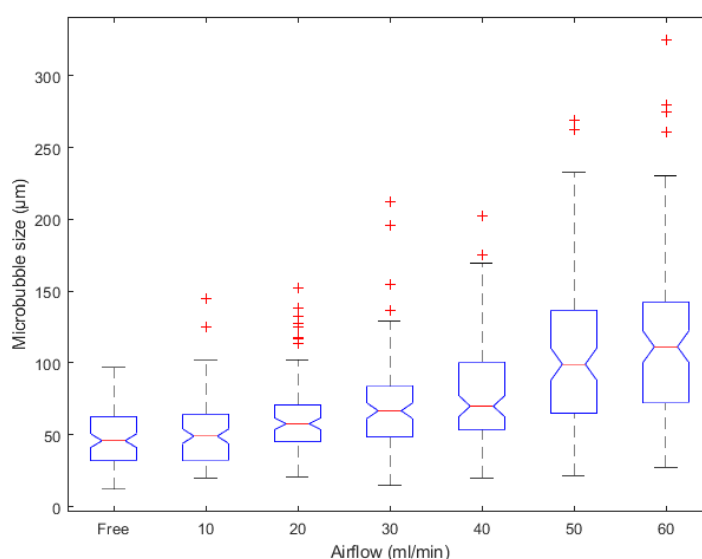


Figura 22, Diagrama de cajas del tamaño de burbujas acorde a los cambios del flujo de aire aplicado al inyector.

Es importante indicar que estos resultados se obtuvieron usando agua potable como fluido aplicado al inyector de microburbujas, de igual forma la celda de flotación se encontraba con agua potable en su interior con la finalidad de no generar interferencias en el proceso de medición mediante adquisición de imágenes.

4.2 Resultados obtenidos en pruebas con soluciones sintéticas.

Se realizaron 16 pruebas con solución sintética variando 3 factores: Fórmula de la solución, cantidad de floculante adicionado y aire aplicado al inyector. Usando un cuadrado latino se seleccionaron 16 configuraciones que presentan estadísticamente el experimento. La Figura 23 presenta fotografías obtenidas durante el desarrollo de estos ensayos y la Tabla 20 los resultados obtenidos.



Figura 23, Fotografías obtenidas durante las pruebas del sistema empleando soluciones sintéticas.

Tabla 19, Resultados de laboratorio obtenidos bajo las diferentes condiciones evaluadas.

Solución Sintética	PAC mg/L	flujo de aire (mL/min)	Tamaño medio de burbuja generado	TSS Inicial (mg/l)	TSS Final (mg/l)	O&G inicial (mg/l)	O&G Final (mg/l)	% remoción TSS	% remoción O&G
1	0	40	79,55	795	313	100	< 10,0	60,63%	90,00%
1	24	60	116,17	795	187	100	< 10,0	76,48%	90,00%
1	60	20	62,74	795	60	100	< 10,0	92,45%	90,00%
1	96	0	47,41	795	60	100	< 10,0	92,45%	90,00%
2	0	20	62,74	1200	330	190	22,4	72,50%	88,21%
2	24	0	47,41	1200	170	190	20,5	85,83%	89,21%
2	60	40	79,55	1200	380	190	45,6	68,33%	76,00%
2	96	60	116,17	1200	562	190	36,6	53,17%	80,74%
3	0	60	116,17	930	353	250	35,1	62,04%	85,96%
3	24	40	79,55	930	297	250	46,8	68,06%	81,28%
3	60	0	47,41	930	176	250	45,9	81,08%	81,64%
3	96	20	62,74	930	230	250	36,0	75,27%	85,60%
4	0	0	47,41	1560	657	400	106,0	57,88%	73,50%
4	24	20	62,74	1560	440	400	66,3	71,79%	83,42%
4	60	60	116,17	1560	687	400	141,0	55,96%	64,75%
4	96	40	79,55	1560	675	400	113,0	56,73%	71,75%

Para analizar estadísticamente los resultados se empleó en análisis de varianza ANOVA usando el modelo lineal general, y gráficas factoriales para evaluar los efectos principales de cada uno

de los factores en los resultados obtenidos. Se empleó el software Minitab (Minitab, 2022), que aplicó el modelo lineal general para evaluar los efectos principales de cada factor en los resultados. La Tabla 20 y la Tabla 21 ilustran los resultados obtenidos con el análisis anova, donde DF representa los grados de libertad de la fuente, y SS describe la suma de cuadrados ajustada para el modelo, que es la diferencia entre la suma total de cuadrados y la suma de cuadrados del error. MS indica los cuadrados medios ajustados, el valor F es la estadística de prueba utilizada para determinar si algún término presente en el modelo está asociado con la respuesta, y el valor p es una probabilidad que mide la evidencia contra la hipótesis nula. Las probabilidades más bajas proporcionan pruebas más sólidas contra la hipótesis nula. Los resultados revelaron que el modelo explica la variación de la respuesta. No todas las medias fueron iguales y se identifica un valor F mayor que la unidad en todos los casos, lo que demuestra la significación estadística de los datos, evidenciando un valor p inferior al nivel de significación $\alpha = 0,05$. Sólo se observó una desviación para el factor PAC en el análisis SS, identificándose un valor p superior. Por lo tanto, la respuesta de esta variable no es lineal. La eficiencia de eliminación de TSS y O&G fue significativamente menor cuando no se aplicó que cuando se aplicó. Este efecto se refleja en el gráfico de efectos principales para la eliminación de TSS, que muestra el valor medio de la respuesta de cada factor, calculado considerando un nivel de confianza del 95 %.

El tamaño medio de microburbuja generado representa el valor de la media obtenida durante las pruebas de caracterización del inyector con agua potable y no está asociado a una medición de tamaño de microburbuja realizado usando el agua residual sintética, esto debido a que las grasas y material en suspensión presente en el agua residual genera interferencias en el proceso de medición en la superficie del tanque de flotación.

Tabla 20, ANOVA - Modelo lineal general: % de remoción de TSS versus flujo de aire (ml/min), PAC (mg/l) y TSS inicial (mg/l).

Total Suspended Solids (TSS)					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Airflow (mL/min)	3	0,10297	0,034322	9,9	0,01
PAC (mg/L)	3	0,03781	0,012602	3,63	0,084
Initial TSS (mg/l)	3	0,07987	0,026624	7,68	0,018
Model summary					
S		R-sq		R-sq (adj)	R-sq.
0,0588936		91,38%		78,45%	38,71%

Tabla 21, ANOVA - Modelo lineal general: % de eliminación de O&G versus flujo de aire (ml/min), PAC (mg/l) y O&G inicial (mg/l).

Oil and Grease (O&G)					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Airflow (mL/min)	3	0,012704	0,004235	5,4	0,039
PAC (mg/L)	3	0,014125	0,004708	6	0,031
Initial O&G (mg/l)	3	0,05686	0,018953	24,15	0,001
Model summary					
S		R-sq		R-sq (adj)	R-sq.
0,0280149		94,67%		86,68%	62,12%

El análisis de los resultados revela que el modelo explica el 91,38 % y el 94,67 % de la variación de las eficiencias de eliminación de TSS y O&G, respectivamente. Asimismo, el bajo valor de *s* indica que el modelo describe con precisión la respuesta.

La Figura 24 y la Figura 25 permiten analizar los efectos y resultados esperados en los diferentes niveles de eliminación de TSS y O&G respectivamente, así como identificar las condiciones óptimas de funcionamiento del sistema. Es evidente una relación directa entre la carga de TSS de la muestra inicial y la eficiencia de eliminación, identificando mayores eficiencias de eliminación de TSS en aguas residuales con menor contenido de TSS. La ausencia del agente floculante PAC afecta significativamente a la eliminación de TSS y O&G. Asimismo, la dosis con mayor eficiencia de eliminación de TSS fue de 24 mg/L, lo que coincide con los resultados obtenidos por Nardi en un estudio realizado con un sistema DAF en aguas residuales de una planta de sacrificio de aves [127].

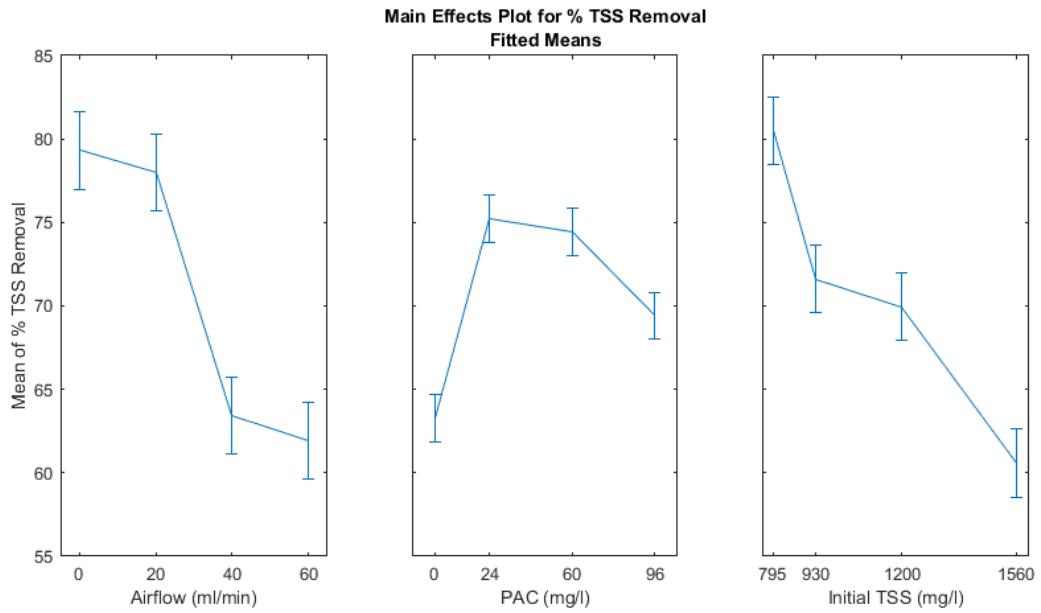


Figura 24, Gráfico de efectos principales que presenta la relación estadística entre los factores iniciales (TSS inicial, PAC y tamaño de microburbuja) con el valor medio de los porcentajes de eliminación de TSS.

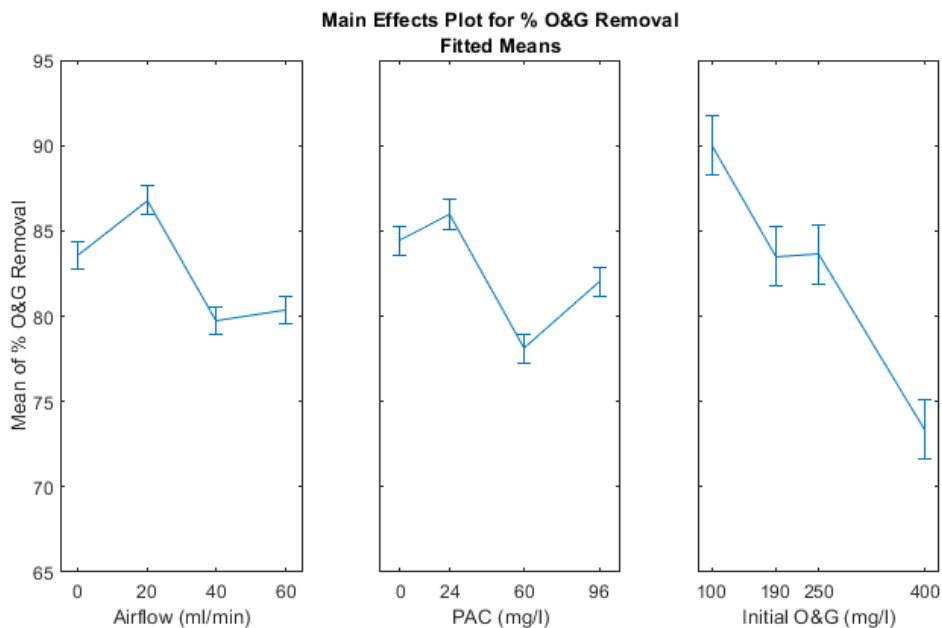


Figura 25, Gráfico de efectos principales que presenta la relación estadística entre los factores iniciales (O&G inicial, PAC y tamaño de microburbuja) con el valor medio de los porcentajes de eliminación de O&G.

En cuanto a la variable de control del inyector, la configuración que genera microburbujas más pequeñas (succión libre o atmosférica) elimina un mayor porcentaje de TSS. Las microburbujas más pequeñas proporcionan un mayor coeficiente de transferencia de masa que las burbujas más grandes [128]. La eficiencia de adhesión de ambos es máxima cuando el tamaño de partícula del flóculo es cercano al de la microburbuja, y los agregados flóculo-burbuja presentan una alta estabilidad, favoreciendo la eliminación de TSS por flotación [129]. Estudios recientes

demonstraron una mejora en la separación por flotación con la aplicación de microburbujas, y especialmente de nanoburbujas; un tamaño de burbuja reducido resultó en una mayor eficiencia del proceso debido a la mayor transferencia de masa a través de la interfaz gas-líquido [21], [54].

Se identificó una respuesta inesperada durante la eliminación de O&G. Se esperaba mayores eficiencias con microburbujas de menor tamaño. Sin embargo, se produjeron mayores eficiencias de eliminación con la configuración que generaba microburbujas marginalmente más grandes. Este resultado puede explicarse por la naturaleza y la composición de la solución sintética, en la que la fuente de grasas es un aceite de origen vegetal que tiende a formar gotas más grandes. Y lo que es más importante, las configuraciones que generan microburbujas más grandes tuvieron tasas de eliminación más bajas en ambos casos. Una mayor carga de TSS y O&G en las aguas residuales disminuye la eficacia de eliminación del sistema.

Este resultado se confirmó calculando los coeficientes de correlación de Pearson a los resultados presentados en la Figura 24 y la Figura 25, identificando una dependencia lineal inversa entre el flujo de aire aplicado y % de remoción de TSS y O&G, los coeficientes se presentan en la Tabla 22 en el cual se identifica una correlación inversa fuerte entre la variable flujo de aire aplicado y remoción de TSS y una correlación moderada para remoción de O&G.

Tabla 22, Coeficientes de correlación de Pearson calculados para la remoción de TSS y O&G

Variable	Coefficiente de Correlación de Pearson
Remoción de TSS	-0.931
Remoción de O&G	-0.663

Estos resultados permiten identificar lo siguiente:

- Los mayores niveles de remoción de SST se obtuvieron empleando la configuración que genera un menor tamaño de microburbuja generado, permitiendo validar lo reportado en la literatura [18]–[20]., en el cual manifiestan el impacto de las microburbujas de tamaño reducido en la eficiencia de remoción de partículas. Un resultado diferente se interpreta de la remoción de O&G en la medida que se obtuvieron mejores resultados con la configuración que genera microburbujas un poco más grandes. Esta situación se debe a que los flóculos y burbujas de grasa en suspensión son de un tamaño mayor favoreciendo la colisión con burbujas no tan reducidas favoreciendo su flotación.
- En todas las condiciones de operación, se obtuvieron mayores niveles de remoción usando el PAC como floculante, identificando que la dosis que mejores resultados presenta es de 24 mg/l indicada por Nardi et al. [27], [28]. Idealmente se realiza una prueba de jarras para validar la concentración de floculante adecuada para tipo de solución. Sin embargo, una de las limitaciones de este estudio era la no disponibilidad de equipos para realizar estas pruebas, razón por la cual se emplearon las dosis reportadas en la literatura.

- Cambios significativos en la concentración inicial de SST inciden significativamente en los niveles de remoción de sólidos suspendidos, si bien las soluciones iniciales de 795 mg/l y 930 mg/l presentan un porcentaje de remoción alta, este decrece significativamente en la medida que la carga de SST aumenta. Esto permite identificar limitaciones de tratamiento de SST en cuanto a esta variable se refiere.

Para validar este resultado asociado a SST, se realizaron pruebas complementarias realizando mediciones de SST empleando las 4 configuraciones de solución sintética siguiendo el procedimiento sólidos suspendidos totales en agua secados a 103 – 105 °c. del IDEAM [130], empleando filtros de microfibras de vidrio GF/C Whatman de 1.2µm tamaño de poro y 47 mm de diámetro, bomba de vacío, balanza analítica y horno a 100°C. Los resultados obtenidos con las cuatro soluciones sintéticas se presentan en la Figura 26.

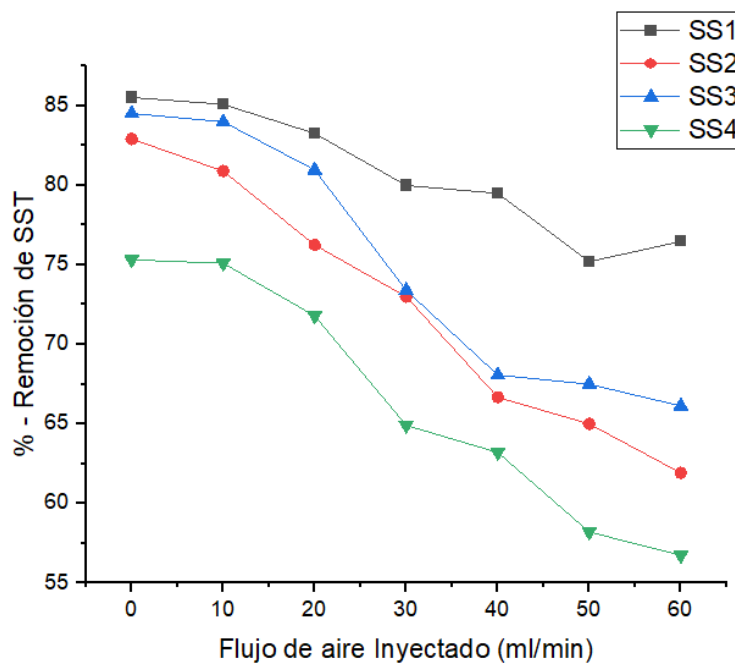


Figura 26, Porcentaje de remoción de TSS, empleando una dosis fija de 24mg/l de PAC.

En general, los niveles medios de eficiencia de eliminación de TSS superaron el 65 % con una carga mayor de partículas en suspensión (1.560 mg/l) y aumentaron hasta el 80 % con una carga menor (795 mg/l). Las eficiencias de eliminación de O&G fueron del 70 % y del 90 % bajo cargas grandes (400 mg/l) y pequeñas (100 mg/l), respectivamente. Esto revela el impacto de las características fisicoquímicas de las aguas residuales en la eficiencia de eliminación. Se identifica que aplicar flujo de aire hasta los 20 ml/min, permite obtener niveles de eficiencia superiores al 75% en las tres primeras soluciones sintéticas siendo esta una configuración que favorece la remoción de grasas. Validando la correcta descripción de los resultados usando el cuadrado latino. Esta validación no fue posible realizarla para O&G debido a limitaciones de acceso a pruebas de laboratorio de esta variable.

4.3 Impacto potencial de los resultados

El estudio realizado confirma que hay una correlación entre el flujo de aire y tamaño de microburbujas generado por el cavitador Carmin, y que hay una incidencia del flujo de aire aplicado al inyector en la remoción de TSS y O&G. Un estudio sobre sistemas de DAF a escala de laboratorio utilizando muestras reales de plantas de procesamiento de aves de corral informó de eficiencias de eliminación del 43 ± 15 % para TSS y del 49 ± 8 % para O&G [127]. Otro estudio informó de eficiencias de eliminación de O&G y TSS del 51 % y el 37 %, respectivamente [27]. Además, un estudio similar con un sistema DAF con coagulación/floculación integrada informó de eficiencias del $72 \pm 4,2$ % para O&G y del 84 ± 14 % para TSS [131]. Estos resultados son similares a los de este estudio. Sin embargo, el sistema propuesto basado en el inyector de microburbujas modifica el sistema DAF convencional de forma novedosa para un diseño más sencillo.

Un inyector de microburbujas de cavitación hidrodinámica, como el Carmin que actúa como fuente primaria de microburbujas, elimina la necesidad de un tanque de saturación, una bomba multifase de alta presión y un compresor de aire de alta presión, simplifica el funcionamiento del sistema DAF y reduce el consumo de energía y el coste de mantenimiento. La Figura 27, ilustra los componentes de un sistema DAF convencional en comparación con el diseño del prototipo de sistema de flotación con el inyector de microburbujas.

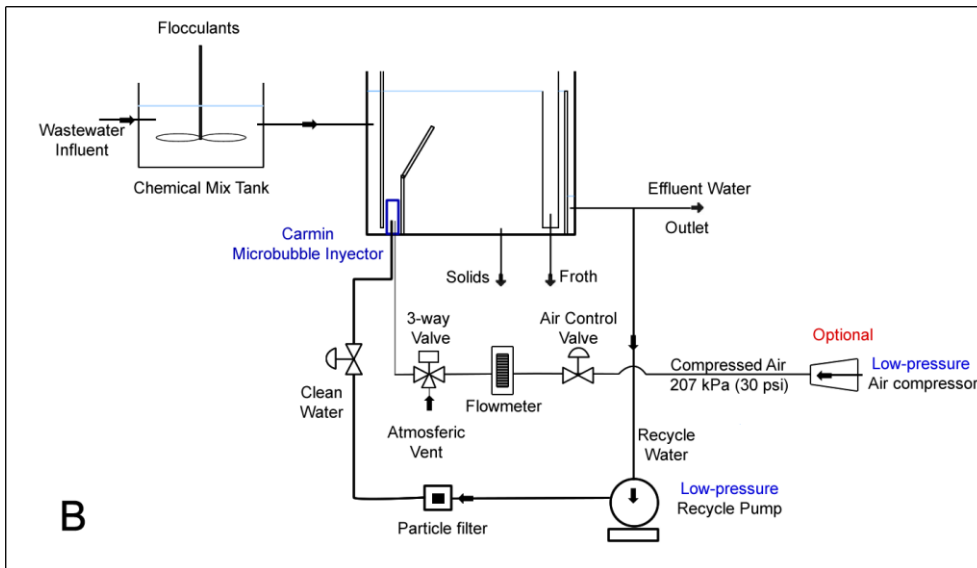
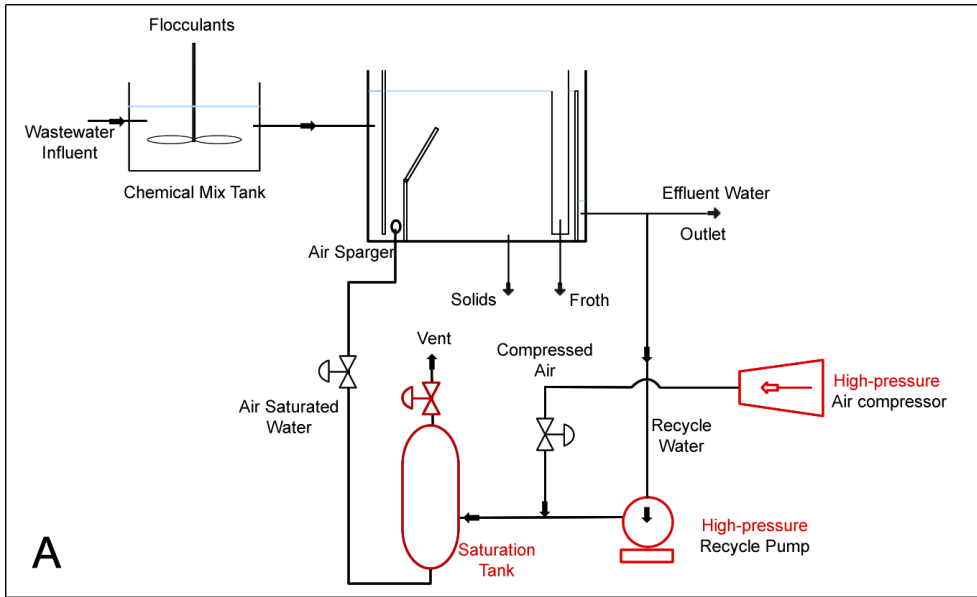


Figura 27, Diagrama de flujo del proceso de los sistemas de flotación: (A) Sistema DAF convencional, (B) Prototipo de sistema DAF modificado con un inyector de microburbujas Carmin.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

En el tratamiento de las aguas residuales del procesado de aves mediante sistemas de flotación como los sistemas DAF, es esencial controlar el tamaño de las microburbujas generadas debido a su impacto en la eficiencia de eliminación de TSS y O&G. El inyector CARMIN D2 PMMA Single Assembly cumple con esta propiedad. Sin embargo, hasta donde sabemos, no se ha utilizado para el tratamiento de aguas residuales de procesamiento avícola.

En este sentido, se investigó el potencial de este dispositivo como inyector de microburbujas en una unidad de flotación prototipo, evaluando el efecto del flujo de aire aplicado al inyector sobre el tamaño de las microburbujas y la eficiencia de eliminación de TSS y O&G de una solución artificial que emula algunas propiedades fisicoquímicas de estas aguas residuales. Los resultados obtenidos muestran que estos niveles de eficiencia son similares a los reportados en la literatura existente sobre sistemas DAF, validando la viabilidad del uso de este inyector como elemento primario de generación de microburbujas en el tratamiento de aguas residuales de procesamiento avícola, con la notable propiedad de un fácil ajuste del tamaño generado por las microburbujas con el control del flujo de aire aplicado al inyector.

Los niveles promedio de eficiencia de eliminación de sólidos suspendidos totales (TSS) superan el 65 % en condiciones de alta concentración de partículas en suspensión (1560 mg/l) y el 80 % en condiciones de menor concentración de sólidos en suspensión (795 mg/l). En términos de eliminación de aceite y grasa (O&G), se obtuvo un 70 % de eliminación de O&G con una concentración inicial alta de O&G (400 mg/l) y una eficiencia de eliminación del 90 % con una concentración baja de O&G (100 mg/l). Estos niveles de eficiencia son similares a los resultados reportados en la literatura para los sistemas DAF, lo que valida la factibilidad de usar este inyector para el tratamiento de aguas residuales de procesamiento de aves.

Los resultados evidencian una correlación estadística inversa fuerte entre el flujo de aire aplicado al inyector y % Remoción de TSS, así mismo se identificó una correlación estadística moderada entre el flujo de aire aplicado al inyector y remoción de O&G. Estos resultados asociados a las configuraciones del inyector que genera un menor tamaño de microbubujas indican que la remoción de TSS y O&G se ve favorecida bajo condiciones de menor tamaño de burbuja aplicado en la unidad de flotación.

Asimismo, los resultados demuestran la capacidad del sistema para suplir los tanques de saturación y los compresores de alta presión de las unidades DAF convencionales, simplificando el diseño y el funcionamiento de la unidad de flotación. Una de las limitaciones de los inyectores de microburbujas es su vulnerabilidad a los fallos debidos a la obstrucción de sus cavidades. Para solucionarlo, se recomienda utilizar sistemas de filtrado de partículas en sus entradas.

Los resultados obtenidos permitieron validar el éxito del diseño metodológico propuesto, en la medida que la celda de flotación se diseñó bajo condiciones operativas del inyector y parámetros establecidos para celdas de flotación DAF, empleando dinámica de fluidos computacional con ANSYS Fluent 2020 para su diseño y validación. El uso de modelos computacionales permitió predecir el funcionamiento mediante el análisis de los vectores de flujo de agua y aire del sistema permitiendo realizar un diseño de celda que favorece la distribución

superficial de las microburbujas en la celda de flotación en sentido a la zona de desbordamiento de grasas.

Los trabajos futuros deberán probar el prototipo utilizando muestras de aguas residuales de esta industria e incluir el análisis de parámetros adicionales como la demanda química de oxígeno (DQO), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), los nitratos, los fosfatos, la turbidez, la alcalinidad y el impacto de un mayor pH en el rendimiento del sistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] I. R. de Nardi, T. P. Fuzi, and V. Del Nery, "Performance evaluation and operating strategies of dissolved-air flotation system treating poultry slaughterhouse wastewater," *Resour Conserv Recycl*, vol. 52, no. 3, pp. 533–544, 2008, doi: 10.1016/j.resconrec.2007.06.005.
- [2] D. I. Massé and L. Masse, "Characterization of wastewater from hog slaughterhouses in Eastern Canada and evaluation of their in-plant wastewater treatment systems," *Canadian Biosystems Engineering / Le Genie des biosystems au Canada*, vol. 42, no. 3, pp. 139–146, 2000.
- [3] E. Sustainability, "Integrated Waste Management in India," in *Integrated Waste Management in India, Environmental Science and Engineering*, M. Prashanthi and R. Sundaram, Eds. Springer International, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-27228-3.
- [4] V. Del Nery, M. H. Z. Damianovic, E. Pozzi, I. R. De Nardi, V. E. A. Caldas, and E. C. Pires, "Long-term performance and operational strategies of a poultry slaughterhouse waste stabilization pond system in a tropical climate," *Resour Conserv Recycl*, vol. 71, pp. 7–14, 2013, doi: 10.1016/j.resconrec.2012.11.006.
- [5] B. R. Baker, R. Mohamed, A. Al-Gheethi, and H. A. Aziz, "Advanced technologies for poultry slaughterhouse wastewater treatment: A systematic review," *J Dispers Sci Technol*, vol. 2691, 2020, doi: 10.1080/01932691.2020.1721007.
- [6] S. Ansari, J. Alavi, and Z. M. Yaseen, "Performance of full-scale coagulation-flocculation/DAF as a pre-treatment technology for biodegradability enhancement of high strength wastepaper-recycling wastewater," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 25, no. 34, pp. 33978–33991, 2018, doi: 10.1007/s11356-018-3340-0.
- [7] C. F. Bustillo-Lecompte and M. Mehrvar, "Slaughterhouse wastewater characteristics, treatment, and management in the meat processing industry: A review on trends and advances," *J Environ Manage*, vol. 161, pp. 287–302, 2015, doi: 10.1016/j.jenvman.2015.07.008.
- [8] W. H. Zhang, I. Kaur, W. Zhang, J. Shen, and Y. Ni, "Recovery of manool from evaporator condensate by induced air flotation in a kraft pulp mill based integrated biorefinery," *Sep Purif Technol*, vol. 188, no. May, pp. 508–511, 2017, doi: 10.1016/j.seppur.2017.07.063.
- [9] J. Saththasivam, K. Loganathan, and S. Sarp, "Chemosphere An overview of oil – water separation using gas flotation systems," vol. 144, pp. 671–680, 2016.
- [10] R. Parmar and S. K. Majumder, "Microbubble generation and microbubble-aided transport process intensification-A state-of-the-art report," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 64, pp. 79–97, 2013, doi: 10.1016/j.cep.2012.12.002.

- [11] A. Azevedo, H. Oliveira, and J. Rubio, "Bulk nanobubbles in the mineral and environmental areas: Updating research and applications," *Adv Colloid Interface Sci*, vol. 271, p. 101992, 2019, doi: 10.1016/j.cis.2019.101992.
- [12] A. Agarwal, W. J. Ng, and Y. Liu, "Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment," *Chemosphere*, vol. 84, no. 9, pp. 1175–1180, 2011, doi: 10.1016/j.chemosphere.2011.05.054.
- [13] J. Rubio, M. L. Souza, and R. W. Smith, "Overview of flotation as a wastewater treatment technique," *Miner Eng*, vol. 15, pp. 139–155, 2002.
- [14] R. F. de Sena, J. L. Tambosi, A. K. Genena, R. de F. P. M. Moreira, H. F. Schröder, and H. J. José, "Treatment of meat industry wastewater using dissolved air flotation and advanced oxidation processes monitored by GC-MS and LC-MS," *Chemical Engineering Journal*, vol. 152, no. 1, pp. 151–157, 2009, doi: 10.1016/j.cej.2009.04.021.
- [15] C. Oliveira and J. Rubio, "A short overview of the formation of aerated flocs and their applications in solid/liquid separation by flotation," *Miner Eng*, vol. 39, pp. 124–132, 2012, doi: 10.1016/j.mineng.2012.05.024.
- [16] V. Ross, A. Singh, and K. Pillay, "Improved flotation of PGM tailings with a high-shear hydrodynamic cavitation device," *Miner Eng*, vol. 137, no. September 2018, pp. 133–139, 2019, doi: 10.1016/j.mineng.2019.04.005.
- [17] A. J. Dassey, "Assessing the suitability of coagulation pretreatment on poultry processing wastewater for optimized dissolved air flotation," LSU Master's Theses. 2498, 2010. doi: 10.31390/gradschool_theses.2498.
- [18] S. Calgaroto, A. Azevedo, and J. Rubio, "Flotation of quartz particles assisted by nanobubbles," *Int J Miner Process*, vol. 137, pp. 64–70, 2015, doi: 10.1016/j.minpro.2015.02.010.
- [19] S. Calgaroto, K. Q. Wilberg, and J. Rubio, "On the nanobubbles interfacial properties and future applications in flotation," *Miner Eng*, vol. 60, pp. 33–40, 2014, doi: 10.1016/j.mineng.2014.02.002.
- [20] R. Etchepare, H. Oliveira, A. Azevedo, and J. Rubio, "Separation of emulsified crude oil in saline water by dissolved air flotation with micro and nanobubbles," *Sep Purif Technol*, vol. 186, pp. 326–332, 2017, doi: 10.1016/j.seppur.2017.06.007.
- [21] R. Prakash, S. K. Majumder, and A. Singh, "Flotation technique: Its mechanisms and design parameters," *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 127, no. February, pp. 249–270, 2018, doi: 10.1016/j.cep.2018.03.029.
- [22] J. K. Edzwald, "Dissolved air flotation and me," *Water Res*, vol. 44, no. 7, pp. 2077–2106, 2010, doi: 10.1016/j.watres.2009.12.040.
- [23] I. Woodard & Curran, "7 Methods for Treating Wastewaters from Industry," *Industrial Waste Treatment Handbook*, pp. 149–334, 2006, doi: 10.1016/B978-0-7506-7963-3.50009-6.
- [24] A. M. A. Pintor, V. J. P. Vilar, C. M. S. Botelho, and R. A. R. Boaventura, "Oil and grease removal from wastewaters: Sorption treatment as an alternative to state-of-the-art

- technologies. A critical review," *Chemical Engineering Journal*, vol. 297, pp. 229–255, 2016, doi: 10.1016/j.cej.2016.03.121.
- [25] R. Parmar and S. K. Majumder, "Chemical Engineering and Processing : Process Intensification Microbubble generation and microbubble-aided transport process intensification — A state-of-the-art report," vol. 64, pp. 79–97, 2013.
- [26] P. E. Poh, W. Y. J. Ong, E. V. Lau, and M. N. Chong, "Investigation on micro-bubble flotation and coagulation for the treatment of anaerobically treated palm oil mill effluent (POME)," *J Environ Chem Eng*, vol. 2, no. 2, pp. 1174–1181, 2014, doi: 10.1016/j.jece.2014.04.018.
- [27] V. Del Nery, I. R. de Nardi, M. H. R. Z. Damianovic, E. Pozzi, A. K. B. Amorim, and M. Zaiat, "Long-term operating performance of a poultry slaughterhouse wastewater treatment plant," *Resour Conserv Recycl*, vol. 50, no. 1, pp. 102–114, 2007, doi: 10.1016/j.resconrec.2006.06.001.
- [28] I. R. de Nardi, V. del Nery, A. K. B. Amorim, N. G. dos Santos, and F. Chimenes, "Performances of SBR, chemical-DAF and UV disinfection for poultry slaughterhouse wastewater reclamation," *Desalination*, vol. 269, no. 1–3, pp. 184–189, 2011, doi: 10.1016/j.desal.2010.10.060.
- [29] T. Temesgen, T. T. Bui, M. Han, T. il Kim, and H. Park, "Micro and nanobubble technologies as a new horizon for water-treatment techniques: A review," *Adv Colloid Interface Sci*, vol. 246, no. June, pp. 40–51, 2017, doi: 10.1016/j.cis.2017.06.011.
- [30] J. Saththasivam, K. Loganathan, and S. Sarp, "An overview of oil-water separation using gas flotation systems," *Chemosphere*, vol. 144, pp. 671–680, 2016, doi: 10.1016/j.chemosphere.2015.08.087.
- [31] S. Alzahrani and A. W. Mohammad, "Challenges and trends in membrane technology implementation for produced water treatment: A review," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 4, no. C, pp. 107–133, Dec. 2014, doi: 10.1016/J.JWPE.2014.09.007.
- [32] S. Judd *et al.*, "The size and performance of offshore produced water oil-removal technologies for reinjection," *Sep Purif Technol*, vol. 134, pp. 241–246, Sep. 2014, doi: 10.1016/J.SEPPUR.2014.07.037.
- [33] M. Karhu, V. Kuokkanen, T. Kuokkanen, and J. Rämö, "Bench scale electrocoagulation studies of bio oil-in-water and synthetic oil-in-water emulsions," *Sep Purif Technol*, vol. 96, pp. 296–305, Aug. 2012, doi: 10.1016/J.SEPPUR.2012.06.003.
- [34] A. R. Pendashteh, L. C. Abdullah, A. Fakhru'L-Razi, S. S. Madaeni, Z. Zainal Abidin, and D. R. Awang Biak, "Evaluation of membrane bioreactor for hypersaline oily wastewater treatment," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 90, no. 1, pp. 45–55, Jan. 2012, doi: 10.1016/J.PSEP.2011.07.006.
- [35] J. K. Edzwald, "Developments of high rate dissolved air flotation for drinking water treatment," *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, vol. 56, no. 6–7, pp. 399–409, Sep. 2007. doi: 10.2166/aqua.2007.013.

- [36] S. Tanaka, S. Kastens, S. Fujioka, M. Schlüter, and K. Terasaka, "Mass transfer from freely rising microbubbles in aqueous solutions of surfactant or salt," *Chemical Engineering Journal*, vol. 387, p. 121246, May 2020, doi: 10.1016/J.CEJ.2019.03.122.
- [37] J. K. Edzwald, "Chapter 6: Dissolved air flotation in drinking water treatment," *Interface Science and Technology*, vol. 10, no. C, pp. 89–107, 2006, doi: 10.1016/S1573-4285(06)80075-X.
- [38] A. Bueno-Tokunaga, R. Pérez-Garibay, and D. Martínez-Carrillo, "Zeta potential of air bubbles conditioned with typical froth flotation reagents," *Int J Miner Process*, vol. 140, pp. 50–57, Jul. 2015, doi: 10.1016/J.MINPRO.2015.04.028.
- [39] M. Takahashi, "ζ Potential of Microbubbles in Aqueous Solutions: Electrical Properties of the Gas–Water Interface," *Journal of Physical Chemistry B*, vol. 109, no. 46, pp. 21858–21864, Nov. 2005, doi: 10.1021/JP0445270.
- [40] T. Zheng *et al.*, "Separation of Pollutants from Oil-Containing Restaurant Wastewater by Novel Microbubble Air Flotation and Traditional Dissolved Air Flotation," *Separation Science and Technology (Philadelphia)*, vol. 50, no. 16, pp. 2568–2577, 2015, doi: 10.1080/01496395.2015.1062396.
- [41] R. Moosai and R. A. Dawe, "Gas attachment of oil droplets for gas flotation for oily wastewater cleanup," *Sep Purif Technol*, vol. 33, no. 3, pp. 303–314, Nov. 2003, doi: 10.1016/S1383-5866(03)00091-1.
- [42] J. J. A. Atarah, "The use of flotation technology in produced water treatment in the oil & gas industry," 2011, Accessed: Nov. 12, 2022. [Online]. Available: <https://uis.brage.unit.no/uis-xmlui/handle/11250/182474>
- [43] J. Lee *et al.*, "Refractory oil wastewater treatment by dissolved air flotation, electrochemical advanced oxidation process, and magnetic biochar integrated system," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 36, no. May, p. 101358, 2020, doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101358.
- [44] H. Wang, W. Yang, X. Yan, L. Wang, Y. Wang, and H. Zhang, "Regulation of bubble size in flotation: A review," *J Environ Chem Eng*, vol. 8, no. 5, p. 104070, 2020, doi: 10.1016/j.jece.2020.104070.
- [45] M. Kim, M. Han, T. Kim, J. Lee, and D. Kwak, "Effect of nanobubbles for improvement of water quality in freshwater: Flotation model simulation," *Sep Purif Technol*, no. December 2019, 2020, doi: 10.1016/j.seppur.2020.116731.
- [46] J. Huang *et al.*, "A review on bubble generation and transportation in Venturi-type bubble generators," *Exp Comput Multiph Flow*, vol. 2, no. 3, pp. 123–134, 2020, doi: 10.1007/s42757-019-0049-3.
- [47] P. Palaniandy, H. Adlan, H. Aziz, M. Murshed, and Y. Hung, *Dissolved Air Flotation (DAF) for Wastewater Treatment*, no. August. 2017. doi: 10.1201/9781315164199-6.
- [48] J. Kosel, M. Šuštaršič, M. Petkovšek, M. Zupanc, M. Sežun, and M. Dular, "Application of (super)cavitation for the recycling of process waters in paper producing industry," *Ultrason Sonochem*, vol. 64, no. February, 2020, doi: 10.1016/j.ultsonch.2020.105002.

- [49] T. Temesgen, T. T. Bui, M. Han, T. il Kim, and H. Park, "Micro and nanobubble technologies as a new horizon for water-treatment techniques: A review," *Adv Colloid Interface Sci*, vol. 246, no. June, pp. 40–51, 2017, doi: 10.1016/j.cis.2017.06.011.
- [50] F. Liu *et al.*, "Experimental study on treatment of tertiary oil recovery wastewater by electrocoagulation," *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 144, no. May, p. 107640, 2019, doi: 10.1016/j.cep.2019.107640.
- [51] G. Z. Kyzas and K. A. Matis, "Electroflotation process: A review," *J Mol Liq*, vol. 220, pp. 657–664, 2016, doi: 10.1016/j.molliq.2016.04.128.
- [52] S. Gautam and G. J. Jameson, "The detachment of particles from bubbles at various locations in a turbulent flotation cell," *Miner Eng*, vol. 132, no. June 2018, pp. 316–325, 2019, doi: 10.1016/j.mineng.2018.06.004.
- [53] J. Rubio, M. L. Souza, and R. W. Smith, "Overview of flotation as a wastewater treatment technique," *Miner Eng*, vol. 15, no. 3, pp. 139–155, Mar. 2002, doi: 10.1016/S0892-6875(01)00216-3.
- [54] R. Etchepare, H. Oliveira, M. Nicknig, A. Azevedo, and J. Rubio, "Nanobubbles: Generation using a multiphase pump, properties and features in flotation," *Miner Eng*, vol. 112, no. June, pp. 19–26, 2017, doi: 10.1016/j.mineng.2017.06.020.
- [55] M. Y. Han, M. K. Kim, and H. J. Ahn, "Effects of surface charge, micro-bubble size and particle size on removal efficiency of electro-flotation," *Water Science and Technology*, vol. 53, no. 7, pp. 127–132, Apr. 2006, doi: 10.2166/WST.2006.216.
- [56] J. Y. Kim, M. G. Song, and J. D. Kim, "Zeta Potential of Nanobubbles Generated by Ultrasonication in Aqueous Alkyl Polyglycoside Solutions," *J Colloid Interface Sci*, vol. 223, no. 2, pp. 285–291, Mar. 2000, doi: 10.1006/JCIS.1999.6663.
- [57] Y. Nakatake, S. Kisu, K. Shigyo, T. Eguchi, and T. Watanabe, "Effect of nano air-bubbles mixed into gas oil on common-rail diesel engine," *Energy*, vol. 59, pp. 233–239, 2013, doi: 10.1016/j.energy.2013.06.065.
- [58] P. Palaniandy, H. Adlan, H. Aziz, M. Murshed, and Y. Hung, *5 Dissolved Air Flotation (DAF) for Wastewater Treatment*, no. August. 2017. doi: 10.1201/9781315164199-6.
- [59] M. Li, A. Bussonnière, M. Bronson, Z. Xu, and Q. Liu, "Study of Venturi tube geometry on the hydrodynamic cavitation for the generation of microbubbles," *Miner Eng*, vol. 132, no. November 2018, pp. 268–274, 2019, doi: 10.1016/j.mineng.2018.11.001.
- [60] K. Terasaka, A. Hirabayashi, T. Nishino, S. Fujioka, and D. Kobayashi, "Development of microbubble aerator for waste water treatment using aerobic activated sludge," *Chem Eng Sci*, vol. 66, no. 14, pp. 3172–3179, 2011, doi: 10.1016/j.ces.2011.02.043.
- [61] L. Sun *et al.*, "Characteristics and mechanism of bubble breakup in a bubble generator developed for a small TMSR," *Ann Nucl Energy*, vol. 109, pp. 69–81, 2017, doi: 10.1016/j.anucene.2017.05.015.
- [62] J. Ozonek, *Application of hydrodynamic cavitation in environmental engineering*. 2012. doi: 10.1201/b11825.

- [63] P. R. Gogate, "Hydrodynamic Cavitation for Food and Water Processing," *Food Bioproc Tech*, vol. 4, no. 6, pp. 996–1011, 2011, doi: 10.1007/s11947-010-0418-1.
- [64] R. T. Hilares, D. F. Atoche-Garay, D. A. P. Pagaza, M. A. Ahmed, G. J. C. Andrade, and J. C. Santos, "Promising physicochemical technologies for poultry slaughterhouse wastewater treatment: A critical review," *J Environ Chem Eng*, vol. 9, no. 2, p. 105174, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.JECE.2021.105174.
- [65] B. Swart *et al.*, "In situ characterisation of size distribution and rise velocity of microbubbles by high-speed photography," *Chem Eng Sci*, vol. 225, p. 115836, 2020, doi: 10.1016/j.ces.2020.115836.
- [66] M. Y. Han, Y. H. Park, and T. J. Yu, "Development of a new method of measuring bubble size," *Water Supply*, vol. 2, no. 2, pp. 77–83, Apr. 2002, doi: 10.2166/WS.2002.0048.
- [67] X. Li, P. Li, L. Zu, and C. Yang, "Gas-Liquid Mass Transfer Characteristics with Microbubble Aeration – I. Standard Stirred Tank," *Chem Eng Technol*, vol. 39, no. 5, pp. 945–952, May 2016, doi: 10.1002/CEAT.201500644.
- [68] S. J. Gulden, C. Riedele, S. Rollié, M. H. Kopf, and H. Nirschl, "Online bubble size analysis in micro flotation," *Chem Eng Sci*, vol. 185, pp. 168–181, Aug. 2018, doi: 10.1016/J.CES.2018.04.009.
- [69] F. Rehman, G. J. D. Medley, H. Bandulasena, and W. B. J. Zimmerman, "Fluidic oscillator-mediated microbubble generation to provide cost effective mass transfer and mixing efficiency to the wastewater treatment plants," *Environ Res*, vol. 137, pp. 32–39, Feb. 2015, doi: 10.1016/J.ENVRES.2014.11.017.
- [70] L. O. Filippov, R. Joussemet, and R. Houot, "Bubble spargers in column flotation: Adaptation to precipitate flotation," *Miner Eng*, vol. 13, no. 1, pp. 37–51, Jan. 2000, doi: 10.1016/S0892-6875(99)00148-X.
- [71] L. Parkinson, R. Sedev, D. Fornasiero, and J. Ralston, "The terminal rise velocity of 10–100 μm diameter bubbles in water," *J Colloid Interface Sci*, vol. 322, no. 1, pp. 168–172, Jun. 2008, doi: 10.1016/J.JCIS.2008.02.072.
- [72] G. H. Kelsall, S. Tang, A. L. Smith, and S. Yurdakul, "Measurement of rise and electrophoretic velocities of gas bubbles," *Journal of the Chemical Society - Faraday Transactions*, vol. 92, no. 20, pp. 3879–3885, Oct. 1996, doi: 10.1039/FT9969203879.
- [73] M. Basitere, M. Njoya, Z. Rinquest, S. K. O. Ntwampe, and M. S. Sheldon, "Performance evaluation and kinetic parameter analysis for static granular bed reactor (SGBR) for treating poultry slaughterhouse wastewater at mesophilic condition," *Water Pract Technol*, vol. 14, no. 2, pp. 259–268, Jun. 2019, doi: 10.2166/WPT.2019.010.
- [74] C. Chávez P., R. Castillo L., L. Dendooven, and E. M. Escamilla-Silva, "Poultry slaughter wastewater treatment with an up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor," *Bioresour Technol*, vol. 96, no. 15, pp. 1730–1736, Oct. 2005, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2004.08.017.
- [75] E. Debik and T. Coskun, "Use of the Static Granular Bed Reactor (SGBR) with anaerobic sludge to treat poultry slaughterhouse wastewater and kinetic modeling," *Bioresour*

Technol, vol. 100, no. 11, pp. 2777–2782, Jun. 2009, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2008.12.058.

- [76] A. R. Rajab, M. R. Salim, J. Sohaili, A. N. Anuar, Salmiati, and S. K. Lakkaboyana, "Performance of integrated anaerobic/aerobic sequencing batch reactor treating poultry slaughterhouse wastewater," *Chemical Engineering Journal*, vol. 313, pp. 967–974, Apr. 2017, doi: 10.1016/J.CEJ.2016.10.144.
- [77] P. T. Fernández Molina and L. M. Herrera Escobar, "Desarrollo de una propuesta para un sistema de tratamiento de aguas residuales de la empresa inversiones Wamu S.A.S - Pronto aves," Aug. 2018, Accessed: Nov. 12, 2022. [Online]. Available: <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/6925>
- [78] R. Cáceres Escorcía, "Diseño de tratamiento de un efluente proveniente del beneficio de la industria avícola," Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2017. doi: 10.1/JQUERY.MIN.JS.
- [79] I. A. Crossley and M. T. Valade, "A review of the technological developments of dissolved air flotation," *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, vol. 55, no. 7–8, pp. 479–491, 2006, doi: 10.2166/aqua.2006.057.
- [80] M. do S. Pereira, A. C. Borges, G. L. Muniz, F. F. Heleno, and L. R. D. A. Faroni, "Dissolved air flotation optimization for treatment of dairy effluents with organic coagulants," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 36, no. April, p. 101270, 2020, doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101270.
- [81] M. dos S. Pereira, A. C. Borges, F. F. Heleno, L. F. A. Squillace, and L. R. D. A. Faroni, "Treatment of synthetic milk industry wastewater using batch dissolved air flotation," *Journal of Cleaner Production*, vol. 189, pp. 729–737, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.04.065.
- [82] M. M. G. Mofrad, H. Pourzamani, M. M. Amin, I. Parseh, and M. Alipour, "In situ treatment of metalworking wastewater by chemical addition-dissolved air flotation coupled with UV, H₂O₂ & ZnO," *Heliyon*, vol. 6, no. 1, p. e03091, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e03091.
- [83] R. O. Cristóvão, C. M. Botelho, R. J. E. Martins, J. M. Loureiro, and R. A. R. Boaventura, "Fish canning industry wastewater treatment for water reuse - A case Study," *J Clean Prod*, vol. 87, no. 1, pp. 603–612, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.10.076.
- [84] A. I. Zouboulis and A. Avravas, "Treatment of oil-in-water emulsions by coagulation and dissolved-air flotation," *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*, vol. 172, pp. 153–161, 2000.
- [85] M. N. Adlan, P. Palaniandy, and H. A. Aziz, "Optimization of coagulation and dissolved air flotation (DAF) treatment of semi-aerobic landfill leachate using response surface methodology (RSM)," *Desalination*, vol. 277, no. 1–3, pp. 74–82, 2011, doi: 10.1016/j.desal.2011.04.006.
- [86] H. Oliveira, A. Azevedo, and J. Rubio, "Nanobubbles generation in a high-rate hydrodynamic cavitation tube," *Miner Eng*, vol. 116, no. August, pp. 32–34, 2018, doi: 10.1016/j.mineng.2017.10.020.

- [87] M. Fan, Y. Zhao, and D. Tao, "Fundamental studies of nanobubble generation and applications in flotation.," in *Separation Technologies for Minerals Coal and Earth Resources.*, C. Young and G. Luttrell, Eds. Society for Mining, Metallurgy and Exploration - SME., 2012, pp. 457–469.
- [88] A. Azevedo, R. Etchepare, S. Calgaroto, and J. Rubio, "Aqueous dispersions of nanobubbles: Generation, properties and features," *Minerals Engineering*, vol. 94, pp. 29–37, 2016, doi: 10.1016/j.mineng.2016.05.001.
- [89] A. Kouhestani, A. Amani, H. Parsaeian, M. Hosein, A. Bazargan, and H. Masoumi, "Chemical Engineering & Processing : Process Intensi fi cation Study of 3D-Printed Pressure Release Nozzle for Microbubble Formation in Full-Scale Dissolved Air Flotation (DAF)," *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, vol. 155, no. May, p. 108070, 2020, doi: 10.1016/j.cep.2020.108070.
- [90] Y. Maeda, S. Hosokawa, Y. Baba, A. Tomiyama, and Y. Ito, "Generation mechanism of micro-bubbles in a pressurized dissolution method," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 60, pp. 201–207, 2015, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2014.09.010.
- [91] M. Li, A. Bussonnière, M. Bronson, Z. Xu, and Q. Liu, "Study of Venturi tube geometry on the hydrodynamic cavitation for the generation of microbubbles," *Minerals Engineering*, vol. 132, no. November 2018, pp. 268–274, 2019, doi: 10.1016/j.mineng.2018.11.001.
- [92] H. Seo, A. M. Aliyu, and K. Chun, "Enhancement of momentum transfer of bubble swarms using an ejector with water injection," *Energy*, vol. 162, pp. 892–909, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.08.049.
- [93] R. T. Rodrigues and J. Rubio, "DAF-dissolved air flotation: Potential applications in the mining and mineral processing industry," *International Journal of Mineral Processing*, vol. 82, no. 1, pp. 1–13, 2007, doi: 10.1016/j.minpro.2006.07.019.
- [94] Y. Lecoffre, M. A. J. Guillaume, and V. Aumelas, "Bubbles and microbubbles for hydrodynamic test facilities," *Houille Blanche*, vol. 2018-Janua, no. 4, pp. 43–55, 2018, doi: 10.1051/lhb/2018041.
- [95] L. A. FERIS, S. C. W. GALLINA, R. T. RODRIGUES, and J. RUBIO, "OPTIMIZING DISSOLVED AIR FLOTATION DESIGN SYSTEM," vol. vol.17, n., pp. 549–556, 2000, doi: <https://doi.org/10.1590/S0104-66322000000400019>.
- [96] R. Etchepare, H. Oliveira, M. Nicknig, A. Azevedo, and J. Rubio, "Nanobubbles : Generation using a multiphase pump , properties and features in fl otation," *Minerals Engineering*, vol. 112, no. May, pp. 19–26, 2017, doi: 10.1016/j.mineng.2017.06.020.
- [97] H. A. Oliveira, A. C. Azevedo, R. Etchepare, and J. Rubio, "Separation of emulsified crude oil in saline water by flotation with micro- and nanobubbles generated by a multiphase pump," *Water Science and Technology*, vol. 76, no. 10, pp. 2710–2717, 2017, doi: 10.2166/wst.2017.441.
- [98] S. Calgaroto, A. Azevedo, and J. Rubio, "Separation of amine-insoluble species by flotation with nano and microbubbles," *Minerals Engineering*, vol. 89, pp. 24–29, 2016, doi: 10.1016/j.mineng.2016.01.006.

- [99] R. Parmar and S. K. Majumder, "Microbubble generation and microbubble-aided transport process intensification-A state-of-the-art report," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 64, pp. 79–97, 2013, doi: 10.1016/j.cep.2012.12.002.
- [100] Ylec Consultants, "Bulles/Microbulles | YLEC Consultants." <https://www.ylec-consultants.com/en/bubbles-and-microbubbles> (accessed Jul. 03, 2022).
- [101] H. Shi, M. Li, P. Nikrityuk, and Q. Liu, "Experimental and numerical study of cavitation flows in venturi tubes: From CFD to an empirical model," *Chem Eng Sci*, vol. 207, pp. 672–687, 2019, doi: 10.1016/j.ces.2019.07.004.
- [102] J. Huang *et al.*, "A review on bubble generation and transportation in Venturi-type bubble generators," *Exp Comput Multiph Flow*, vol. 2, no. 3, pp. 123–134, 2020, doi: 10.1007/s42757-019-0049-3.
- [103] F. C. P. Rocha e Silva *et al.*, "Oil removal efficiency forecast of a Dissolved Air Flotation (DAF) reduced scale prototype using the dimensionless number of Damköhler," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 23, no. November 2017, pp. 45–49, 2018, doi: 10.1016/j.jwpe.2018.01.019.
- [104] J. P. Rodrigues and R. Béttega, "Evaluation of multiphase CFD models for Dissolved Air Flotation (DAF) process," *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*, vol. 539, no. October 2017, pp. 116–123, 2018, doi: 10.1016/j.colsurfa.2017.12.015.
- [105] H. B. Ortiz-Oliveros and R. M. Flores-Espinosa, "Design of a mobile dissolved air flotation system with high rate for the treatment of liquid radioactive waste," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 144, pp. 23–31, 2020, doi: 10.1016/j.psep.2020.07.016.
- [106] A. Chen, Z. Wang, and J. Yang, "Influence of bubble size on the fluid dynamic behavior of a DAF tank: A 3D numerical investigation," *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*, vol. 495, pp. 200–207, 2016, doi: 10.1016/j.colsurfa.2015.10.039.
- [107] J. P. Rodrigues, J. N. M. Batista, and R. Béttega, "Application of population balance equations and interaction models in CFD simulation of the bubble distribution in dissolved air flotation," *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*, vol. 577, no. May, pp. 723–732, 2019, doi: 10.1016/j.colsurfa.2019.06.032.
- [108] G. Wang, L. Ge, S. Mitra, G. M. Evans, J. B. Joshi, and S. Chen, "A review of CFD modelling studies on the flotation process," *Miner Eng*, vol. 127, no. July, pp. 153–177, 2018, doi: 10.1016/j.mineng.2018.08.019.
- [109] K. H. Lee, H. Kim, J. W. KuK, J. D. Chung, S. Park, and E. E. Kwon, "Micro-bubble flow simulation of dissolved air flotation process for water treatment using computational fluid dynamics technique," *Environmental Pollution*, vol. 256, p. 112050, 2020, doi: 10.1016/j.envpol.2019.01.011.
- [110] L. Tang, S. Zhang, M. Li, X. Zhang, Z. Wu, and L. Ma, "Numerical investigation on the dynamic flow pattern in a new wastewater treatment system," *Water (Switzerland)*, vol. 13, no. 8, p. NA, 2021, doi: 10.3390/w13081101.

- [111] M. Yang, D. F. del Pozo, E. Torfs, U. Rehman, D. Yu, and I. Nopens, "Numerical simulation on the effects of bubble size and internal structure on flow behavior in a DAF tank: A comparative study of CFD and CFD-PBM approach," *Chemical Engineering Journal Advances*, vol. 7, no. May, p. 100131, 2021, doi: 10.1016/j.cej.2021.100131.
- [112] V. R. Fanaie, M. Khiadani, and T. Ayres, "Effects of internal geometry on hydrodynamics of dissolved air flotation (DAF) tank: An experimental study using particle image velocimetry (PIV)," *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*, vol. 575, no. May, pp. 382–390, 2019, doi: 10.1016/j.colsurfa.2019.05.027.
- [113] V. R. Fanaie, M. Khiadani, and T. Ayres, "Effects of internal geometry on hydrodynamics of dissolved air flotation (DAF) tank: An experimental study using particle image velocimetry (PIV)," *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*, vol. 575, no. March, pp. 382–390, 2019, doi: 10.1016/j.colsurfa.2019.05.027.
- [114] J. P. Rodrigues, J. N. M. Batista, and R. Béttega, "Application of population balance equations and interaction models in CFD simulation of the bubble distribution in dissolved air flotation," *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*, vol. 577, no. May, pp. 723–732, 2019, doi: 10.1016/j.colsurfa.2019.06.032.
- [115] V. R. Fanaie, M. Khiadani, and T. Ayres, "Effects of internal geometry on hydrodynamics of dissolved air flotation (DAF) tank: An experimental study using particle image velocimetry (PIV)," *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*, vol. 575, no. May, pp. 382–390, 2019, doi: 10.1016/j.colsurfa.2019.05.027.
- [116] M. Ai, K. Li, S. Liu, and D. K. J. Lin, "Balanced incomplete Latin square designs," *J Stat Plan Inference*, vol. 143, no. 9, pp. 1575–1582, 2013, doi: 10.1016/j.jspi.2013.05.001.
- [117] V. Del Nery, I. R. de Nardi, M. H. R. Z. Damianovic, E. Pozzi, A. K. B. Amorim, and M. Zaiat, "Long-term operating performance of a poultry slaughterhouse wastewater treatment plant," *Resour Conserv Recycl*, vol. 50, no. 1, pp. 102–114, 2007, doi: 10.1016/j.resconrec.2006.06.001.
- [118] O. Santoro, T. Pastore, D. Santoro, F. Crapulli, M. Raisee, and M. Moghaddami, "Combined physico-chemical treatment of secondary settled municipal wastewater in a multifunctional reactor," *Water Science and Technology*, vol. 68, no. 8, pp. 1715–1722, 2013, doi: 10.2166/wst.2013.418.
- [119] B. Sarvin *et al.*, "LC-MS determination of steroidal glycosides from *Dioscorea deltoidea* Wall cell suspension culture: Optimization of pre-LC-MS procedure parameters by Latin Square design," *J Chromatogr B Analyt Technol Biomed Life Sci*, vol. 1080, no. February, pp. 64–70, 2018, doi: 10.1016/j.jchromb.2018.02.012.
- [120] D. A. Jadhav *et al.*, "The Treatment Effect of Chemical Coagulation Process in South African Brewery Wastewater: Comparison of Polyamine and Aluminum-Chlorohydrate coagulants," *Water 2022, Vol. 14, Page 2495*, vol. 14, no. 16, p. 2495, Aug. 2022, doi: 10.3390/W14162495.
- [121] A. M. A. Pintor, V. J. P. Vilar, C. M. S. Botelho, and R. A. R. Boaventura, "Oil and grease removal from wastewaters: Sorption treatment as an alternative to state-of-the-art

- technologies. A critical review," *Chemical Engineering Journal*, vol. 297, pp. 229–255, 2016, doi: 10.1016/j.cej.2016.03.121.
- [122] C. Dlangamandla, S. K. O. Ntwampe, and M. Basitere, "A bioflocculant-supported dissolved air flotation system for the removal of suspended solids, lipids and protein matter from poultry slaughterhouse wastewater," pp. 452–458, 2018, doi: 10.2166/wst.2018.324.
- [123] W. Cao and M. Mehrvar, "Chemical Engineering Research and Design Slaughterhouse wastewater treatment by combined anaerobic baffled reactor and UV / H₂O₂ processes," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 89, no. 7, pp. 1136–1143, 2010, doi: 10.1016/j.cherd.2010.12.001.
- [124] D. M. Pinheiro, S. M. Ratusznei, J. A. D. Rodrigues, M. Zaiat, and E. Foresti, "Fluidized ASBR treating synthetic wastewater: Effect of recirculation velocity," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 47, no. 2, pp. 184–191, 2008, doi: 10.1016/j.cep.2007.03.004.
- [125] S. Sirianuntapiboon and S. Yommee, "Application of a new type of moving bio-film in aerobic sequencing batch reactor (aerobic-SBR)," vol. 78, pp. 149–156, 2006, doi: 10.1016/j.jenvman.2005.04.012.
- [126] E. W. Rice, L. Bridgewater, A. P. H. Association, A. W. W. Association, and W. E. Federation, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association, 2012. [Online]. Available: <https://books.google.com.co/books?id=dd2juAAACAAJ>
- [127] I. R. de Nardi, T. P. Fuzi, and V. del Nery, "Performance evaluation and operating strategies of dissolved-air flotation system treating poultry slaughterhouse wastewater," *Resour Conserv Recycl*, vol. 52, no. 3, pp. 533–544, 2008, doi: 10.1016/j.resconrec.2007.06.005.
- [128] R. Parmar and S. K. Majumder, "Chemical Engineering and Processing : Process Intensification Microbubble generation and microbubble-aided transport process intensification — A state-of-the-art report," vol. 64, pp. 79–97, 2013.
- [129] Z. Tian, C. Wang, and M. Ji, "Full-scale dissolved air flotation (DAF) equipment for emergency treatment of eutrophic water," *Water Science and Technology*, vol. 77, no. 7, pp. 1802–1809, 2018, doi: 10.2166/wst.2018.046.
- [130] IDEAM, "SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES EN AGUA SECADOS A 103 105 °C," *TP0088*, Versión 3. 2007. Accessed: Jun. 14, 2021. [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Sólidos+Suspendidos+Totales+en+aguas.pdf/f02b4c7f-5b8b-4b0a-803a-1958aac1179c>
- [131] F. El-Gohary, A. Tawfik, and U. Mahmoud, "Comparative study between chemical coagulation/precipitation (C/P) versus coagulation/dissolved air flotation (C/DAF) for pre-treatment of personal care products (PCPs) wastewater," *Desalination*, vol. 252, no. 1–3, pp. 106–112, 2010, doi: 10.1016/j.desal.2009.10.016.

ANEXOS

7.1 Código de MATLAB® para medir el diámetro de las burbujas.

A continuación, se presenta el código empleado para medir cada una de las microburbujas empleando el toolbox de procesamiento de imágenes. Este código emplea segmentación de imágenes y la función regionprops que permite medir propiedades de regiones o manchas identificadas en una imagen.

```
% Inicio
close all;
clear all;
clc;

%Se crea un archivo de texto con los resultados asociadas a la
medición de
%microbubujas
fileID = fopen('resultados.txt','w+');
fprintf(fileID,' Mean_Intensity Area Perimeter Centroid1 Centroid2
Diameter(um) Archivo\n');

fprintf('Running Codigo Prueba GL.m...\n'); % Mensaje enviado a la
ventana de comandos.
workspace; % Desplegar panel de espacio de trabajo con todas las
variables.

%formatos de visualización
format long g;
format compact;
captionFontSize = 14;

% Verificación de instalación de Image Processing Toolbox
IPT = license('test', 'image_toolbox');
if ~IPT
    % El usuario no tiene instalada la caja de herramientas
    message = sprintf('Lo sentimos, pero no parece tener la caja de
herramientas de procesamiento de imágenes.\N;Desea intentar continuar
de todos modos?');
    reply = questdlg(message, 'Toolbox no encontrado', 'Si', 'No',
'Si');
    if strcmpi(reply, 'No')
        % User said No, so exit.
        return;
    end
end

%Microburbuja de referencia
%a continuación se ingresa la medida en pixeles obtenida para la
imagen de
%referencia obtenida con la regla de calibración de microscopio para
el
%punto de 70 um
size_point_70_um = 107.0625;
```

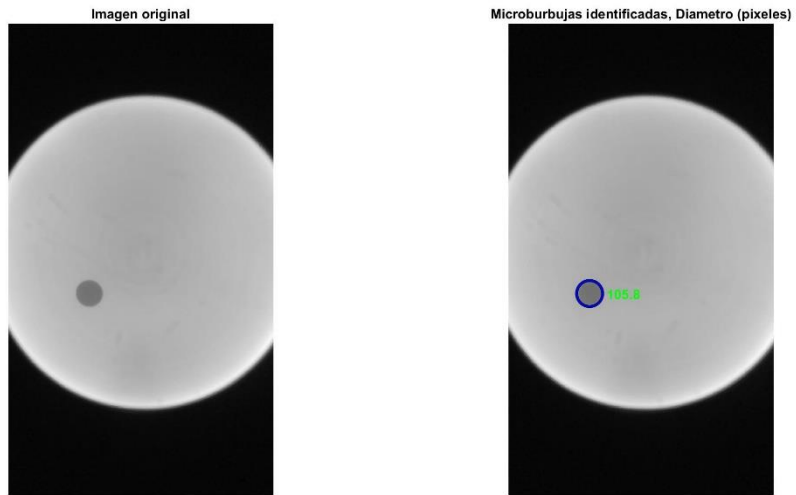


Figura 28, Imágenes del punto de referencia de $70\ \mu\text{m}$ para calibración del tamaño de píxel.

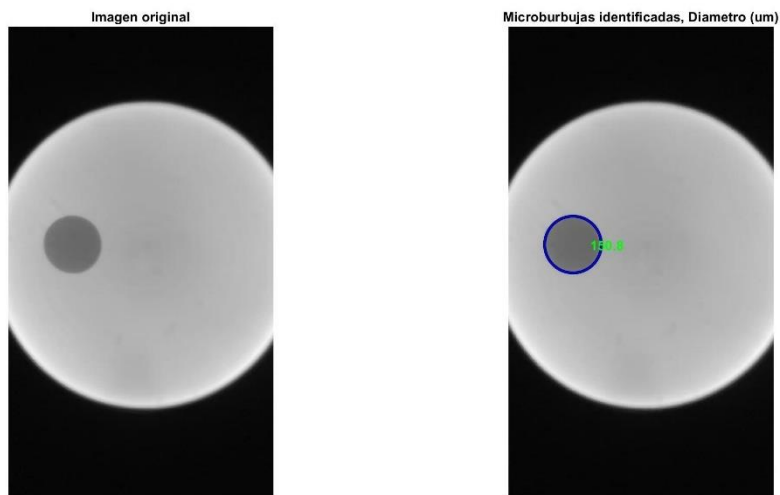


Figura 29, Validación de la calibración con fotografía de punto de referencia de $150\ \mu\text{m}$.

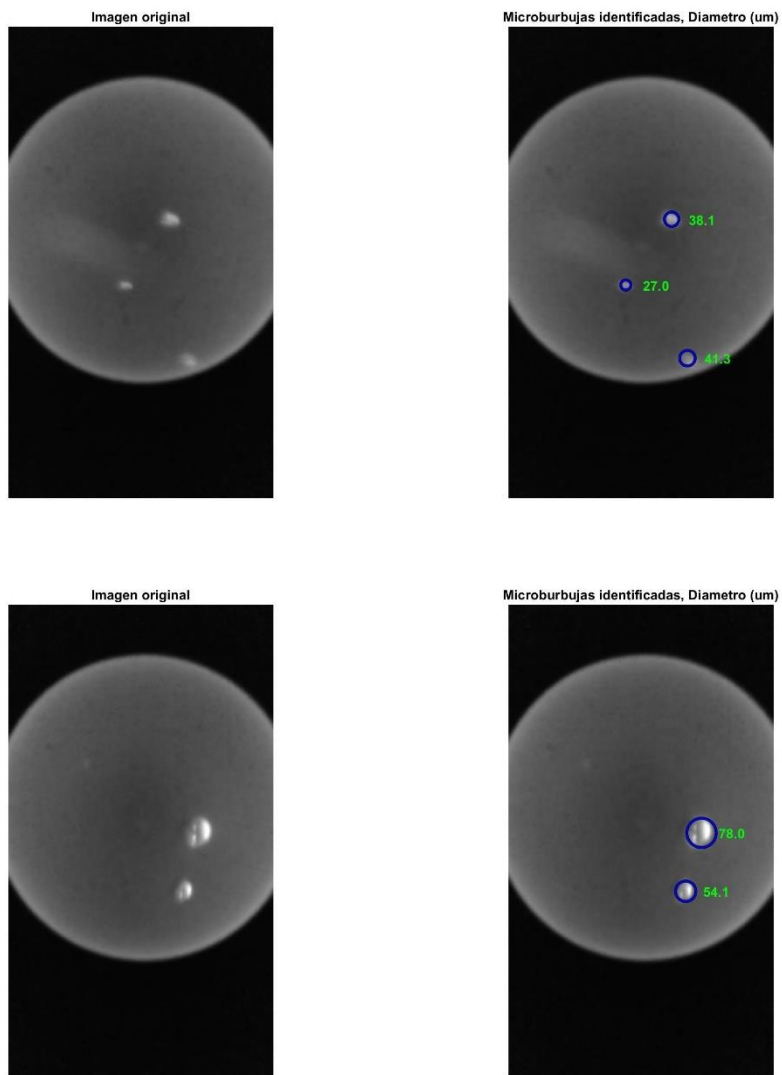


Figura 30, Ejemplos de fotografías de microburbujas procesadas.

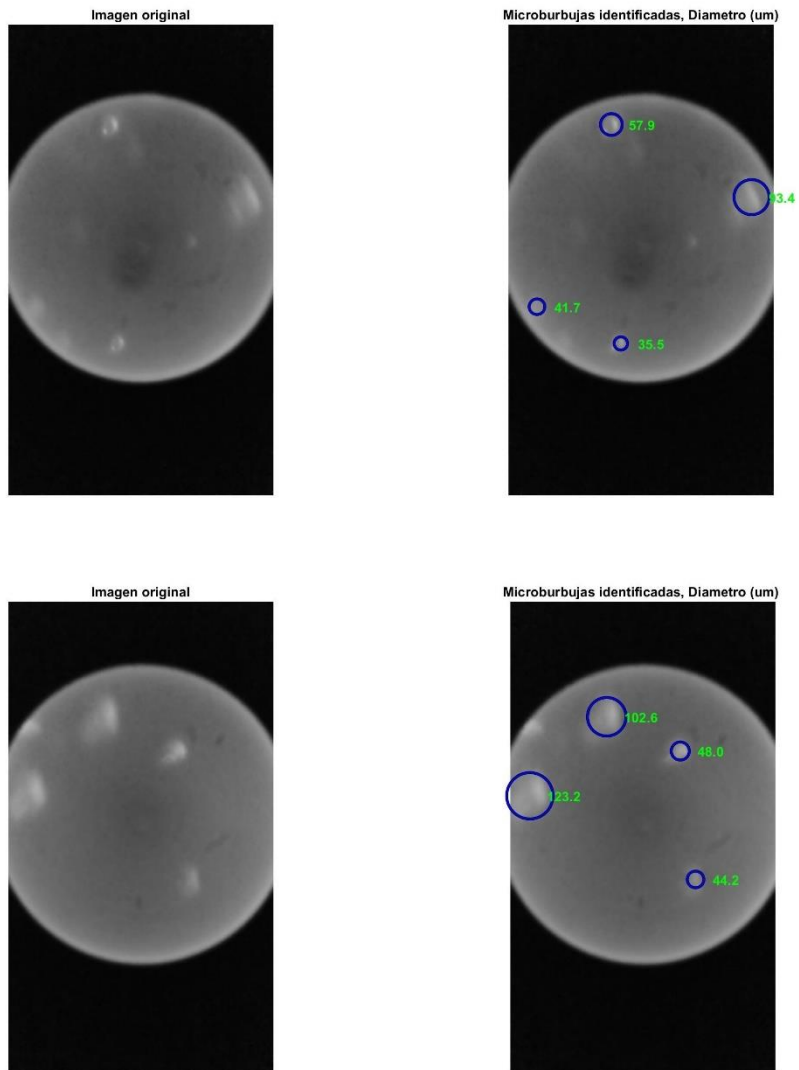


Figura 31, Ejemplos de fotografías de microburbujas procesadas.

7.2 DETALLE DEL PROCESO REALIZADO PARA EL DISEÑO DE LA CELDA DE FLOTACIÓN EMPLEANDO DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.

A continuación, se presenta el diseño y desarrollo de una celda de flotación para un sistema de tratamiento de agua a escala de banco, utilizando un inyector comercial de microburbujas de cavitación hidrodinámica y dinámica de fluidos computacional (CFD) para su validación. Para ello, se realizó la caracterización del inyector de microburbujas para la identificación y validación de las condiciones de funcionamiento del sistema, se realizaron cálculos numéricos considerando los parámetros de funcionamiento del inyector y las ecuaciones de diseño de un sistema DAF con mayor proporción de reciclaje de agua (50%) y 10 minutos de tiempo de retención hidráulica. Finalmente, el sistema diseñado fue validado utilizando el software ANSYS Fluent 2020 R2 como herramienta de modelado CFD.

Los resultados de la simulación muestran que considerar las ecuaciones de diseño de un sistema DAF para el diseño de una celda de flotación con un inyector de microburbujas de cavitación hidrodinámica funciona y es una aproximación válida. La simulación CFD del flujo de fase gas-líquido muestra que la geometría de la celda es beneficiosa para la generación de un patrón de flujo de microburbujas dinámico y se identificó un flujo estratificado cerca de la superficie del tanque. Los vectores de flujo de microburbujas se mueven en la dirección del desbordamiento del lodo beneficiando la remoción de contaminantes, también se identificó una altura adecuada de la zona de "aguas blancas". Se espera que el sistema de flotación diseñado a partir del inyector de microburbujas sea una solución prometedora en el desarrollo de una nueva generación de sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Para las simulaciones, se utilizó el software Ansys Fluent 2020 R2 para los cálculos de dinámica de fluidos y para el análisis de los resultados simulados. El dominio computacional se subdividió para obtener el mayor predominio de celdas en la malla final de 66791 elementos en el modelo 2D y 491679 elementos para el modelo 3D.

El agua se estableció como fase primaria y microburbujas de aire de 50 μm como fase secundaria. La información de las variables operativas del sistema se presenta en la Tabla 23 y los modelos empleados para resolver numéricamente el sistema y definición de los órdenes de discretización empleados se detallan en la Tabla 24. Estos fueron seleccionados teniendo en cuenta investigaciones en CFD de tanques de flotación similares [104], [106]–[110].

Tabla 23, Información de las variables operativas del sistema.

Variable	Boundary condition	
Inlet – water	Velocity inlet	0.020833333 m/s
Inlet – water Area		0.0024 m ²
Recycle inlet - water and air	Velocity inlet	0.947350852 m/s
Recycle inlet - area		2.63894E-05 m ²
Recycle inlet - ratio of total air	-	0.026
Outlets	Pressure outlet	-
Walls and baffles	wall	-
Surface of flotation tank	Degassing	-

Bubble diameter	-	50 μm
-----------------	---	------------------

Tabla 24, Parámetros de configuración establecidos en simulación.

Information	Adopted condition
<i>Multiphase model</i>	Euler (as denoted by the software) Inhomogeneous model
<i>Turbulence model</i>	κ - ϵ realizable
<i>Drag Model</i>	Universal drag
<i>Gravity</i>	9.81 m/s^2
<i>Surface tension</i>	0.072 N/m
<i>Inhomogeneous discrete method</i>	2nd order upwind
<i>Discretization scheme for the volume fraction equation</i>	1st Order Upwind
<i>Discretization scheme for the turbulent kinetic energy equation</i>	2nd order upwind
<i>Discretization scheme for the turbulence dissipation rate equation</i>	2nd order upwind
<i>Average time step Total simulated flow time</i>	1/3 s 600 s

A medida que las aguas residuales y los contaminantes pasan por un proceso de mezcla con microburbujas, es importante elegir un modelo de turbulencia adecuado para una simulación de flujo interno en la zona de contacto [109]. Los modelos de turbulencia de dos ecuaciones, como los modelos basados en $\kappa - \epsilon$, se utilizan ampliamente ya que las formas de sus ecuaciones de transporte se derivan de las ecuaciones de Navier-Stokes razón por la cual este modelo es el más empleado para este tipo el análisis. Se especificó una condición de límite de desgasificación para la superficie agua-aire en la parte superior de la celda de flotación. Respecto a las superficies de las paredes y los deflectores se trataron como paredes sin deslizamiento, donde la constante de rugosidad y la altura de rugosidad en las paredes sin deslizamiento se establecieron como 0.5 y 0.0, respectivamente [111]. Se especificó una condición de límite de desgasificación para la superficie agua-aire en la parte superior de la celda de flotación.

El diseño de la celda de flotación se basó en las geometrías propuestas por El diseño de la celda de flotación estudiado en este trabajo se basó en la geometría propuesta por Rocha e Silva et al [103] y Rodrigues et al [104]. Ver Figura 32.

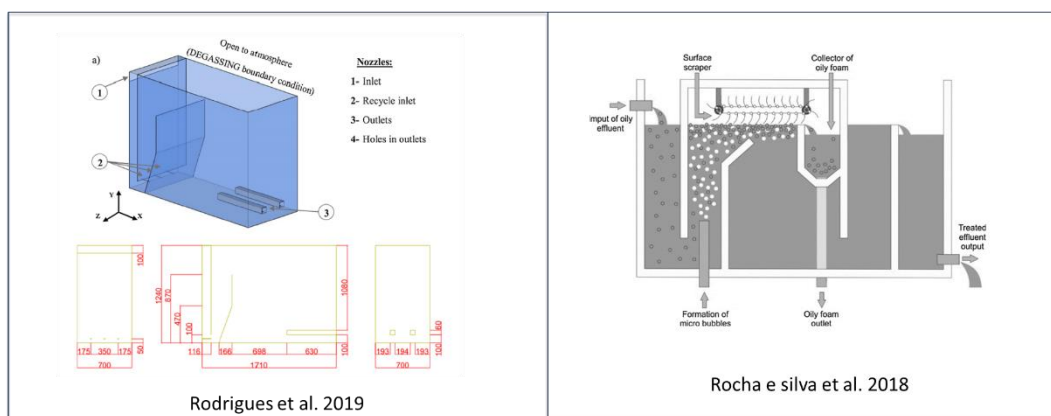


Figura 32, Diseño de la celda de flotación propuesta por Rocha e Silva et al [84] y Rodrigues et al [85].

7.2.1 Diseños y pruebas iniciales:

Se plantearon 4 diseños de celda de flotación los cuales se presentan en la Figura 33. El diseño 1 y 2, proponía una celda de flotación rectangular que emplea un baffle o divisor de zona de contacto y separación a 60°, el diseño 3 plantea una modificación acorde al diseño de celda propuesto por considerando inicialmente una sección vertical y otra a 60° para dirigir el flujo hacia la zona de desbordamiento de lodos con una configuración más cuadrada para amplificar el efecto de trampa de grasas, finalmente el diseño número 4 presenta el diseño 3D propuesto en este trabajo de investigación.

Todos los diseños:

**Volumen Total = 45 Litros,
Espesor = 20 cm**

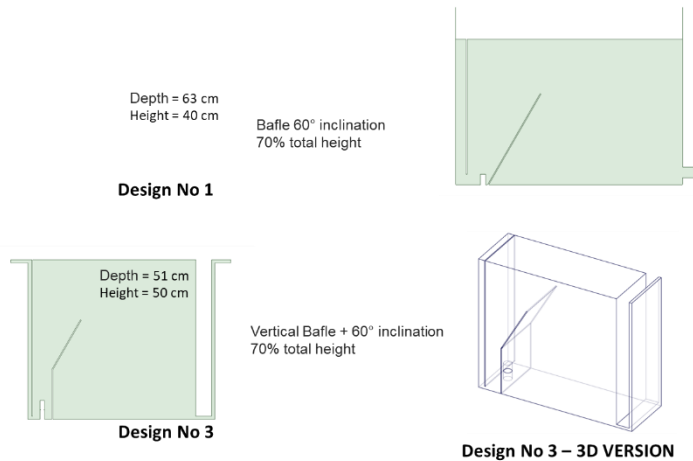


Figura 33, Diseños de celdas de flotación desarrollados.

Las pruebas realizadas con el diseño no 1 presentado en la Figura 34, permitieron afianzar los conocimientos en la modelación numérica empleando el software de simulación, se identificaron errores en la definición de las condiciones de frontera y comportamiento no deseado del fluido, así mismo se identificó velocidades de flujo desproporcionadas.

Diseño No 1

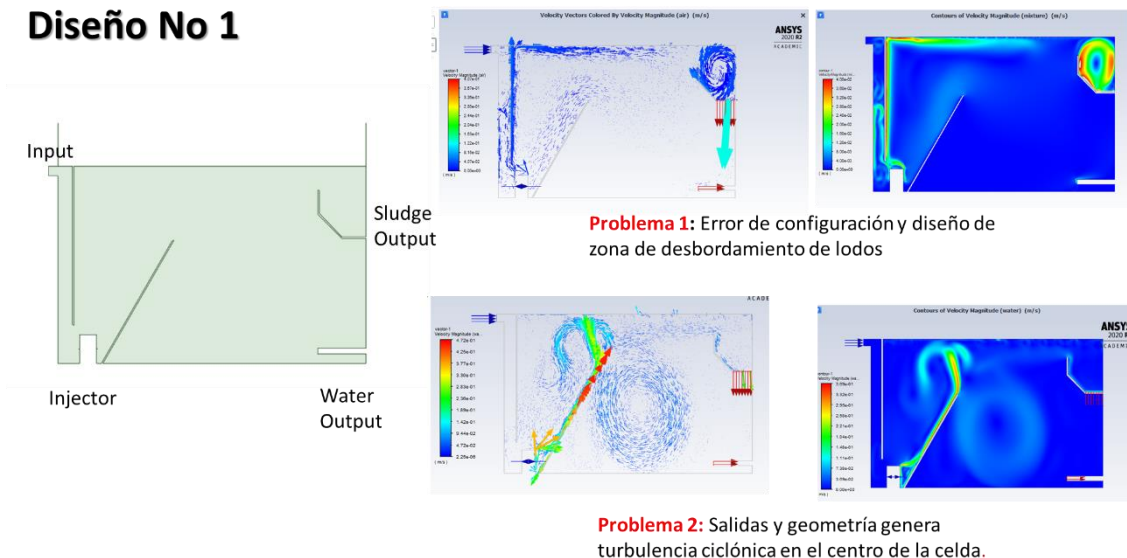
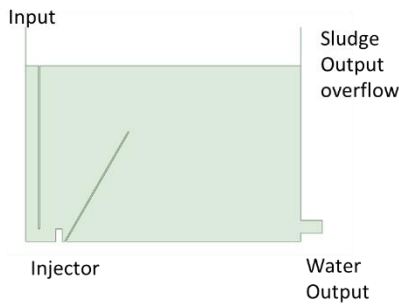


Figura 34, Resultados obtenidos con el diseño de prueba inicial en 2D usando Ansys Fluent.

En el diseño número 2 se corrigieron las condiciones de frontera, se optimizó las velocidades de caudal asociadas al modelo 2D y se validó el efecto del baffle de 60° en el tanque de flotación rectangular. Ver Figura 35.

Diseño No 2



Problema 3: La zona de contacto es muy larga, y la distribución de las microburbujas es a través de las paredes del baffle divisor. No se logra una distribución adecuada de las microburbujas en la superficie. La celda presenta una baja carga hidráulica.

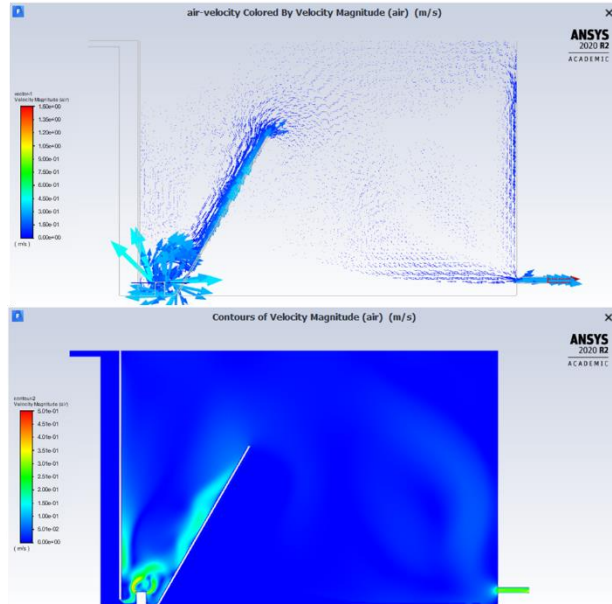
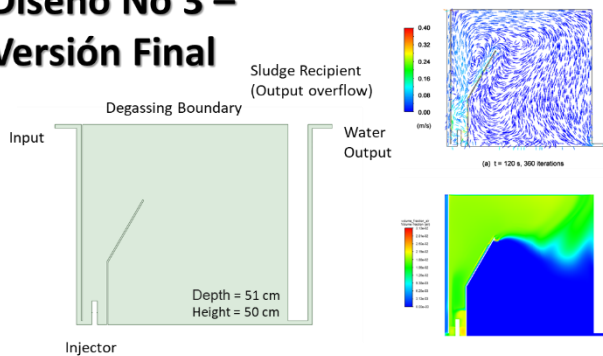


Figura 35, Resultados obtenidos con el diseño de prueba No 2 en 2D usando Ansys Fluent.

Con los resultados anteriores, se procedió a realizar ajuste de las dimensiones de la celda de flotación a una configuración cuadrada con un baffle con sección vertical y sección a 60°, se realizaron los cálculos numéricos para simular las condiciones de frontera del inyector de microburbujas de forma correcta acorde a lo indicado en la Tabla 23 y parámetros de modelo de turbulencia, y características del fluido bifásico acorde a la Tabla 24, obteniendo los resultados que se presenta en la Figura 36 y la Figura 37.

Diseño No 3 – Versión Final



Information	Adopted condition
Multiphase model	Euler (Modelo no homogéneo)
Turbulence model	κ - ϵ realizable
Drag Model	Universal drag
Gravity	9.81 m/s ²
Surface tension	0.072 N/m
Inhomogeneous discrete method	2nd order upwind
Discretization scheme for the volume fraction equation	1st Order Upwind
Discretization scheme for the turbulent kinetic energy equation	2nd order upwind
Discretization scheme for the turbulence dissipation rate equation	2nd order upwind
Average time step Total	1/3 s
simulated flow time	600 s

Figura 36, Resultados obtenidos con el modelo en 2D de la celda de flotación propuesta.

Diseño No 3 – 3D

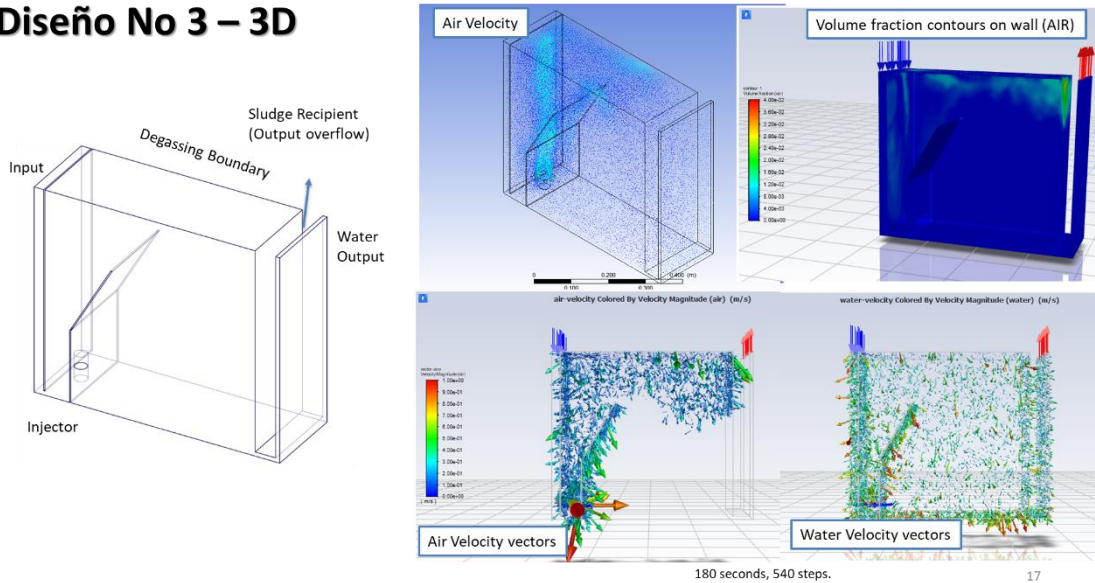


Figura 37, Resultados obtenidos con el modelo en 3D de la celda de flotación propuesta.

Los resultados de la simulación permitieron identificar lo siguiente:

- El patrón de flujo en la zona de separación fue dinámico, los vectores de flujo se mueven en la dirección de la zona de desbordamiento del lodo beneficiando la remoción de contaminantes y las velocidades registradas son acordes a las velocidades de flujo del efluente y del inyector.
- El patrón de flujo también afectó la distribución del aire, identificado flujo estratificado horizontal cerca de la superficie de la celda en la parte superior de la zona de separación favoreciendo el proceso de separación ya que el flujo estratificado aumenta la capacidad de eliminación de flóculos debido a una mayor presencia de burbujas de aire que favorecer su flotación.
- El análisis de la fracción volumétrica de aire permitió identificar de forma visual la coherencia de los resultados obtenidos en simulación respecto al funcionamiento real del equipo permitiendo realizar una comparación visual de la "zona de aguas blancas" obteniendo resultados satisfactorios, siendo este un indicador de la consistencia de la simulación realizada.

Finalmente, en la Figura 38 se presenta el diagrama de construcción de la celda propuesta.

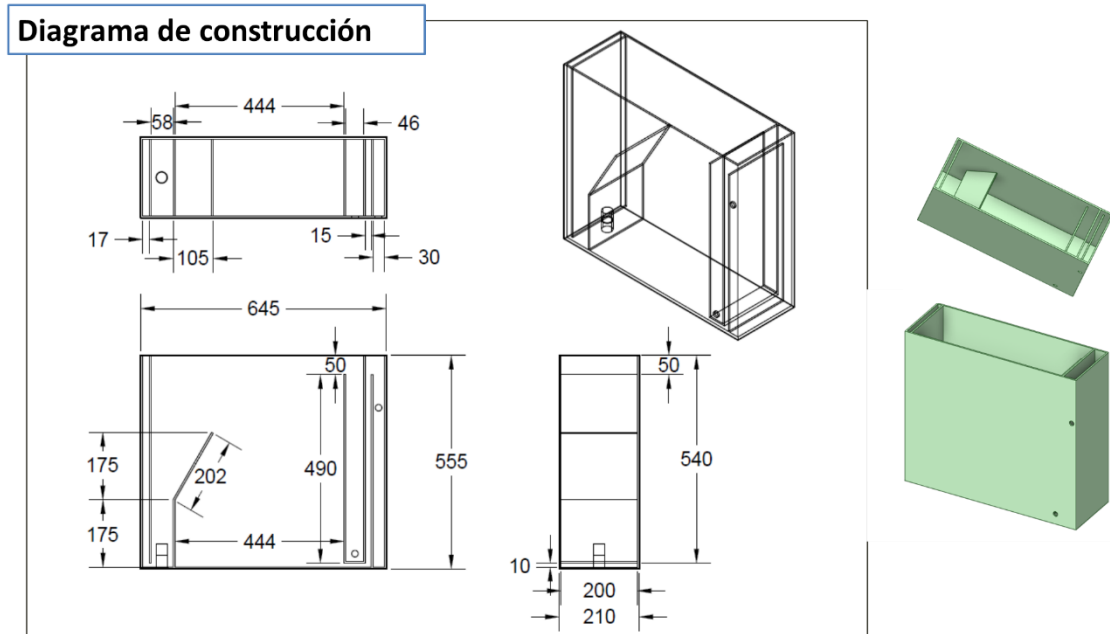


Figura 38, Diagrama de construcción con detalle de dimensiones.