

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
VALPARAÍSO - CHILE



Evaluación y Modelado de la Transferencia de Oxígeno con Burbujas Ultrafinas en el Tratamiento de Aguas Residuales

MILLATRAY ANGELBECK MALDONADO

Memoria de Titulación para optar al grado de Ingeniería Civil Ambiental

Profesor Guía

CLAUDIO ACUÑA PEREZ

Profesor Correferente

CAMILA MERY ARAYA

Correferente

RODRIGO LAZARRAGA MUÑOZ

Marzo 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Evaluación y Modelado de la Transferencia de Oxígeno con Burbujas Ultrafinas en el Tratamiento de Aguas Residuales

Nombre del candidato(a): Millatray Angelbeck Maldonado

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Ambiental

Campus: Casa Central Valparaíso **Departamento:** Ingeniería Química y Ambiental

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Claudio Acuña Perez, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 10-03-2026 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 09-03-2026 **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Dedicatoria

*A mi madre,
por su apoyo incondicional, por creer en mí incluso cuando dudé,
enseñándome a no rendirme.*

*A mis amigos,
quienes acompañaron este camino con palabras oportunas, paciencia y presencia,
recordándome que ningún esfuerzo es completamente solitario.*

*A mis profesores,
por su guía, su exigencia y su confianza,
por transmitirme no solo conocimientos,
sino también el valor del pensamiento crítico, la disciplina y
la responsabilidad ética frente al conocimiento y su impacto en la sociedad.*

*Este trabajo es también un reflejo del proceso de aprendizaje:
un camino marcado por avances y retrocesos, certezas e incertidumbres,
donde los errores se transforman en lecciones
y los desafíos, en oportunidades de crecimiento.*

*Y que el verdadero valor del conocimiento
reside no solo en el resultado final,
sino en el acto mismo de aprender
y aportar al saber humano.*

Resumen Ejecutivo

Se evalúa el potencial de la tecnología de burbujas ultrafinas (UFB) de oxígeno como alternativa a los sistemas convencionales de aireación en plantas de tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados, con el objetivo de mejorar la eficiencia de transferencia de oxígeno y reducir el alto consumo energético del proceso.

Se modela una planta municipal utilizando el software SuperPro Designer. El afluente presenta un caudal de 2.000 [m³/h] y carga orgánica de 428 [kgDBO₅/h]. Se comparan tres escenarios de aireación: aire atmosférico, oxígeno puro y oxígeno inyectado por boquillas ultrafinas (UFB O₂). La tecnología UFB se representa mediante un incremento del coeficiente volumétrico de transferencia de masa desde 4 [h⁻¹] hasta 7.65 [h⁻¹].

Los resultados indican que la sustitución de aire por oxígeno reduce el consumo energético de aireación en un 50%, mientras que UFB O₂ alcanza una reducción del 40%, con una huella de carbono de 0.25 [kgCO₂eq/m³] frente a 0.28 [kgCO₂eq/m³] del caso base.

La tecnología de UFB surge como una alternativa viable para optimizar energética y ambientalmente procesos biológicos en tratamiento de aguas. Proporciona oxigenación más sostenida y reduce emisiones. Su implementación requiere sistemas combinados de aireación-mezcla y validación piloto, con un impacto moderado en la inversión de capital.

Abstract

The potential of ultrafine oxygen bubble (UFB) technology is evaluated as an alternative to conventional aeration systems in activated sludge wastewater treatment plants, aiming to improve oxygen transfer efficiency and reduce the high energy consumption of the process.

A municipal plant was modeled using the software SuperPro Designer. The influent flow rate is 2000 [m³/h], with an organic load of 428 [kg BOD₅/h]. Three aeration scenarios were compared: atmospheric air, pure oxygen, and oxygen injected through ultrafine bubble nozzles (UFB O₂). The UFB technology was represented by an increase in the volumetric mass transfer coefficient from 4 [h⁻¹] to 7.65 [h⁻¹].

The results indicate that replacing air with oxygen reduces aeration energy consumption by 50%, while UFB O₂ achieves a 40% reduction, with a carbon footprint of 0.25 kg CO₂eq/m³, compared to 0.28 kg CO₂eq/m³ in the base case.

UFB technology emerges as a viable alternative to improve the energy and environmental performance of biological processes in water treatment. It provides more sustained oxygenation and reduces emissions. Its implementation requires combined aeration-mixing systems and pilot-scale validation, with a moderate impact on capital investment.

Glosario

$A_B [m^2]$: Área total de un sistema de burbujas

$a \left[\frac{m^2}{m^3}\right]$: Área interfacial específica de burbuja

$Carga\ Org. \left[\frac{kg\ DBO_5}{d}\right]$: Carga Orgánica

$C \left[\frac{mg}{L}\right]$: Concentración de gas disuelto

$C_s \left[\frac{mg}{L}\right]$: Concentración de saturación

$C^* \left[\frac{mg}{L}\right]$: Concentración de saturación corregida

$C_a [-]$: Número de Cavitación

$CO_{2\ Eq} \left[\frac{ton\ CO_{2\ eq}}{año}\right]$: Emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al consumo energético

$DBO_5 \left[\frac{mg}{L}\right]$: Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días

$D \left[\frac{m^2}{s}\right]$: Coeficiente difusión del gas

$d [m]$: Diámetro de burbuja

$d_{32}[m]$: Diámetro medio de Sauter

$\delta[m]$: Espesor de la capa

$\epsilon_G [-]$: Fracción de retención gaseosa

$\epsilon \left[\frac{C^2}{N\ m^2}\right]$: Permitividad del medio

$\epsilon \left[\frac{m^2}{s\ V}\right]$: Movilidad electroforética

$E^\circ \left[\frac{kWh}{m^3}\right]$: Energía específica

$E^\circ_{O_2} \left[\frac{kWh}{kg\ O_2}\right]$: Energía específica de producción O_2

$E_{anual} \left[\frac{kWh}{año}\right]$: Energía eléctrica total anual

$H \left[\frac{atm\ m^3}{mol}\right]$: Constante de Henry

$J \left[\frac{mol}{m^2\ s}\right]$: Flujo molar

$K_L a \left[\frac{1}{h}\right]$: Coeficiente volumétrico de transferencia

$k_L \left[\frac{m}{s}\right]$: Coeficiente de película

$\lambda_D [m]$: Longitud de Debye

$\mu_F \left[\frac{kg}{m\ s}\right]$: Viscosidad del fluido

$\mu_M \left[\frac{1}{s}\right]$: Tasa de crecimiento específico de microorganismos.

$\mu_{M\ max} \left[\frac{1}{s}\right]$: Tasa máxima de crecimiento específico de microorganismos.

$\mu_Q \left[\frac{J}{mol}\right]$: Potencial químico

$N_{Re} [-]$: Número de Reynolds

$P_{ext} [atm]$: Presión atmosférica externa de burbuja

$P_{int} [atm]$: Presión interna de burbuja (Laplace)

$P_{gas} [atm]$: Presión de gas en el interior de la burbuja

$P_{liq} [atm]$: Presión hidrostática del líquido en el exterior de la burbuja

$P_{rep} [atm]$: Presión de repulsión electrostática interfacial de la burbuja

$P_v [atm]$: Presión de vapor

$p_A [atm]$: Presión parcial del gas

$P_{el} [W]$: Potencia eléctrica

$\phi \left[\frac{m^3\ gas}{m^3\ min}\right]$: Requerimiento de gas

$Q \left[\frac{m^3}{h}\right]$: Caudal de gas

$\gamma \left[\frac{N}{m} \right]$: Tensión superficial.

$r [m]$: Radio de la burbuja.

$\rho_G \left[\frac{kg}{m^3} \right]$: Densidad del gas

$\rho_F \left[\frac{kg}{m^3} \right]$: Densidad del fluido

$\sigma \left[\frac{c}{m^2} \right]$: Densidad de carga superficial

$V_b [m^3]$: Volumen de una burbuja

$V_G [m^3]$: Volumen del gas

$V_L [m^3]$: Volumen del líquido

$V_B [m^3]$: Volumen total de un sistema de burbuja

$V_R [m^3]$: Volumen del reactor

$v_B \left[\frac{m}{s} \right]$: Velocidad de burbuja

$v_F \left[\frac{m}{s} \right]$: Velocidad del fluido

$\nu_{Agua} [Pa \cdot s]$: Viscosidad dinámica del agua

$T [K]$: Temperatura

$t [s]$: Tiempo

$x_A [mol]$: Fracción molar del gas en la fase líquida

$X \left[\frac{mg SSV}{L} \right]$: Concentración de biomasa

$\zeta [V]$: Potencial Zeta

$SAE \left[\frac{kg O_2}{kWh} \right]$: Eficiencia Energética de Aireación

$SOTE [\%]$: Eficiencia Estándar de Transferencia de O_2

$SOTR \left[\frac{kg O_2}{h} \right]$: Tasa Estándar de Transferencia de O_2

$OUR \left[\frac{kg O_2}{h} \right]$: Tasa de Consumo de O_2 de Microorganismos

$OTE [\%]$: Eficiencia de Transferencia de O_2 en Operación

$OTR \left[\frac{kg O_2}{h} \right]$: Tasa de Transferencia de O_2 en Operación

Contenido

1.	Introducción.....	9
2.	Caracterización y Generación de Burbujas Ultrafinas	11
2.1	Características Fundamentales del Sistema.....	11
2.1.1	Propiedades Físicas e Interfaciales.....	11
2.1.2	Dinámica y Mecanismos de Estabilidad.....	15
2.1.3	Propiedades del Medio	17
2.2	Factores que Afectan a la Generación de Burbujas Ultrafinas	19
2.3	Métodos de Generación de Burbujas Ultrafinas.....	22
2.3.1	Gas In Situ	23
2.3.2	Gas Disuelto	24
2.3.3	Gas Directo	25
2.4	Comparación entre Tecnologías de Aireación.....	28
3.	Aplicación de Burbujas Ultrafinas en Tratamiento de Aguas	33
3.1	Descripción General del Sistema de Tratamiento	33
3.2	Modelos de Transferencia de Oxígeno	33
3.2.1	Definición del Coeficiente de Transferencia de Materia.....	36
3.2.2	Carga Orgánica y Requerimiento Biológico de Oxígeno	37
3.3	Caso de Estudio	38
3.4	Simulación de Escenarios	39
3.4.1	Oxígeno Puro.....	40
3.4.2	Burbujas Ultrafinas de Oxígeno	41
3.5	Resultados.....	41
4.	Evaluación Técnica-Económica y Ambiental	43
4.1	Costos de Inversión (CAPEX).....	43
4.2	Costos Operacionales (OPEX)	43
4.3	Evaluación Costo-Beneficio de Implementación	43
4.4	Estimación de Reducción de Huella de Carbono	45
5.	Conclusiones y Recomendaciones.....	46
6.	Referencias	48
7.	Anexos	55

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1: Volumen y Área Total de un Sistema de Burbujas	11
Ecuación 2: Diámetro de Sauter.....	12
Ecuación 3: Área Interfacial Específica de Burbuja	12
Ecuación 4: Fracción de Retención Gaseosa	12
Ecuación 5: Área Interfacial Específica referida al volumen de líquido	12
Ecuación 6: Velocidad de Ascenso según la Ley de Stokes	12
Ecuación 7: Presión Interna según Young-Laplace	13
Ecuación 8: Potencial Zeta.....	14
Ecuación 9: Presión de Repulsión.....	15
Ecuación 10: Flujo de Gas	16
Ecuación 11: Ley de Henry.....	18
Ecuación 12: Fracción Molar de Oxígeno Disuelto.....	18
Ecuación 13: Balance de Presiones Interfaciales.....	19
Ecuación 14: Número de Reynolds.....	20
Ecuación 15: Número de Weber	20
Ecuación 16: Número de Cavitación	20
Ecuación 17: Energía Específica.....	23
Ecuación 18: Eficiencia Energética Estándar de Aireación.....	30
Ecuación 19: Primera Ley de Fick.....	34
Ecuación 20: Ley de Fick para Sistema Estacionario.....	34
Ecuación 21: Flujo Molar Absoluto.....	34
Ecuación 22: Flujo Oxígeno	34
Ecuación 23: Transferencia de Masa Líquido-Gas	35
Ecuación 24: Coeficiente de Transferencia de Masa Volumétrico.....	35
Ecuación 25: Transferencia de Oxígeno en Aguas Residuales.....	35
Ecuación 26: Tasa de Consumo de Oxígeno	35
Ecuación 27: Modelo de Monod.....	35
Ecuación 28: Balance en Estado Estacionario	36
Ecuación 29: Capacidad de Transferencia de Oxígeno en Estado Estacionario.....	36
Ecuación 30: Coeficiente de Transferencia de Materia Corregido	37
Ecuación 31: Concentración de Saturación Corregida	37
Ecuación 32: Carga Orgánica	38
Ecuación 33: Remoción de Carga Orgánica	38
Ecuación 34: Requerimiento de Oxígeno	38
Ecuación 35: Requerimiento de Gas.....	39
Ecuación 36: Ecuación de Van der Waals	56
Ecuación 37: Efecto de la Temperatura sobre la Transferencia de Oxígeno.....	56
Ecuación 38: Potencia Eléctrica.....	59
Ecuación 39: Potencia Mecánica del Agitador	59
Ecuación 40: Potencia Hidráulica	59
Ecuación 41: Tasa Estándar de Transferencia de Oxígeno.....	59
Ecuación 42: Tasa Real de Transferencia de Oxígeno	59
Ecuación 43: Eficiencia Estándar de Transferencia de Oxígeno	59
Ecuación 44: Eficiencia de Transferencia en Operación	59
Ecuación 45: Eficiencia Estándar de Aireación.....	59

Índice de Figuras

Figura 1: Clasificación de las Burbujas.	11
Figura 2: Presión Interna de Burbuja en función del Diámetro de Burbuja	13
Figura 3: Potenciales Químicos del Gas de una burbuja según el Modelo de Equilibrio Dinámico.	17
Figura 4: Métodos de Generación de UFB	22
Figura 5: Diagrama de Proceso Simplificado y lugar de Evaluación	39
Figura 6: Cavitación por Burbujeo y Cavitación en Lámina producida por Despresurización.	57
Figura 7: Diagrama de la Cavitación en un Tubo Venturi.	57
Figura 8: Izq. Diagrama de Cavitación de mecanismo de vórtice.	57
Figura 9: Der. Diagrama de Vórtice tipo Swirl.....	57
Figura 10: Izq. Inyección de Gas con Flujo en bucle.....	58
Figura 11 Der. Inyector de Gas tipo “Flow Focusing”.	58
Figura 12: Generación de UFB con Inyección de Gas en un Lazo de Recirculación.....	58
Figura 13: Izq. Formación de burbujas en los poros de membranas.....	58
Figura 14: Der. Sistema de Inyección de Gas con Membrana.....	58
Figura 15: Diagrama de Flujo Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales por Lodos Activados.	61

Índice de Tablas

Tabla 1: Clasificación de Surfactantes Utilizados en la Estabilización de UFB	21
Tabla 2: Coeficiente de Transferencia de Materia según el Método de Generación UFB.	29
Tabla 3: Energía Específica de Métodos Experimentales.....	29
Tabla 4: Energía Específica de Sistemas Continuos.....	30
Tabla 5: Comparación de tecnologías UFB según eficiencia energética estándar de aireación (SAE)..	30
Tabla 6: Ventajas, limitaciones y aplicaciones de cada método de generación de UFB	31
Tabla 7: Coeficiente de Transferencia de Masa según diferentes Modelos de Transferencia.	36
Tabla 8: Coeficiente de Transferencia Volumétrico Corregido.....	37
Tabla 9: Escenarios y Condiciones por Reactor	39
Tabla 10: Resultados en el Reactor Biológico según Escenarios	41
Tabla 11: Síntesis de Indicadores Económicos por Escenario.....	44
Tabla 12: Propiedades del Oxígeno	55
Tabla 13: Constante de Solubilidad de Henry para diversos Gases.....	55
Tabla 14: Solubilidad del O ₂ según Temperatura.	55
Tabla 15: Propiedades del Agua a 20 [°C] y 1 [atm].....	56
Tabla 16: Presión Interna [atm] según Tensión Superficial.....	56
Tabla 17: Datos Reactor Aeróbico Biológico	60
Tabla 18: Parámetros Base del Caso de Estudio.....	60
Tabla 19: Descripción y Caudal [m ³ /h] de las Corrientes en cada Escenario.....	60
Tabla 20: Estimación Costos de Equipos de la Planta Caso Base	62
Tabla 21: Estimación CAPEX por Método de Generación de Burbujas Ultrafinas	62

1. Introducción

“En los sistemas de tratamiento de aguas residuales, el proceso de aireación puede consumir entre el 50 % y el 90 % de la electricidad utilizada por una planta de tratamiento” (Drewnowski, Remiszewska-Skwarek, Duda, & Łagód, 2019). Esta elevada demanda se debe a la limitada eficiencia de transferencia de oxígeno de los sistemas de aireación convencionales, donde el rápido ascenso de burbujas de tamaño milimétrico reduce el tiempo efectivo de contacto.

Dado que la cinética de transferencia de oxígeno está gobernada por el tamaño de burbuja y el coeficiente volumétrico de transferencia ($K_L a$), la tecnología de burbujas ultrafinas (*Ultra Fine Bubbles*, UFB) surge como una alternativa para superar esta limitación. Su reducido diámetro, alta área interfacial, elevada presión interna y estabilidad en suspensión favorecen una oxigenación más eficiente y sostenida, disminuyendo la intensidad requerida de operación de los sistemas de aireación convencionales.

El desarrollo de esta tecnología posee una base científica consolidada desde mediados del siglo XX, con el registro de patentes tempranas asociadas a aerosoles y microgotas, y un crecimiento sostenido de la producción científica. El término *fine bubbles* se introduce formalmente en 1975, acumulando más de 5.000 publicaciones científicas (Web of Science, 2024). A nivel internacional, la estandarización de esta tecnología comienza con la creación del comité ISO/TC 281 *Fine Bubble Technology* en 2013. Japón ha liderado este proceso con la formación de la *Fine Bubble Industries Association* (FBIA) en 2017, consolidando su implementación comercial y normativa.

La existencia de un marco normativo común ha permitido la incorporación progresiva de las UFB en distintos sectores. Entre ellos, el tratamiento de aguas residuales destaca por la relevancia la calidad del efluente tratado depende directamente del desempeño de los procesos de remoción biológica, particularmente en lo que respecta a la degradación de materia orgánica. Tecnologías aerobias como los lodos activados, los reactores secuenciales por lotes (SBR) y los sistemas de aireación extendida requieren un suministro continuo y controlado de oxígeno para sostener la actividad metabólica de la biomasa responsable de estos procesos. Cuando la aireación es insuficiente o ineficiente, se produce una disminución de las tasas de remoción, inestabilidades operacionales y un deterioro de la calidad del efluente, comprometiendo el cumplimiento de los límites normativos de descarga.

La cobertura del tratamiento de aguas residuales domésticas en Chile es del 99.97% en áreas urbanas. Como consecuencia, es el país con la mayor cobertura de saneamiento en Latinoamérica, siendo los sistemas de lodos activados la tecnología de tratamiento de aguas residuales más utilizada (60%) (Abello-Passteni et al., 2020).

Desde el punto de vista normativo, en Chile la descarga de residuos líquidos industriales se encuentra regulada por el Decreto Supremo N°90/2000, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, el cual establece límites máximos permisibles para distintos contaminantes en función del cuerpo receptor. Si bien esta normativa no define un valor mínimo de oxígeno disuelto al interior de los sistemas de tratamiento, el adecuado control de este parámetro constituye una condición operativa clave para garantizar la actividad metabólica de la biomasa, la remoción eficiente de contaminantes y, en consecuencia, el cumplimiento de los requisitos de calidad del efluente. En procesos aerobios como los lodos activados, este control se logra típicamente manteniendo concentraciones de oxígeno disuelto entre 2 y 4 mg/L.

Sobre esta base, la presente investigación se orienta al análisis del consumo energético y el costo operacional del proceso de aireación en un sistema de lodos activados, considerando un caso base con aireación tradicional. A partir de este escenario, se evalúa el efecto del uso de oxígeno puro y de la incorporación de burbujas ultrafinas como estrategias para mejorar la transferencia de oxígeno, analizando el impacto del tamaño de burbuja sobre el coeficiente volumétrico de transferencia y su potencial como herramienta de optimización energética.

Objetivo General

Evaluar el desempeño técnico-económico de la tecnología de burbujas ultrafinas (UFB) como alternativa a los difusores convencionales en sistemas de aireación biológica de lodos activados.

Objetivos Específicos

- Comparar tecnologías de generación e inyección de UFB considerando eficiencia energética y de transferencia.
- Modelar el coeficiente de transferencia de materia y rendimiento de O_2 en reactores con distintos escenarios operacionales.
- Simular escenarios operacionales de aireación convencional y con UFB, evaluando el consumo de gas y el gasto eléctrico del sistema.
- Evaluar la viabilidad económica y ambiental de la implementación de UFB mediante un análisis de CAPEX, OPEX y reducción de emisiones de CO_2 equivalente.

2. Caracterización y Generación de Burbujas Ultrafinas

2.1 Características Fundamentales del Sistema

2.1.1 Propiedades Físicas e Interfaciales

- *Tamaño y Área Interfacial de Burbuja*

Según la norma internacional ISO 20480-1:2017, perteneciente a la serie ISO/TC 281 sobre tecnologías de burbujas finas, las burbujas se clasifican en función de su diámetro en estado estático (reposo), el cual se mide en micrómetros (μm) o nanómetros (nm), dependiendo del tamaño. La clasificación aceptada incluye burbujas convencionales ($> 100 \mu m$), burbujas finas ($0.01 - 100 \mu m$), microburbujas ($1 - 100 \mu m$) y burbujas ultrafinas (UFB) ($< 1 \mu m$) (International Organization for Standardization, 2017):

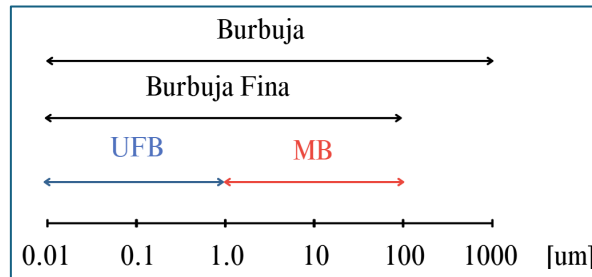


Figura 1: Clasificación de las Burbujas.

Adaptación: (International Organization for Standardization, 2017)

En microburbujas y macroburbujas el tamaño puede medirse ópticamente, pero en UFB presentan un comportamiento similar al de partículas coloidales.

El tamaño de burbujas de escala nanométrica en suspensión se mide mediante dispersión dinámica de luz (DLS) o análisis de seguimiento de nanopartículas (NTA). Ambas técnicas determinan el tamaño de la burbuja a través de la ecuación de Einstein–Stokes, basada en la teoría del movimiento browniano. (Zhou et al., 2024)

El volumen y el área superficial total de un sistema disperso de burbujas pueden expresarse como la suma de las contribuciones individuales:

Ecuación 1: Volumen y Área Total de un Sistema de Burbujas

$$V_B = \sum \frac{n_i \cdot \pi \cdot d_i^3}{6} \quad A_B = \sum n_i \cdot \pi \cdot d_i^2$$

Para calcular el tamaño medio representativo del conjunto, se suele utilizar el diámetro medio de Sauter (d_{32}), definido como la razón entre el tercer momento (volumen) y el segundo momento (superficie) de la función de distribución en número de tamaños de burbuja:

Ecuación 2: Diámetro de Sauter

$$d_{32} = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2}$$

A partir de este parámetro, se define la superficie interfacial específica, referida a cuánta superficie de burbuja hay disponible por unidad de volumen (Treybal, 1988):

Ecuación 3: Área Interfacial Específica de Burbuja

$$a = \frac{6\epsilon_G}{d_{32}}$$

Por ende, mientras más pequeñas son las burbujas, mayor es el área interfacial específica. Se considera ϵ_G como la fracción de retención gaseosa o *Holdup* del gas, refiriéndose a la proporción de volumen ocupada por el gas (las burbujas) en el sistema:

Ecuación 4: Fracción de Retención Gaseosa

$$\epsilon_G = \frac{V_G}{V_T} = \frac{V_G}{V_L + V_G}$$

Cuando el área interfacial específica se expresa por unidad de volumen de líquido, es decir, considerando únicamente el volumen efectivamente disponible para la transferencia de masa, resulta necesario introducir una corrección asociada a la fracción utilizada:

Ecuación 5: Área Interfacial Específica referida al volumen de líquido

$$a = \frac{6\epsilon_G}{d_{32} \cdot (1 - \epsilon_G)}$$

Por tanto, a menor tamaño de burbuja, mayor área de contacto por unidad de volumen de líquido en el reactor.

Para un sistema clásico de aireación, con burbujas de 3 [mm] y fracción de retención gas al 5% se obtiene $a_{Base} = 105 [m^2/m^3]$. Mientras que al considerar un sistema ideal con fracción 10% y burbujas de 1 [μm], se obtiene $a_{UFB ideal} = 666\,667 [m^2/m^3]$, un valor 6333 veces superior al sistema convencional. Este valor representa un límite ideal, alcanzable únicamente bajo condiciones altamente idealizadas de generación y estabilidad de burbujas.

- *Comportamiento Hidrodinámico*

El tamaño de burbuja también influye directamente en su comportamiento hidrodinámico. La velocidad de ascenso de una burbuja esférica en un medio viscoso puede describirse, para regímenes laminares, mediante la literatura clásica (Stokes, 1851):

Ecuación 6: Velocidad de Ascenso según la Ley de Stokes

$$v_B = \frac{d^2(\rho_L - \rho_G)g}{18\mu_F}$$

Si consideramos despreciable la densidad del gas respecto al agua, la velocidad terminal de ascenso para una UFB de diámetro de un micrón es de 542 [nm/s]. “Estas velocidades de ascenso extremadamente bajas significan que el efecto de la flotabilidad sobre las UFB es insignificante en comparación con el movimiento browniano” (Alheshibri & et al., 2016). “Esto implica que las UFB están dominadas por un movimiento aleatorio en todas las direcciones, en comparación con el movimiento ascendente” (Yasuda, 2024).

Si bien las UFB presentan una mayor área interfacial específica, su dinámica está dominada por movimientos lentos y aleatorios, lo que favorece su permanencia en el líquido y su transporte pasivo con el fluido.

- *Presión Interna*

Se representa clásicamente mediante la ecuación de Young–Laplace, que describe la presión interna que existe dentro de una burbuja debido a la curvatura de su superficie, la cual depende tanto de la tensión superficial, como del radio de la burbuja:

Ecuación 7: Presión Interna según Young-Laplace

$$P_{int} = P_{ext} + \frac{2\gamma}{r}$$

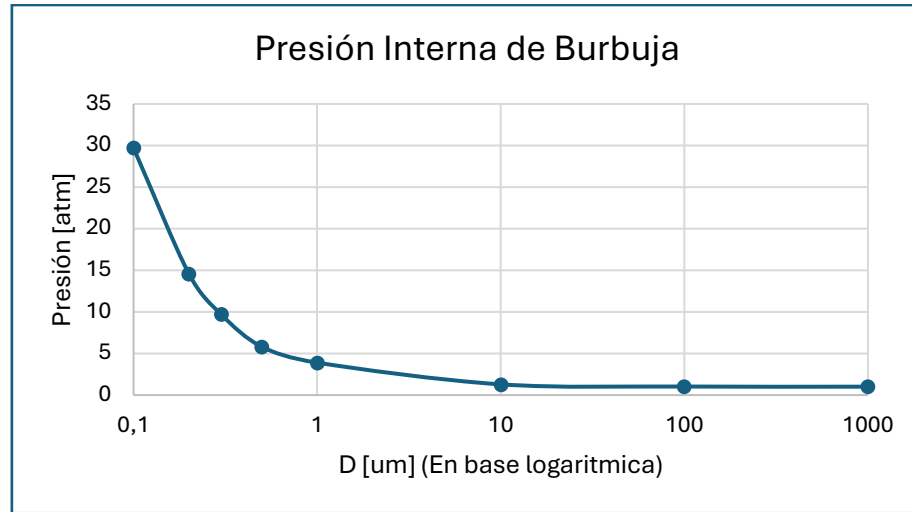


Figura 2: Presión Interna de Burbuja en función del Diámetro de Burbuja
Adaptación: (Estados Unidos Patente n° US20230302462, 2023)

“Según la ecuación de Young-Laplace, la presión de una burbuja de 1 [μm] es de 3.9[atm], a 20 °C” (Li, Takahashi, & Chiba, 2009). A medida que el radio disminuye, la presión interna aumenta y eleva la concentración de equilibrio del gas en la interfaz, generando un gradiente que impulsa su disolución hacia el líquido. “En agua pura, la presión estimada por la ecuación

de Young–Laplace dentro de una burbuja de 100 [nm] de diámetro es cercana a 30 [atm], por lo tanto, según la teoría de Epstein y Plesset, la burbuja debería disolverse en un tiempo del orden de 10 [μs]” (Nirmalkar, Pacek, & Barigou, 2018). Esto implica una paradoja frente a la estabilidad prolongada.

No obstante, observaciones experimentales reportan la persistencia de burbujas ultrafinas durante horas o días, lo que indica que la disolución no ocurre de forma inmediata. Esta aparente contradicción se explica mediante la existencia de un equilibrio dinámico de flujos de gas o condiciones locales de saturación interfacial, que compensan parcialmente el gradiente difusivo impuesto por la presión interna elevada

Por otra parte, la presión depende del valor efectivo de la tensión superficial en el medio, la cual corresponde a la “fuerza por unidad de longitud en el plano de la interfaz entre un líquido y un gas, que resiste un aumento del área de esa superficie” (Lide, 2003), capaz de determinar el nivel de cohesión en la interfaz gas-líquido, actuando como una fuerza que resiste la fragmentación. En “agua pura a 25 °C, se tiene un valor de 0.072 [N/m]” (Lide, 2003).

“La materia orgánica y los surfactantes presentes en las aguas residuales pueden causar variaciones en la tensión superficial del agua residual, con valores que oscilan entre aproximadamente 40 y 70 [mJ · m⁻²]” (Zhang et al. X. , 2018). Una disminución en la tensión superficial reduce parcialmente la presión calculada. No obstante, siguen siendo valores muy elevados, lo que indica que Young–Laplace describe bien la relación radio–presión pero no basta para explicar su estabilidad.

- *Carga Superficial*

Las UFB presentan carga superficial negativa inherente, atribuida a la orientación molecular en la interfaz gas-líquido, la adsorción preferencial de iones OH⁻ y la presencia de especies orgánicas o surfactantes generan una capa hidrofóbica. Esta propiedad no se mide directamente, sino que se infiere mediante el potencial zeta, determinado desde la movilidad electroforética según la ecuación de Smoluchowski (Takahashi, 2005):

Ecuación 8: Potencial Zeta

$$\zeta = \frac{v_{\text{Agua}} \cdot \epsilon}{\epsilon}$$

Se ha documentado que, “aun sin añadir electrolitos ni surfactantes, las UFB se cargan negativamente con un potencial promedio de −35 [mV], en agua destilada con pH=5.8” (Takahashi, 2005). En sistemas acuosos, un valor absoluto de |ζ| > 30 [mV] se considera indicativo de buena estabilidad coloidal. Tanto las UFB como los coloides pueden presentar alto potencial zeta, sin embargo, en coloides, la estabilidad deriva de su naturaleza orgánica, mientras que en UFB surge de interacciones interfaciales.

La existencia de la carga superficial genera una doble capa eléctrica (EDL) alrededor de la burbuja, cuyo espesor característico se describe mediante la longitud de Debye (λ_D), que depende del pH, del tipo de gas y de la composición iónica del medio. “En agua desionizada se reporta $\lambda_D = 300 [nm]$ para pH=6 en burbujas de N_2, O_2 y Ar , $\lambda_D = 140 [nm]$ a pH=4.2, y $\lambda_D = 70 [nm]$ para pH=4.7 en burbujas de CO_2 ” (Zhou et al., 2021).

Desde un punto de vista interfacial, la carga eléctrica distribuida en la EDL puede caracterizarse mediante la densidad de carga superficial (σ), definida como la carga eléctrica efectiva por unidad de área de la interfaz gas-líquido. “El rango de densidad de carga, así como de carga superficial de UFB es de $\sigma = 0.0022 - 0.036 [C \cdot m^{-2}]$ y $Q_s = 0.8 \times 10^{-15} - 5.2 \times 10^{-15} [C]$ ” (Zhang et al. H. , 2020).

En el marco de la teoría DLVO (Landau–Verwey–Overbeek), dichas fuerzas electrostáticas se contraponen a las interacciones atractivas de Van der Waals, proporcionando un marco conceptual para analizar la estabilidad coloidal. Aunque esta teoría fue desarrollada originalmente para partículas sólidas, su enfoque ha sido extendido al estudio de UFB.

La presión repulsiva interfacial depende tanto de la densidad de carga, como de la permitividad eléctrica absoluta del medio, definida como el producto de la permitividad de vacío (ϵ_0) y la permitividad relativa del agua (ϵ_r). Se tiene la relación (Nirmalkar et al., 2018):

Ecuación 9: Presión de Repulsión

$$P_{rep} = \frac{2\pi\sigma^2}{\epsilon}$$

A partir de estos valores, se estima un rango de presión de repulsión electrostática se estima un rango de presión de repulsión de $0.4 - 113 [atm]$ para los valores anteriores. Al estimar $\sigma = 0.02 [C \cdot m^{-2}]$ se obtiene una repulsión electrostática de $35 [atm]$ en agua pura.

Este orden de magnitud es consistente con análisis recientes que muestran que las fuerzas repulsivas interfaciales asociadas a la doble capa eléctrica pueden generar presiones comparables a la presión de Young–Laplace. “Estas fuerzas actúan en direcciones opuestas y, por lo tanto, pueden compensarse entre sí” (Dukhin & Renliang, 2024).

2.1.2 Dinámica y Mecanismos de Estabilidad

Desde una perspectiva interfacial, diversos modelos han sido propuestos para explicar la estabilidad observada de las UFB. Entre ellos, el modelo de separación de fases por hidrofobicidad plantea un entorno donde el gas permanece atrapado sin disolverse completamente en el líquido circundante. Este efecto puede reforzarse por la presencia de una capa de permeabilidad variable que recubre parcialmente la burbuja, actuando como barrera difusiva que restringe el flujo de gas hacia el medio acuoso. De manera similar, el modelo de

capa acorazada plantea que la adsorción de surfactantes y partículas sólidas en la superficie de la burbuja reduce el área interfacial efectiva y conduce al aplanamiento de la interfaz.

No obstante, la evidencia experimental indica un aumento sostenido del oxígeno disuelto en el medio acuoso, lo que implica necesariamente la existencia de un gradiente de concentración entre la burbuja y su entorno. Esto sugiere que la estabilidad de las UFB se explica mediante modelos donde el transporte de masa sigue ocurriendo, de manera moderada y controlada.

En este contexto, el modelo de apantallamiento por clústeres propone que las UFB pueden agruparse formando cúmulos donde las burbujas se protegen mutuamente. Esto reduce la superficie expuesta al líquido y ralentiza la disolución individual, ya que el medio intersticial puede saturarse con gas antes de que ocurra el drenaje completo.

Los clústeres pueden ser estables si las burbujas individuales están rodeadas por burbujas similares, la distancia entre ellas debe ser lo suficientemente pequeña como para que logren saturar con gas el líquido que las separa antes de que se drenen por completo (Weijs et al., 2012).

Como consecuencia de este apantallamiento colectivo, la superficie interfacial disponible se reduce, lo que se traduce en una disminución de al menos un 10 % de la fracción gaseosa efectiva. Aun así, el área interfacial resultante se mantiene varios órdenes de magnitud por encima de la correspondiente a sistemas de aireación convencionales (~6 000 veces superior).

Complementariamente, el modelo de equilibrio dinámico explica que las UFB intercambian oxígeno de manera continua con el medio acuoso, alcanzando un estado metaestable en el que la burbuja persiste gracias a un balance dinámico de flujos. Plantea que las UFB pueden “aumentar o disminuir de tamaño (hincharse o contraerse) durante el proceso de disolución” (Yasui et al., 2016). El origen radica en el gradiente del potencial químico del gas cerca del borde hidrofóbico que favorece un flujo entrante de gas.

En términos de transporte, el flujo de gas en la interfase es impulsado por el gradiente del potencial químico total, que incluye el componente difusivo y el de atracción superficial:

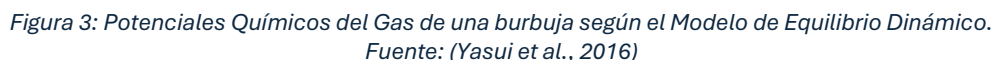
Ecuación 10: Flujo de Gas

$$J = -D_{gas}\nabla(\mu_Q)$$

“El gradiente de potencial químico se mantiene gracias al potencial de atracción permanente de un material hidrófobo hacia las moléculas de gas disueltas en agua líquida, por lo tanto, el suministro de gas no se interrumpe” (Yasui et al., 2016).

El modelo de equilibrio dinámico interpreta la estabilidad de las UFB como el resultado de un balance neto de flujos de gas. La presión interna de la burbuja favorece la difusión hacia el exterior, generando un flujo de salida. Sin embargo, la presencia de dominios hidrofóbicos próximos a la interfaz reduce el potencial químico del gas disuelto y produce un flujo de entrada

Por tanto, la estabilidad no depende de una presión interna reducida, sino de un proceso de renovación continua que equilibra difusión saliente e ingreso de gas, manteniendo el volumen de la burbuja mediante un intercambio constante de masa con el medio, modulado por fluctuaciones brownianas, tensión superficial y atracción interfacial.



La formación de UFB puede lograrse con distintos gases, pero su estabilidad y tiempo de permanencia dependen de la solubilidad y reactividad de cada uno.

Influye indirectamente en la flotabilidad y el comportamiento hidrodinámico de las burbujas. Sin embargo, en el caso de las burbujas ultrafinas, el reducido diámetro implica que el movimiento relativo respecto al fluido se encuentra dominado por fuerzas viscosas e interfaciales, más que por efectos de flotación asociados a la densidad del gas.

17

- *Solubilidad*

La solubilidad de un gas describe la cantidad de gas que puede disolverse en un líquido en equilibrio, y depende de la presión parcial del gas, la temperatura, y la naturaleza de ambas fases. En condiciones ideales, se describe mediante la Ley de Henry (Geankoplis, 1993):

Ecuación 11: Ley de Henry

$$p_A = H \cdot x_A$$

La constante de Henry para oxígeno a 20°C tiene un valor de $H_{O_2} = 4.01 \cdot 10^4 \text{ [atm/mol]}$ (Metcalf, 1996). Si se considera una burbuja de oxígeno puro, su presión parcial es equivalente a la presión impuesta en la interfaz, y su fracción molar viene dada por:

Ecuación 12: Fracción Molar de Oxígeno Disuelto

$$x_{O_2} = \frac{p_{O_2}}{H_{O_2}}$$

Para una burbuja de oxígeno puro con $p_{O_2} = 1 \text{ [atm]}$, se tiene $x_{O_2} = 2.49 \cdot 10^{-5} \text{ [mol]}$. Considerando una solución diluida de un litro de agua a 20°C, con una concentración molar de agua de 55.56 [mol/L] , se tienen $1.38 \cdot 10^{-3} \text{ [mol/L]}$ de oxígeno, al multiplicar por la masa molar del oxígeno, nos queda la solubilidad como $C_{s O_2} = 44 \text{ [mg/L]}$. Este valor equivale a la saturación en agua limpia con oxígeno puro, siendo aproximadamente cinco veces mayor que la solubilidad en equilibrio con aire, de $9.08 \text{ [mg } O_2/\text{L}]$, valor ampliamente utilizado como referencia de calidad, y superior al mínimo de $5 \text{ [mg } O_2/\text{L}]$ fijado por la normativa chilena para aguas superficiales (Instituto Nacional de Normalización, 1987).

- *Temperatura*

“En el rango de 15 °C a 50 °C, las UFB mantienen su estabilidad, sin cambios significativos en tamaño o número. Sin embargo, la estabilidad se pierde a 60 °C y durante la ebullición” (Kobayashi & Ushida, 2023). Esto se manifiesta como un aumento en el tamaño de burbuja y una fuerte disminución en su concentración.

Además, “se ha identificado que existe una temperatura óptima del sistema, en torno a los 35–40 °C, en la cual la nucleación de nanoburbujas se maximiza, siendo esta temperatura débilmente dependiente del tipo de gas utilizado”. (Limbeek & Seddon, 2011).

Por otra parte, en el contexto de aguas residuales, la temperatura tiene un efecto sobre el coeficiente de transferencia de materia, su relación se detalla en anexo.

- *Viscosidad*

Un aumento de la viscosidad incrementa la resistencia al movimiento relativo entre fases, reduciendo la intensidad de los gradientes de velocidad y atenuando los mecanismos de cavitación y fragmentación de burbujas.

En sistemas de aguas residuales, se puede ver incrementada por la presencia de sólidos finos y materia orgánica disuelta. Sin embargo, para efectos de este estudio, se considera para el agua residual urbana una viscosidad y densidad semejante al agua pura.

2.2 Factores que Afectan a la Generación de Burbujas Ultrafinas

- *Presión del Sistema*

La presión del líquido que rodea a la burbuja corresponde a la presión externa P_{liq} , determinada por la presión atmosférica, la contribución hidrostática asociada a la profundidad y eventuales sobrepresiones inducidas por bombas u otros dispositivos hidráulicos del sistema.

Debido a la elevada curvatura interfacial de las burbujas ultrafinas, el gas contenido en su interior se encuentra a una presión superior a la del líquido circundante. En ausencia de sobresaturación, esta diferencia de presión favorece la difusión del gas desde la burbuja hacia la fase líquida, explicando la tendencia natural a la disolución de burbujas de pequeño diámetro.

En este contexto, la estabilidad de las UFB puede interpretarse como un balance de presiones:

Ecuación 13: Balance de Presiones Interfaciales

$$P_{gas} - P_{liq} = \frac{2\gamma}{r} - P_{rep}$$

Cuando la contribución de la tensión superficial domina el balance, la burbuja tiende a encogerse. En cambio, cuando la presión de repulsión interfacial compensa la presión de Laplace, la burbuja puede persistir en un estado metaestable, e incluso crecer bajo condiciones de sobresaturación. En este régimen, las contribuciones interfaciales se encuentran equilibradas y el comportamiento de la burbuja queda principalmente gobernado por la presión del líquido en la interfaz, la cual integra la presión atmosférica, la componente hidrostática y eventuales sobrepresiones hidráulicas del sistema.

En este contexto, cuando el líquido contiene una concentración de gas disuelto superior a la correspondiente a la presión del sistema, se genera un estado de sobresaturación que reduce el gradiente de difusión entre el interior de la burbuja y el medio líquido. Bajo estas condiciones, las burbujas pueden persistir por tiempos mayores o incluso crecer.

Este estado de sobresaturación puede originarse de forma global o local. En particular, dispositivos como boquillas, tubos Venturi o sistemas de vórtice generan reducciones rápidas y localizadas de presión. Dado que la concentración de gas disuelto no se ajusta instantáneamente al nuevo equilibrio impuesto por estas condiciones locales, el líquido entra transitoriamente en un estado de sobresaturación, lo que favorece la nucleación y fragmentación de burbujas. Dependiendo del régimen hidráulico, esta liberación de gas disuelto puede manifestarse como:

- I. **Cavitación por Burbujeo:** El agua con gas disuelto pasa por una boquilla de descompresión, donde la reducción de presión genera burbujas de vapor y gas no condensable. Al recuperar presión, el vapor se condensa y el gas residual forma burbujas, cuya cantidad y tamaño aumentan con la concentración de gas disuelto.
- II. **Cavitación en Lámina:** Cuando el flujo se acelera intensamente al pasar por un estrechamiento, generando una lámina de vapor adherida a las paredes internas de la boquilla. Esta lámina colapsa al salir, fragmentándose en burbujas más pequeñas.

En el primer mecanismo el gas disuelto influye directamente, ya que predomina la sobresaturación, mientras que, en el segundo, el proceso está controlado por la dinámica del flujo y colapso de cavidades de vapor.

- *Turbulencia y Cavitación*

La ruptura de burbujas grandes ocurre a través de mecanismos como el cizallamiento, la cavitación y el colapso hidrodinámico. La transición del flujo laminar al turbulento en tuberías depende de la densidad y viscosidad del fluido y del diámetro del tubo, variables que se combinan en el número de Reynolds, que es adimensional (Geankoplis, 1993):

Ecuación 14: Número de Reynolds

$$Re_{Sistema} = \frac{d_{Tubo} \cdot v_{Tubo} \cdot \rho_F}{\mu_F} \quad Re_B = \frac{d_B \cdot v_B \cdot \rho_F}{\mu_F}$$

Un valor de Re sobre 10,000 indican un régimen de turbulencia plenamente desarrollado, condición necesaria para generar intensas fuerzas de cizallamiento capaces de fragmentar burbujas. Sin embargo, debido a la diferencia de escalas, una burbuja individual puede operar en un régimen local dominado por fuerzas viscosas, aun cuando el flujo global sea turbulento.

La estabilidad y la forma de las burbujas dependen del equilibrio local entre fuerzas inerciales y fuerzas interfaciales, el cual se describe mediante el número de Weber:

Ecuación 15: Número de Weber

$$We = \frac{\rho_F v_B d}{\gamma}$$

Valores bajos de We indican el predominio de la tensión superficial, limitando la deformación interfacial y favoreciendo geometrías estables. En particular, para diámetros inferiores a 1200 $[\mu m]$, las burbujas pueden considerarse esencialmente esféricas, operando en un régimen dominado por fuerzas viscosas. En este rango, el comportamiento hidrodinámico se aproxima al régimen de Stokes caracterizado por valores bajos de Reynolds y Weber ($Re_B \ll 0.1$; $We \ll 0.1$), donde las fuerzas inerciales resultan despreciables frente a la tensión superficial. Por otro lado, la propensión del sistema a desarrollar cavitación puede evaluarse con:

Ecuación 16: Número de Cavitación

$$C_a = \frac{P - P_v}{(\rho_F \cdot v_F^2)/2}$$

Este número indica la relación entre la presión disponible y las fuerzas inerciales en el fluido. Cuando C_a es bajo, entre 0.1 a 0.5, se incrementa la posibilidad de formación de núcleos de burbujas que posteriormente pueden fragmentarse hasta tamaños ultrafinos.

Cabe destacar, que la cavitación es un fenómeno asociado a la caída local de presión por debajo de la presión de vapor del líquido, que puede favorecer la fragmentación de burbujas, pero no constituye un método de generación en sí mismo. Cuando no se controla, puede provocar daños por erosión y vibraciones en los equipos, por lo que debe limitarse al diseño específico.

- *Presencia de Surfactantes en el Medio*

Se refiere a los agentes activos de superficie, compuestos por moléculas anfifílicas, las cuales presentan simultáneamente una cabeza hidrofílica (afín al agua) y una cola hidrofóbica (afín a compuestos orgánicos no polares). “En consecuencia, pueden solubilizarse tanto en disolventes orgánicos como en agua, debido a esta característica única, las moléculas de surfactante se orientan de manera distinta en diferentes disolventes” (Shah et al., 2022). Esta estructura dual les permite ubicarse en la interfase, formando una capa protectora, donde las cabezas polares hidrofílicas quedan orientadas hacia la fase acuosa, mientras las colas hidrofóbicas se introducen en el gas, formando micelas que reducen la tensión superficial.

Las moléculas de surfactante iónico no solo reducen la tensión superficial, sino que también promueven la acumulación de carga neta, lo que es beneficioso para la nucleación y estabilización de las UFB. “La adición de electrolitos resulta en una disminución del potencial zeta y de la concentración de UFB debido al efecto de apantallamiento iónico” (Ma et al., 2022). Se destaca el efecto provocado por los siguientes surfactantes:

Tabla 1: Clasificación de Surfactantes Utilizados en la Estabilización de UFB
Fuente: Elaboración Propia

Tipo	Ejemplo	Interacción con UFB
Aniónicos	Dodecil Sulfato de Sodio (SDS)	“A medida que aumenta la concentración del surfactante aniónico, se generan más UFB en las soluciones, presentando una distribución de tamaño más estrecha y un potencial zeta de mayor magnitud” (Ma et al., 2022).
Catiónicos	Cloruro de Cetilpiridinio (CPC), Cloruro de dodeciltrimetilamonio (DTAC)	“El potencial zeta de las UFB puede desplazarse hacia valores positivos, siempre que la suma de las cargas positivas de los cationes adsorbidos sea mayor que la suma de las cargas negativas en la superficie interna” (Nazari et al., 2022).
No Iónicos	Tween 20 (Polisorbato 20), Methyl isobutyl carbinol (MIBC)	“La adición de un surfactante no iónico no afecta la distribución del tamaño, la densidad numérica o la carga superficial de las nanoburbujas, pero se espera que proporcione una estabilización estérica a la suspensión” (Nirmalkar et al., 2018).

		Lo que implica una estabilización por impedimento físico y no por carga eléctrica.
Anfóteros	Betaínas	Tienen efectos intermedios entre catiónicos y aniónicos, ya que pueden estabilizar burbujas por interacciones duales.
Insolubles	Ácido Oleico, Aceite de Pino	“La adición de un surfactante insoluble en agua durante la formación reduce drásticamente las UFB” (Zhang et al., 2012)

Por otra parte, la dinámica de las burbujas es regulada por el efecto Marangoni.

A medida que una burbuja asciende en una solución acuosa con surfactante, éste es arrastrado desde la parte frontal y se acumula en la parte posterior, provocando una variación de la tensión superficial a lo largo de la superficie de la burbuja, lo que genera un esfuerzo cortante tangencial. (Takagi & Matsumoto, 2011).

Esta reducción de superficie disponible también implica una disminución en el área interfacial.

2.3 Métodos de Generación de Burbujas Ultrafinas

Existen diversas clasificaciones dependiendo del criterio aplicado: tipo de energía, forma de entrada del gas o mecanismos fisicoquímicos. Basándose en la forma de incorporación del gas al medio líquido, se logra agrupar en tres categorías principales. Las descripciones gráficas de cada método se encuentran en anexos.

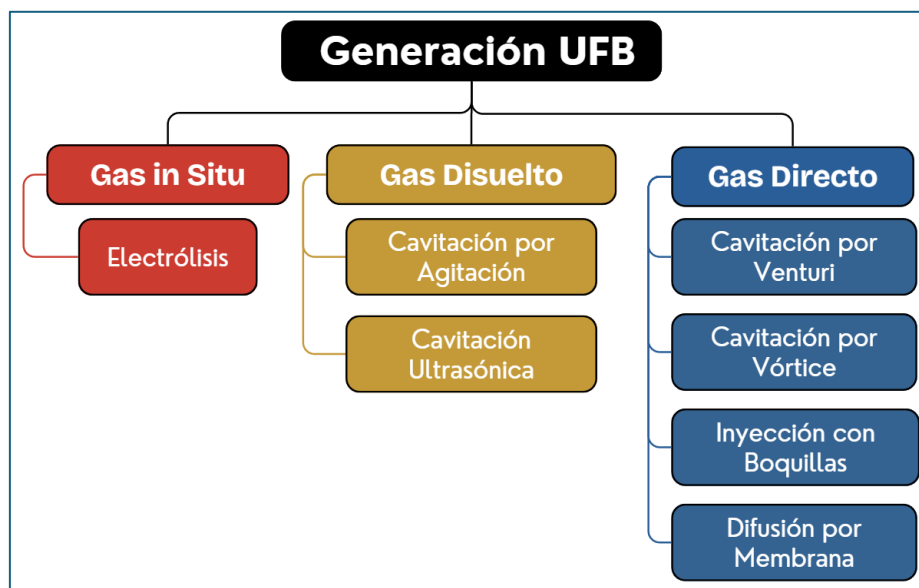


Figura 4: Métodos de Generación de UFB
Fuente: Elaboración Propia

La potencia asociada a cada método se determina a partir de expresiones propias de su principio de generación, desarrolladas en los anexos. Para el análisis energético, se cuantifica el consumo mediante la energía específica:

$$E^{\circ} = \frac{P \cdot t}{V}$$

Este indicador describe el requerimiento energético de cada principio, pero no considera la eficiencia de transferencia de oxígeno. Por ello, la comparación energética entre tecnologías se realiza mediante la eficiencia energética estándar de aireación (SAE), definida como la masa de oxígeno transferido por unidad de energía eléctrica consumida ($kg\ O_2/kWh$).

Dado que el SAE depende directamente de la eficiencia de transferencia de oxígeno, este parámetro no se evalúa a nivel individual de cada método, sino que se calcula posteriormente en la sección comparativa, una vez disponibles los valores del coeficiente de transferencia volumétrico $K_L a$. En este contexto, la energía específica se utiliza como un parámetro operativo intermedio, mientras que el SAE constituye el criterio principal de comparación energética.

2.3.1 Gas In Situ

Diversas reacciones pueden liberar gases, para el oxígeno se tiene la descomposición de peróxidos, cloratos, nitratos, la fotosíntesis o los procesos de Fenton, pero solo la electrólisis genera UFB de forma directa, al formar y dispersar el oxígeno en el propio medio líquido bajo control eléctrico. En este sistema no existe inyección de gas externo.

- *Electrólisis*

Proceso donde el paso de una corriente eléctrica directa a través de una solución electrolítica induce una reacción de reducción en el cátodo, que provoca la liberación de moléculas de gas H_2 , de manera similar, la oxidación del grupo hidroxilo OH^- da lugar a la formación de moléculas de gas O_2 (Jadhav & Barigou, 2021).

El proceso puede desarrollarse en celdas electrolíticas indivisibles, donde ambos gases se producen en la misma cámara, o en celdas divididas mediante membrana o diafragma, permitiendo su separación. Pueden emplearse soluciones electrolíticas ácidas, neutras o alcalinas, siendo la naturaleza del electrolito un factor crítico en la estabilidad coloidal.

“Los parámetros operativos influyen en la eficacia de la generación de UFB, pero tienen poco efecto en el tamaño medio de la burbuja, que suele ser del orden de 100 [nm]” (Jadhav & Barigou, 2021). Estas burbujas se producen durante una hora en un volumen de 250 [mL], con una fuente de corriente continua de 30 [V] y 10 [A]. Esto equivale a una potencia de 300 [W], y una energía específica de 1200 [kWh/m^3].

“El método de flotación consiste en la introducción de burbujas en pulpas de mineral, en las cuales las partículas objetivo se adhieren selectivamente a las burbujas y ascienden a la superficie, desbordando la celda de flotación hacia la canaleta de rebose” (Tadesse et al., 2018).

Así, aumenta la captura de partículas finas o coloidales en procesos de electro-flotación y recuperación de materiales.

2.3.2 Gas Disuelto

Estos mecanismos no requieren inyección directa de gas, pero dependen de la presencia de gas en el líquido. La aplicación de gradientes intensivos de energía mecánica o acústica genera fluctuaciones de presión en el líquido, lo que induce cavitación y nucleación de burbujas a partir del gas disuelto. En sistemas reales, el estado de saturación del gas puede variar localmente, generando zonas parcialmente sobresaturadas, que facilitan la nucleación y formación de UFB, aun cuando la concentración promedio de oxígeno sea baja.

- *Agitación Mecánica*

Utiliza un impulsor de alta velocidad en presencia de deflectores induce zonas de baja presión y una agitación intensa, generando cavitación hidrodinámica. El aumento de la velocidad de agitación intensifica la cavitación, expande la zona de nucleación y permite la formación de burbujas submicrométricas.

Un ejemplo corresponde a un rotor estator, o bien, celda de agitación de alta intensidad con deflectores BHIA (*Baffled High Intensity Agitation Cell*), recipiente cilíndrico hermético completamente lleno de solución, dentro del cual un impulsor de alta velocidad gira en presencia de deflectores internos. La interacción entre el impulsor y los deflectores genera fuertes gradientes de velocidad y zonas locales de baja presión, produciendo cavitación hidrodinámica a partir del gas disuelto sin entrada de gas externo.

“El tamaño promedio disminuye de 734 a 287 [nm] al aumentar la velocidad de agitación de 500 a 2500 [rpm], lo que equivale a un aumento en el consumo de energía de 28 [kWh/m³]” (Wu et al., 2012). El aumento de la velocidad de agitación reduce el tamaño promedio de burbuja a cambio de un alto consumo energético.

- *Cavitación Ultrasónica*

Cuando una partícula gaseosa presente en un líquido es sometida a ondas ultrasónicas, experimenta ciclos alternados de expansión y compresión debido a las oscilaciones de presión. Bajo ciertas condiciones, especialmente a baja frecuencia y alta potencia, la burbuja puede crecer rápidamente durante la fase de baja presión (expansión) y colapsar violentamente durante la fase de alta presión (compresión). Si el colapso es suficientemente intenso, se favorece la fragmentación de burbujas mayores y la formación de UFB.

“Existen dos tipos principales de cavitación: la estable, en la que las burbujas oscilan durante muchos ciclos sin colapsar, y la transitoria, caracterizada por un colapso repentino e intenso” (Bu & Alheshibri, 2021). Este último régimen puede fragmentar las burbujas más grandes, generando nuevas burbujas a escala nanométrica, especialmente a baja frecuencia y alta

potencia. Se reporta que entre 22 a 43 [kHz] se obtiene una mayor concentración de UFB (Yasuda et al, 2019).

En líquidos con una alta densidad de núcleos de nucleación, ya sea por temperatura elevada o heterogeneidades en el medio, se incrementa la generación de burbujas pequeñas y se reduce el crecimiento excesivo por difusión rectificada (Lee & Kim, 2022).

A mayor temperatura, se generan más sitios de nucleación, lo que promueve burbujas pequeñas y colapsos intensos. En cambio, a baja temperatura, hay menos núcleos y mayor crecimiento por difusión, reduciendo la frecuencia del colapso.

“Para generar burbujas de 100-300 [nm] en un volumen de 300 [mL] se irradia con ultrasonido durante 2 minutos a 20 [kHz] y 1100 [W] utilizando un transductor ultrasónico tipo piezoeléctrico” (Lee & Kim, 2022). Equivalente a 122 [kWh/m³].

Lograr un control preciso en este método requiere el uso de equipos especializados para ajustar con exactitud parámetros críticos como la frecuencia y potencia ultrasónica.

2.3.3 Gas Directo

Implica optimizar la eficiencia de formación y la estabilidad de las UFB mediante la introducción controlada de una fase gaseosa externa en el medio líquido. Utiliza gradientes intensos de presión, flujos rotacionales y turbulencia localizada para promover la fragmentación del gas inyectado, permitiendo diversas configuraciones.

Sin embargo, este tipo de sistemas presenta un costo adicional, tanto por el gas inyectado, como por la energía asociada al motor y la bomba de impulsión.

- *Cavitación Hidrodinámica tipo Venturi*

Cuando el fluido atraviesa la sección estrecha del Venturi, su velocidad aumenta y la presión disminuye por debajo de la presión de saturación del líquido, creando una zona de baja presión que permite la succión del gas, esto provoca su liberación en la fase líquida, formando burbujas. A medida que la presión aumenta nuevamente, el vapor de agua dentro de las burbujas se condensa, dejando burbujas estables de gases no condensables. Al controlar la velocidad del caudal tanto de agua como de aire, se pueden obtener las configuraciones óptimas para la formación de burbujas.

Los parámetros de diseño para la optimización incluyen la relación del diámetro de entrada y el diámetro de la garganta para el tubo Venturi (D_{in}/D_t), la relación de la longitud de la garganta y el diámetro de la garganta (L_t/D_t), y los ángulos de entrada y salida (Xiong & Peng, 2015).

Un Venturi de una garganta de 50 mm de diámetro operando con caudales entre 4 y 8 [m³/h], tiene una caída de presión suficiente para inducir cavitación natural. Se alcanza una fracción de vacío de aproximadamente 0.3%, y las burbujas generadas presentan un diámetro medio de Sauter (d_{32}) de 30 [μm] (J. Yin, 2023).

La incorporación de aire al sistema Venturi resulta clave para incrementar la cantidad total de oxígeno disponible y mejorar la fragmentación del gas. Estudios reportan resultados de DLS en una suspensión saturada con oxígeno, donde “se generan burbujas con un tamaño medio de 190 [nm], presentando una distribución bimodal estándar, cuyos picos se ubicaron alrededor de 59 [nm] y 223 [nm]” (Li et al, 2021). A partir de los parámetros hidráulicos reportados por este último estudio, y aplicando las relaciones de potencia hidráulica, se obtiene una potencia de 332 [W], y suponiendo un rendimiento de 40% para la bomba y motor adicional, se obtiene una potencia eléctrica de 829 [W], equivalente a 0.21 [kWh/m³].

- *Cavitación Hidrodinámica tipo Vórtice*

Se induce una rotación intensa del fluido, generando una zona de presión negativa en el eje del remolino, dando origen a un flujo helicoidal inmerso en una estructura central tipo cónica. Esta región de baja presión permite la succión del gas hacia el núcleo del vórtice, donde es fragmentado por altos gradientes de velocidad, cizalla turbulenta y aceleración tangencial.

La estructura geométrica optimizada consiste en una cavidad anular externa de suministro de vórtice y una cavidad interna de reacción de cavitación de diámetro variable. El líquido es impulsado a alta velocidad hacia la cámara externa, donde al chocar con la placa cónica, fluye de manera circunferencial, generando un vórtice estable en la parte externa del generador. A medida que el flujo se mantiene, el líquido se redirige a través de una placa deflectora e ingresa tangencialmente a la cavidad de reacción interna, formando un flujo acelerado. En el centro del vórtice se genera una zona de presión negativa, permitiendo la succión de aire a través de la entrada de gas, el cual se fragmenta bajo la turbulencia.

Al analizar parámetros clave como la velocidad de salida, la energía cinética turbulenta, la presión estática y la distribución del tamaño de burbujas, se logra optimizar el diseño del generador. Se reporta que “el 75 % de los diámetros de las burbujas fueron inferiores a 5 [μm], y un 25 % entre 5 y 10 [μm], el diámetro promedio y el diámetro mínimo fueron de 0.31 [μm] y 3.42 [μm], respectivamente” (Hu et al., 2023). Por tanto, esta configuración es capaz de generar burbujas finas, más no burbujas ultrafinas.

No obstante, variantes más avanzadas de este mismo principio hidráulico han demostrado que, al intensificar el campo de rotación mediante geometrías tipo remolino, con canales espirales y deflectores internos, es posible acceder al régimen submicrométrico real. “En el reactor de cavitación de vórtice tipo swirling se generan burbujas con tamaños de hasta 780 [nm], además, este reactor presenta un valor superior de oxígeno disuelto, el cual se incrementa en 36 % en comparación con el tubo Venturi” (Wu et al, 2021). Según estos datos de diseño, se puede

estimar una potencia hidráulica de 19 [W], y suponiendo un rendimiento de 40% para la bomba y motor adicional, se obtiene una potencia eléctrica de 48 [W], equivalente a una energía específica de 0.14 [kWh/m³].

- *Inyección de Gas mediante Boquillas o Difusores*

Involucra la inyección de gas a una alta presión en el agua y su posterior descompresión a través de una boquilla, difusor u orificio. Entre sus elementos principales se encuentran el sistema de alimentación de gas, que introduce el gas comprimido, la boquilla, responsable de la fragmentación inicial del gas, y la cámara de mezcla, donde el gas y el líquido interactúan a través de mecanismos de cizalla, turbulencia e incluso, cavitación.

Debe incluir una bomba de recirculación para mantener un flujo constante de líquido, así como sistemas de control, para ajustar las condiciones operacionales del proceso.

“Un ejemplo de boquilla estándar de generación de microburbujas es capaz de producir burbujas con diámetros de hasta 10 [μm]” (OK Engineering, 2018). Otro tipo de boquillas se basan en el principio de *flow focusing*, donde el sistema utiliza un flujo rotatorio que rodea un chorro de gas inyectado coaxialmente, gracias al giro, se genera una alta depresión en el eje de rotación, lo que permite formar un chorro de gas extremadamente fino. No obstante, este tipo de dispositivos no alcanza el rango de las UFB.

Para lograr el rango submicrométrico deseado, se recurre a la aplicación de un lazo de recirculación, que permite exponer repetidamente la mezcla gas-líquido a zonas de alta cizalla, turbulencia intensa y cavitación localizada, favoreciendo la fragmentación progresiva del gas hasta las UFB. En este sistema, el gas se alimenta de manera controlada a una corriente de agua presurizada que circula a través del generador, el cual incorpora una constricción interna tipo boquilla. “Un sistema de 100 [L] con un caudal de 0.6 [L/min] tiene una caída de presión del orden de 1.5 [bar]” (Arias et al., 2025). Los valores de $K_L a$ reportados luego de 150 min tienen un promedio de 0.04 [min^{-1}] para aire y de 0.16 [min^{-1}] para oxígeno. De acuerdo con su ficha técnica, el dispositivo “genera burbujas con un tamaño medio característico de 180 [nm]” (Kran Nanobubble, 2021). Al asumir una eficiencia global de bombeo del 60%, la potencia eléctrica requerida para su operación se estima en aproximadamente 4 [W], equivalente a una energía específica de 0.1 [kWh/m³].

- *Difusión por Membranas Microporosas*

Funciona haciendo pasar el gas a través de una membrana porosa bajo presión, generando burbujas a medida que el gas atraviesa los poros de la membrana hacia el líquido. El tamaño de las burbujas formadas depende principalmente del diámetro de poro y las propiedades interfaciales del sistema (tensión superficial, ángulo de contacto).

Las membranas para generación de burbujas varían según su material (polímeros, cerámica, fibra de vidrio), el tamaño de poros (microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis

inversa), y la estructura (hoja plana, fibra hueca, tubular). Las membranas hidrofílicas facilitan el paso de agua, mientras que las hidrofóbicas, al repelerla, son ideales para generar burbujas en líquidos. La elección depende del tamaño de burbuja requerido, resistencia y características del medio a tratar.

Existen mecanismos combinados de inyección de gas por boquilla y el uso de membranas porosas, como es el caso de la invención de *MOLEAER*, “esta tecnología integra un miembro permeable rotativo con poros menores a diámetros, a través del cual se inyecta gas, simulando un flujo turbulento, la rotación genera un flujo turbulento que permite que el líquido corte el gas en UFB, que luego se dispersan en el medio” (Canadá Patente n° CA3133245A, 2021). Definen rangos de presión de gas entre 1 y 10 [atm] y velocidades de flujo líquido superiores a 2 [m/s] en la superficie del miembro permeable. “Esto requiere de presiones de gas por sobre de los 6 [bar], lo cual no es viable en muchas aplicaciones, así mismo, en la práctica sus equipos tienen pérdidas de carga del orden de los 1.5 [bar]” (Puga Traverso, OMPI, 2023).

Si bien el tamaño de las burbujas depende directamente del diámetro de poro de la membrana, el aumento de la presión de inyección de gas reduce significativamente el tamaño de las burbujas, pasando de 600 a 340 [nm], cuando la presión se incrementa de 69 a 414 [kPa] (Ahmed et al., 2018).

A partir de los datos operacionales reportados, para un caudal de 0.45 [L/min], un volumen de agua de 0.5 [L], se obtiene una potencia de 5 [W] y un consumo de 16 [kWh/m³] para una presión de 414 [kPa], y de 173 [W] y 518[kWh/m³] para los 69 [kPa]. Este representa la alta sensibilidad del requerimiento energético frente al caudal de gas utilizado. Para efectos del estudio, se considera el caso optimizado con 5 [W] y 16 [kWh/m³].

2.4 Comparación entre Tecnologías de Aireación

La aireación constituye la principal demanda energética en sistemas de lodos activados y su eficiencia depende del método utilizado para introducir oxígeno en el agua. Los dos principales métodos para la aireación son la introducción de aire u oxígeno puro mediante difusores sumergidos y la agitación mecánica (Metcalf, 1996).

La eficiencia del sistema de aireación puede describirse mediante distintos indicadores según el enfoque del análisis. La eficiencia de transferencia de oxígeno en operación (OTE) expresa la fracción de oxígeno efectivamente disuelto bajo las condiciones reales del reactor, mientras que la eficiencia estándar de transferencia de oxígeno (SOTE) se determina en ensayos de agua limpia y condiciones normalizadas. Complementariamente, la tasa estándar de transferencia de oxígeno (SOTR) cuantifica la masa de oxígeno transferida por unidad de tiempo en agua limpia, constituyendo un indicador de la capacidad cinética del sistema. Finalmente, desde una perspectiva energética, la eficiencia energética estándar de aireación (SAE), relaciona la transferencia de oxígeno con el consumo eléctrico, permitiendo comparar tecnologías de

aireación en términos de eficiencia energética. En conjunto, describen el desempeño operativo, físico y energético del sistema de aireación. Las relaciones entre estos indicadores se presentan en los anexos.

“En tecnologías tradicionales, como los aireadores mecánicos, las burbujas de $1 - 6 [mm]$ producen capacidades típicas de $0.9 - 3.0 [kg O_2/kWh]$ ” (Metcalf, 1996), describiendo el SAE del aireador. Por su parte, “los difusores de burbuja fina mejoran sustancialmente el rendimiento, gracias a la mayor permanencia de las burbujas y su menor diámetro, con SOTE de $20-28 \%$ ” (Tchobanoglous, 2003).

En los sistemas mecánicos, la eficiencia de aireación se evalúa habitualmente mediante SAE, mientras que en los sistemas de difusión de gas se emplean indicadores como SOTE y SOTR, asociados a ensayos en agua limpia. En todos los casos, el objetivo es cuantificar la eficiencia con la cual la energía eléctrica consumida se transforma en oxígeno efectivamente transferido al medio líquido. En el caso de las tecnologías basadas en burbujas ultrafinas (UFB), no se dispone de valores estandarizados de SAE reportados en la literatura. Por esta razón, el SAE se estima a partir del coeficiente de transferencia volumétrico $K_L a$, el consumo energético característico de cada método y condiciones estándar de transferencia de oxígeno.

Para la estimación del SAE se emplean, en primer lugar, parámetros representativos de transferencia de oxígeno asociados a los distintos métodos de generación de UFB. La Tabla 2 presenta valores de $K_L a$ y del tamaño característico de burbuja reportados en la literatura.

*Tabla 2: Coeficiente de Transferencia de Materia según el Método de Generación UFB.
Adaptación: (Silva et al, 2024)*

Método	$d [nm]$	$K_L a [h^{-1}]$
Agitación Mecánica	500 - 3500	0.21
Cavitación Hidrodinámica tipo Venturi	96,000 - 135,000	10.56
Cavitación Hidrodinámica tipo Vortex	90,000	17.82
Filtración por Membrana	200-700	19.79

Al disminuir el tamaño de la burbuja, se incrementa la eficiencia de la transferencia de masa debido a una mayor área de superficie, lo que resulta en un coeficiente mayor.

En cuanto a la energía utilizada, se distinguen dos escalas de análisis. La Tabla 3 corresponde a métodos experimentales o de laboratorio, caracterizados por volúmenes reducidos y tiempos de operación acotados, mientras que la Tabla 4 presenta sistemas de operación continua, representativos de configuraciones con caudal permanente y mayor proyección a escala aplicada. En los anexos se detallan los procedimientos de cálculo de potencia para cada método.

*Tabla 3: Energía Específica de Métodos Experimentales
Fuente: Elaboración Propia*

Método	Diámetro [nm]	Volumen [L]	P_{UFB} [W]	t [h]	$E^\circ \left[\frac{kWh}{m^3} \right]$
Electrólisis	100	0.25	300	1	1200
Cavitación Ultrasónica	100-300	0.3	1100	0.03	122
Agitación Mecánica	200-800	0.35	10	0.02	28

Tabla 4: Energía Específica de Sistemas Continuos
Fuente: Elaboración Propia

Método	d [nm]	V [L]	$Q \left[\frac{L}{min} \right]$	ΔP [Pa]	η_{Bomba} [-]	t [h]	P_{UFB} [W]	$E^\circ \left[\frac{kWh}{m^3} \right]$
Venturi	190	-	3.9	300000	0.4	0.02	50	0.21
Vórtice	780	-	5.7	200000	0.4	0.02	48	0.14
Boquillas	180	100	0.6	250000	0.6	2.50	4	0.10
Membranas 300-400 nm	1000	0.5	0.4	414000	0.6	1.5	5	16
Membranas 100-300 nm	100	0.5	15	414000	0.6	1.5	173	518

A partir de los parámetros de transferencia de oxígeno (Tabla 2) y de los requerimientos energéticos presentados en las Tablas 3 y 4, se estima la eficiencia energética estándar de aireación (SAE) para cada tecnología UFB, según:

Ecuación 18: Eficiencia Energética Estándar de Aireación

$$SAE = \frac{K_L a_{20} C_{20}^* V}{P}$$

Dado que la concentración de saturación de oxígeno depende del gas de operación, la estimación del SAE se realiza empleando valores de C_s para aire y oxígeno puro. En particular, cuando los sistemas de cavitación hidrodinámica operan con O_2 , el incremento de C_s se traduce en mayores valores de SAE, reflejando una mayor eficiencia energética de transferencia de oxígeno. La Tabla 5 presenta la comparación energética entre las distintas tecnologías de generación de UFB en términos de la eficiencia energética estándar de aireación, integrando los efectos conjuntos de la transferencia de oxígeno y del consumo energético asociado.

Tabla 5: Comparación de tecnologías UFB según eficiencia energética estándar de aireación (SAE)
Fuente: Elaboración Propia

Método	$K_L a$ [h^{-1}]	P [kW]	SAE [kg O_2 /kWh]
Agitación mecánica (Aire)	0.21	10	0.0002
Cavitación hidrodinámica Venturi (Aire)	10.56	0.05	1.92
Cavitación hidrodinámica Venturi (O_2)	10.56	0.05	9.29
Cavitación hidrodinámica Vórtice (Aire)	17.82	0.05	3.24
Cavitación hidrodinámica Vórtice (O_2)	17.82	0.05	15.68
Inyección con Boquillas (O_2)	9.57	4.17	0.10
Difusión por Membranas (O_2)	19.79	5.18	0.17

La energía específica asociada a la generación de UFB depende de la escala y del principio de operación del sistema, por lo que su uso como métrica comparativa resulta limitado. Al normalizar el desempeño mediante el SAE, se evidencia que las tecnologías de cavitación hidrodinámica presentan la mejor relación entre transferencia de oxígeno y consumo energético, particularmente al operar con oxígeno puro, mientras que los sistemas presurizados mediante boquillas o membranas presentan un gasto energético relevante.

Finalmente, la siguiente tabla integra una evaluación cualitativa de ventajas, limitaciones y aplicaciones de cada método de generación de UFB, permitiendo complementar la comparación cuantitativa con criterios operacionales, económicos y de aplicabilidad.

Tabla 6: Ventajas, limitaciones y aplicaciones de cada método de generación de UFB
Fuente: Elaboración Propia

Método	Ventajas	Limitaciones	Aplicaciones
Electrólisis	Producción in situ	Degradación de electrodos	Electroflotación
	Control del tamaño de burbuja vía voltaje	Variaciones de pH	Oxidación avanzada
	Sin aditivos químicos	Alto consumo energético	
Cavitación Ultrasónica	Burbujas de tamaño uniforme	Requiere equipo especializado de Ultrasonido	Nivel laboratorio
	Buena estabilidad de burbujas	Equipo de alto costo y consumo energético	
	Control preciso de frecuencia y potencia		
Agitación Mecánica	Diseño Simple	Equipo especializado de alta velocidad	Nivel laboratorio
		Desgaste mecánico	Dispersión de Gases
		Sensible a la viscosidad	
Cavitación Hidrodinámica tipo Venturi	Diseño robusto	Difícil control del tamaño y concentración de burbujas	Aguas Industriales
	Bajo consumo de energía	Densidad de burbujas menor	Flotación de minerales
	Fácil instalación	Geometría crítica para el rendimiento	
Cavitación Hidrodinámica tipo Vórtice	Diseño robusto	Sensible a variaciones de caudal	Aguas Industriales
	Bajo consumo de energía		
	Fácil instalación		
Inyección de gas por Boquillas o Difusores	Producción controlada y continua	Requiere altas presiones	Acuicultura
	Aplicable a distintos gases	Pérdidas de cargas significativas	Agricultura
	Diseño adaptable	Complejidad mecánica	Ozonización
Difusión por Membranas Microporosas	Control preciso del tamaño	Ensuciamiento de membranas (fouling)	Líquidos limpios
	Alta estabilidad	Alto costo de operación y reemplazo	Nivel laboratorio
		Requiere presión controlada	

En síntesis, no existe un método de generación de burbujas ultrafinas universalmente superior, sino que su idoneidad depende del contexto técnico, económico y ambiental de aplicación. Mientras los sistemas basados en cavitación hidrodinámica y en la inyección directa de gas resultan más adecuados para tratamientos industriales de mayor escala, los métodos de electrólisis, membranas y ultrasonido se orientan preferentemente a aplicaciones específicas o experimentales donde se requiere un control más preciso del tamaño, la estabilidad y la pureza de las burbujas. En consecuencia, para efectos de análisis comparativo y escalabilidad, los métodos de aplicación directa de gas presentan mayores ventajas prácticas.

3. Aplicación de Burbujas Ultrafinas en Tratamiento de Aguas

3.1 Descripción General del Sistema de Tratamiento

Las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales basadas en el proceso de lodos activados son uno de los esquemas más ampliamente utilizados para la remoción de materia orgánica biodegradable. Su principio de operación se basa en la oxidación biológica del sustrato orgánico por medio de biomasa suspendida, bajo condiciones controladas de aireación y mezcla.

En primer lugar, el tratamiento preliminar incluye unidades como rejillas, tamices y desarenadores, destinadas a la remoción de sólidos gruesos y arenas, con el objetivo de proteger las etapas posteriores y asegurar una operación hidráulica estable.

Posteriormente, el efluente ingresa al tratamiento secundario, el cual constituye la etapa central del proceso. Esta etapa está conformada por reactores biológicos aeróbicos, operados bajo el esquema de lodos activados, donde se suministra oxígeno para sostener la actividad metabólica de los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica. La aireación cumple una doble función: aportar oxígeno y generar condiciones de mezcla, siendo el mecanismo dominante en el consumo energético de la planta.

A la salida del reactor aeróbico, el flujo es conducido a una unidad de clarificación secundaria, correspondiente a un sedimentador, donde se separa la biomasa del agua tratada. El lodo sedimentado es parcialmente recirculado al reactor biológico para mantener la concentración de sólidos en suspensión, mientras que el excedente es purgado del sistema como lodo en exceso, cerrando el balance de sólidos del proceso.

Finalmente, el lodo extraído desde la clarificación secundaria es tratado en una línea de manejo de lodos, que puede incorporar operaciones unitarias tales como espesamiento, estabilización y deshidratación, orientadas a reducir el volumen del residuo y facilitar su disposición final. Estas unidades, si bien forman parte del sistema global, no influyen directamente en los fenómenos de transferencia de oxígeno asociados al tratamiento biológico.

En el marco de este trabajo, el análisis se focaliza en el tratamiento secundario, y en particular en los reactores biológicos aeróbicos, dado que es en estas unidades donde se concentra la transferencia de oxígeno desde la fase gaseosa a la fase líquida y donde la eficiencia de aireación constituye una variable crítica de diseño y operación. Sobre esta base se introducen, en las secciones siguientes, los modelos de transferencia de oxígeno aplicados al sistema.

3.2 Modelos de Transferencia de Oxígeno

La transferencia de oxígeno desde la fase gaseosa a la fase líquida constituye uno de los procesos fundamentales en los sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales. En términos generales, este fenómeno involucra dos mecanismos complementarios: disolución y difusión.

La disolución se refiere al paso del oxígeno gaseoso desde el interior de la burbuja hacia la fase líquida, mientras que la difusión corresponde al transporte molecular del oxígeno disuelto a través del líquido, impulsado por gradientes de concentración. Una vez que las burbujas están en contacto con el agua, el oxígeno debe atravesar la interfaz gas-líquido para incorporarse a la fase líquida, marcando el inicio del proceso de transferencia de masa. Este fenómeno puede describirse a partir de la teoría de difusión molecular:

- *Ecuación de Difusión*

Determinada por la ley de Fick, establece que la difusión de las moléculas se debe a un gradiente de concentración. Para una mezcla binaria de A y B (Geankoplis, 1993):

Ecuación 19: Primera Ley de Fick

$$J_{Az}^* = -cD_{AB} \frac{dx_A}{dz}$$

Donde J_{Az}^* es el flujo molar del componente A en la dirección z causado por la difusión molecular, siendo proporcional a la difusividad molecular de la molécula A en B y a la variación de la fracción molar de A en la mezcla A y B. Cuando la concentración es constante:

Ecuación 20: Ley de Fick para Sistema Estacionario

$$J_{Az}^* = -D_{AB} \frac{dc_A}{dz}$$

En medios con convección se introduce el concepto de flujo específico N , que representa el flujo molar absoluto, considerando tanto la difusión, como como la convección:

Ecuación 21: Flujo Molar Absoluto

$$N_A = J_A^* + c_A \cdot v$$

Donde v es la velocidad promedio del fluido, siendo especialmente relevante en sistemas donde el gas no solo se difunde, sino también se transporta por convección, como en reactores o zonas con recirculación.

- *Modelo de Doble Película*

Se asume que la principal resistencia a la transferencia de masa se concentra en una delgada capa líquida adyacente a la superficie de la burbuja. El flujo molar de oxígeno queda como:

Ecuación 22: Flujo Oxígeno

$$N_{O_2} = k_L(C_s - C)$$

Para una burbuja de área A en un volumen de líquido V, con área interfacial específica $a = A/V$, se obtiene:

Ecuación 23: Transferencia de Masa Líquido-Gas

$$\frac{dC}{dt} = k_L \cdot a \cdot (C_s - C)$$

Ahora bien, k_L representa el coeficiente de película líquida, pero convencionalmente se utiliza el coeficiente volumétrico de transferencia de masa:

Ecuación 24: Coeficiente de Transferencia de Masa Volumétrico

$$K_L a = k_L \cdot a$$

- *Transferencia de Oxígeno en Aguas Residuales*

En sistemas reales de tratamiento biológico, la concentración de oxígeno disuelto resulta del equilibrio entre el oxígeno transferido desde la fase gaseosa y el oxígeno consumido por los microorganismos durante la oxidación de la materia orgánica. Este balance puede expresarse como (Metcalf, 1996):

Ecuación 25: Transferencia de Oxígeno en Aguas Residuales

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_s - C) - OUR$$

La tasa de consumo de oxígeno (OUR) corresponde al oxígeno consumido a la actividad metabólica de los microorganismos. Depende tanto de la tasa de crecimiento de las células bacterianas (μ_M) presentes en el licor mezcla, como de la concentración de biomasa activa (X), puede expresarse como:

Ecuación 26: Tasa de Consumo de Oxígeno

$$OUR = \mu_M X$$

Los microorganismos son claves en la oxidación heterotrófica de la materia orgánica para la formación de los lodos. Su composición básica es del 80% de agua y 20% de materia seca, de la que el 90% es materia orgánica y 10% inorgánica. Una fórmula que permite describir, de manera aproximada, su fracción orgánica es $C_5H_7O_2N$.

Sin embargo, en la realidad, la tasa de crecimiento específico es limitada, ya que depende de la disponibilidad de nutrientes y materia orgánica biodegradable en el medio. La saturación del crecimiento bacteriano respecto al sustrato disponible es modelada a través de la ecuación desarrollada por Monod:

Ecuación 27: Modelo de Monod

$$\mu_M = \mu_{M \max} \cdot \frac{S}{K_S + S}$$

De esta manera se puede relacionar para estado estacionario:

Ecuación 28: Balance en Estado Estacionario

$$K_L a \cdot (C_s - C) = \mu_{M \max} \cdot \frac{S}{k_s + S} \cdot X$$

En este caso se cumple que la tasa de oxígeno transferido al licor mezcla es igual a la tasa de consumo biológico, es decir, $OTR = OUR$. En consecuencia, el sistema de aireación no determina cuánto oxígeno se consume, sino únicamente su capacidad de transferencia:

Ecuación 29: Capacidad de Transferencia de Oxígeno en Estado Estacionario

$$OTR = OUR = V \cdot K_L a \cdot (C_s - C)$$

En el modelo implementado, la cinética biológica se describe mediante parámetros constantes de crecimiento microbiano, de acuerdo con la formulación de Monod. La incorporación de un mayor $K_L a$ no modifica directamente los parámetros cinéticos, sino que aumenta la capacidad del sistema para suministrar oxígeno y mantener la concentración objetivo de oxígeno disuelto, dado que en todos los escenarios se controla a un mismo valor, la cinética permanece inalterada y la transferencia de oxígeno no actúa como factor limitante del crecimiento biológico.

3.2.1 Definición del Coeficiente de Transferencia de Materia

Se interpreta como un parámetro cinético gobernado por la hidrodinámica local del sistema y por el área interfacial efectiva disponible. Su magnitud depende del régimen de contacto gas-líquido, del mecanismo de renovación interfacial y de las propiedades del medio. Existen diferentes definiciones propuestas por la literatura clásica, que difieren según el tipo de régimen al que se someten. Se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 7: Coeficiente de Transferencia de Masa según diferentes Modelos de Transferencia.
Fuente: (García-Ochoa & Gómez, 2009)

Autor	Modelo	Fórmula
Whitman (1923)	Película	$k_L = \frac{D}{\delta}$
Higbie (1935)	Penetración	$k_L = 2 \cdot \sqrt{\frac{D}{\pi t}}$
Danckwerts (1951)	Remoción de Superficie	$k_L = \sqrt{D \cdot s}$
Toor y Marchelo (1958)	Penetración de película	$k_L = 2 \cdot \sqrt{\frac{D}{t \pi}} \left(1 + 2\sqrt{\pi} \cdot \frac{\delta}{\sqrt{D t}} \right)$

Con el fin de establecer un límite ideal de referencia, se aplica el modelo de penetración de película a una burbuja de diámetro micrométrico ($\delta \rightarrow 1[\mu m]$). Considerando $D_{O_2} = 2 \cdot 10^{-9} [m^2/s]$ y un tiempo característico de 1 [s], se tiene $k_L = 5.45 \cdot 10^{-5} [m/s]$.

Al considerar una fracción efectiva de gas disponible reducida por efectos de apantallamiento y presencia de surfactantes ($\epsilon = 0.08$), se estima un área interfacial específica 5 000 veces mayor que la aireación convencional ($a_{UFB} = 5.2 \cdot 10^5 [m^2/m^3]$) se obtiene un coeficiente volumétrico que alcanza órdenes de magnitud muy elevados $K_L a \sim 10^5 [h^{-1}]$. Este valor no representa una condición operacional real, sino un límite superior conceptual.

En aplicaciones reales, la transferencia de oxígeno se ajusta mediante factores de corrección. El factor α corrige el coeficiente volumétrico de transferencia de masa bajo condiciones reales de aguas residuales, mientras que el factor F representa pérdidas operacionales asociadas al tipo de equipo y al ensuciamiento. Ambos factores se incorporan en:

Ecuación 30: Coeficiente de Transferencia de Materia Corregido

$$K_L a_{real} = \alpha \cdot F \cdot K_L a$$

“Se adopta un valor representativo de $\alpha = 0.6$ para reactores de lodos activados operando en aguas residuales” (Metcalf, 1996). Es posible estimar un valor de F asociado a cada método de generación de UFB. A partir de los coeficientes de transferencia volumétricos presentados en la literatura, se define:

*Tabla 8: Coeficiente de Transferencia Volumétrico Corregido.
Adaptación: (Silva et al, 2024) & (Arias et al., 2025)*

Método de generación	$K_L a_{Base} [h^{-1}]$	F	$K_L a_{Real} [h^{-1}]$
Cavitación Hidrodinámica por Venturi	10.56	0.85	8.98
Cavitación Hidrodinámica por Vórtice	17.82	0.85	15.15
Inyección de gas por Boquillas o Difusores	9.59	0.80	7.65
Membranas porosas	19.79	0.60	11.87

Por su parte, el factor β corrige la solubilidad del oxígeno y se aplica sobre la concentración de saturación:

Ecuación 31: Concentración de Saturación Corregida

$$C^* = \beta \cdot C_s$$

3.2.2 Carga Orgánica y Requerimiento Biológico de Oxígeno

En los sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales, la carga orgánica representa la cantidad de materia orgánica biodegradable disponible para ser oxidada por los

microorganismos. Esta carga se expresa habitualmente en términos de demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO_5) y constituye la principal fuente de consumo de oxígeno.

Ecuación 32: Carga Orgánica

$$C_{Org} = Q \cdot DBO_5$$

Un parámetro utilizado para medir la eficiencia es la remoción de carga orgánica:

Ecuación 33: Remoción de Carga Orgánica

$$DBO_{5\ Rem} = Q \cdot (DBO_{5\ In} - DBO_{5\ Out})$$

Durante el tratamiento biológico, la oxidación heterotrófica de esta carga genera un consumo directo de oxígeno. En este estudio, el requerimiento biológico de oxígeno se calcula a partir de la carga orgánica removida, asumiendo la equivalencia:

$$1\ [kg\ DBO_{5\ Removida}] \approx 1\ [kg\ O_2\ Consumido]$$

Ecuación 34: Requerimiento de Oxígeno

$$OUR = Q \cdot \Delta DBO_5$$

3.3 Caso de Estudio

El sistema analizado corresponde a una planta de tratamiento de aguas residuales municipales mediante el proceso de lodos activados, modelada en el software *SuperPro Designer* y adoptada como caso base para la comparación de distintas estrategias de transferencia de oxígeno. El proceso de tratamiento considera una línea de agua compuesta por tratamiento preliminar, reactores biológicos aeróbicos en serie y clarificación secundaria, mientras que la línea de lodos incluye etapas de estabilización aeróbica, espesamiento y deshidratación. Los detalles del reactor biológico y el diagrama general del proceso se presentan en los Anexos, siendo la referencia para la definición del caso base de simulación.

El caudal medio afluente es de $2\ 000\ [m^3/h]$, con una concentración de $214\ [mg\ DBO_5/L]$ y $159\ [mg\ SST/L]$, equivalente a una carga orgánica de $428\ [kg\ DBO_5/h]$. Estos parámetros definen la carga orgánica del sistema, la cual se mantiene constante en todos los escenarios.

La aireación del reactor biológico se realiza con aire atmosférico (21% O_2 , 79% N_2), utilizando un requerimiento volumétrico de gas de $0.01\ [m^3\ aire/m^3\ min]$. Bajo esta condición, el simulador ajusta automáticamente el caudal de gas para satisfacer la demanda biológica de oxígeno y mantener la concentración objetivo de oxígeno disuelto de $2\ [mg/L]$, resultando en un caudal de $2\ 550\ [m^3/h]$ de aire por reactor, equivalente a un flujo de $535\ [m^3\ O_2/h]$. El sistema se caracteriza por un coeficiente volumétrico de transferencia de $K_L a_{aire} = 4\ [h^{-1}]$. El suministro de aire implica un consumo energético asociado a la operación del sistema de

aireación, principalmente por la compresión e impulsión del gas hacia el reactor. En el caso base, cada reactor dispone de dos sopladores con una potencia nominal de 100 [kW] cada uno, lo que corresponde a una potencia instalada de aireación de 200 [kW] por reactor.

Para representar condiciones reales de aguas residuales, el software permite aplicar el factor de corrección α en el modelo de emisión con el valor de 0.6, mientras que el efecto de la solubilidad del oxígeno se representa mediante la ley de Henry ($H = 4.01 \cdot 10^{-4} [atm \cdot m^3/mol]$). Bajo estas condiciones, el requerimiento biológico de oxígeno alcanza $OUR = 383 [kg O_2/h]$, equivalente a una remoción de $381 [kg DBO_5 rem/h]$, alcanzando una eficiencia del 88%.

3.4 Simulación de Escenarios

En todos los escenarios se utiliza el mismo modelo de planta, implementado en SuperPro Designer, manteniendo constantes la configuración hidráulica, los volúmenes de reactor, la cinética biológica, la carga orgánica afluyente y la eficiencia global de remoción. El análisis se centra en la aireación del tratamiento biológico.

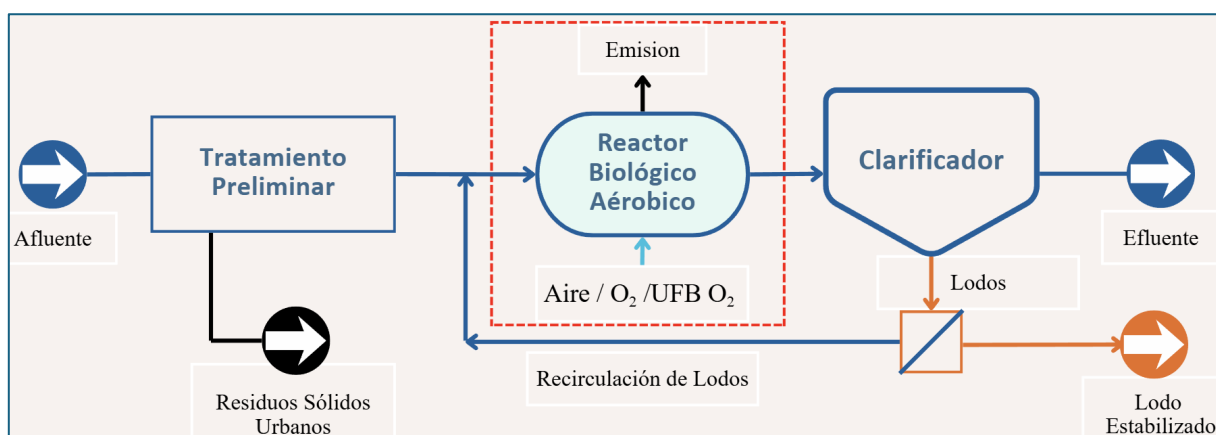


Figura 5: Diagrama de Proceso Simplificado y lugar de Evaluación
Fuente: Elaboración Propia

Dado que el software no permite modelar el área interfacial gas-líquido ni la retención de gas, estas mejoras se representan mediante variaciones del coeficiente volumétrico de transferencia de masa y, de forma equivalente, mediante ajustes en el requerimiento volumétrico de gas según:

Ecuación 35: Requerimiento de Gas

$$\phi_{escenario} = \phi_{aire} \cdot \left(\frac{K_L a_{aire}}{K_L a_{escenario}} \right) \cdot \left(\frac{C_{aire}^*}{C_{O_2}^*} \right)$$

Tabla 9: Escenarios y Condiciones por Reactor
Fuente: Elaboración Propia

Parámetro	Unidad	Aire	O ₂	UFB O ₂
Gas	-	Aire (21% O ₂)	100% O ₂	100% O ₂

Método de Dispersión	-	Difusores Conv.	Difusores Conv.	Boquillas en recirculación
OUR	$kg\ O_2/h$	383	383	383
C*	mg/L	9.08	44	44
$K_L a$	h^{-1}	4	4	7.65
Requerimiento de Gas	$m^3/(m^3 \cdot min)$	0.01	0.002	0.001
Potencia Hidráulica	kW	50	50	50
Potencia de Aireación	kW	150	60	70
Precio Equipo Auxiliar	USD	30 000	20 000	50 000

La potencia total de cada escenario se descompone en dos componentes: la potencia hidráulica, asociada a la mezcla y recirculación del reactor (constante en todos los escenarios), y la potencia de suministro de gas, correspondiente al equipo de inyección. Las diferencias entre escenarios radican en el suministro de gas: el aire requiere la mayor potencia de compresión (150 kW) debido al alto volumen de gas necesario, mientras que el oxígeno puro y las burbujas ultrafinas presentan valores similares en términos totales (110 y 120 kW respectivamente), aunque por razones distintas.

En el caso del oxígeno puro, el menor requerimiento volumétrico de gas reduce significativamente la energía de compresión. En el caso de las burbujas ultrafinas, si bien el generador demanda mayor potencia unitaria, una sola unidad abastece ambos reactores, lo que mejora la eficiencia global del sistema. Respecto al costo de equipos auxiliares, los valores indicados para aire y oxígeno puro corresponden al costo por reactor, por lo que se requiere duplicar la inversión al considerar ambas unidades. En el caso de las burbujas ultrafinas, el valor indicado corresponde a un único generador que alimenta ambos reactores simultáneamente, lo que representa una ventaja en términos de inversión de capital.

3.4.1 Oxígeno Puro

En este escenario se reemplaza el aire atmosférico por oxígeno puro como gas de aireación, manteniendo constante el coeficiente volumétrico de transferencia de masa se mantiene en $K_L a_{O_2} = 4 [h^{-1}]$. Asimismo, no se modifican los parámetros cinéticos ni la demanda biológica de oxígeno del sistema respecto del caso base.

El requerimiento volumétrico de oxígeno se establece a partir del caso base, al sustituir el aire por oxígeno puro el requerimiento de gas se reduce a $0.002 [m^3 O_2 / m^3 \cdot min]$, reflejando la eliminación del nitrógeno presente en el aire y la mayor concentración de oxígeno del gas.

3.4.2 Burbujas Ultrafinas de Oxígeno

Si bien las burbujas ultrafinas pueden generarse utilizando distintos gases, su estabilidad y tiempo de permanencia dependen de las propiedades del gas empleado. En procesos biológicos, el aire y el oxígeno se utilizan para el suministro de oxígeno a los microorganismos, mientras que gases altamente reactivos, como el ozono, se emplean en aplicaciones de desinfección u oxidación avanzada. En este contexto, el presente estudio evalúa exclusivamente la aplicación de burbujas ultrafinas de oxígeno como estrategia de intensificación del proceso de aireación.

Respecto al método de generación de UFB, se escoge la inyección de gas mediante boquillas, debido a que el tamaño de la burbuja se encuentra dentro del rango ISO, tienen menor energía específica de sistemas continuos (0.10 kWh/m^3). A partir de los resultados planteados en la Tabla 8, se tiene $K_L a_{UFB \text{ O}_2} = 7.65 [h^{-1}]$. Para su correcta implementación se recomienda incorporar un lazo de recirculación desde el efluente líquido limpio para inyectar las burbujas en agua limpia y mejorar la transferencia de oxígeno.

El incremento de eficiencia asociado al uso de UFB se introduce como una condición de modelación, consistente con las limitaciones del software para representar explícitamente la hidrodinámica gas-líquido y el área interfacial. En este contexto, y manteniendo constante la concentración objetivo de oxígeno disuelto, la demanda biológica de oxígeno y la cinética microbiana, el escenario se define mediante la imposición de un requerimiento volumétrico de oxígeno inferior al del escenario de oxígeno puro convencional. En consecuencia, el requerimiento volumétrico de oxígeno se estima en $0.001 [m^3 \text{ O}_2 / m^3 \cdot \text{min}]$.

3.5 Resultados

En el modelo implementado las diferencias entre escenarios se manifiestan en el caudal de gas requerido para mantener el objetivo de oxígeno disuelto, sin afectar la eficiencia global del sistema. En anexos se presenta la descripción de corrientes para cada escenario, mientras que la Tabla 10 resume los principales resultados de desempeño.

*Tabla 10: Resultados en el Reactor Biológico según Escenarios
Fuente: Elaboración Propia a partir de la Simulación*

Parámetro	Unidad	Aire	O_2	$UFB \text{ O}_2$
Gas	-	Aire (21% O_2)	100% O_2	100% O_2
Método de Dispersión	-	Difusores Conv.	Difusores Conv.	Boquillas en recirculación
C^*	mg/L	9.08	44	44
$K_L a$	h^{-1}	4	4	7.65
Requerimiento de Gas	$m^3 / (m^3 \cdot \text{min})$	0.01	0.002	0.001
Caudal Gas	m^3/h	2 550	510	255
Caudal O_2 Equivalente	m^3/h	535	510	255

Potencia Total	<i>kW</i>	200	110	120
Consumo Energético	<i>MWh/año</i>	1 584	792	950

Para una misma carga orgánica removida y eficiencia global del proceso, el caudal de gas requerido se reduce de manera significativa al pasar desde aire atmosférico a oxígeno puro, y aún más en el escenario con burbujas ultrafinas de oxígeno. Esta reducción refleja el aumento progresivo de la eficiencia volumétrica de transferencia de oxígeno asociado al tipo de aireación, mientras que el desempeño biológico del sistema se mantiene constante debido al control del oxígeno disuelto y a la invariancia de la demanda biológica.

Los resultados obtenidos deben interpretarse como una comparación entre escenarios operacionales representativos, y no como una predicción directa del desempeño hidrodinámico de un sistema real con UFB.

4. Evaluación Técnica-Económica y Ambiental

En los escenarios modelados se mantiene constante la carga orgánica afluente, el volumen de reactor y requerimiento biológico de oxígeno, de modo que las diferencias se atribuyen exclusivamente al método de suministro y transferencia de oxígeno. El tiempo de operación corresponde a 7920 [h/año], valor que se mantiene constante en todos los escenarios.

La energía total consumida por la planta es 4 050 496 [kWh/año] para el caso base, 2 070 495 [kWh/año] para el escenario de oxígeno puro, y 2 466 496 [kWh/año] para UFB O₂.

4.1 Costos de Inversión (CAPEX)

La inversión base del sistema, correspondiente a la infraestructura modelada (reactores, clarificación y manejo de lodos), alcanza 103 MMUSD como base.

Sin embargo, al agregar los sopladores al caso base de aireación (60 000 USD) y al de oxígeno (40 000 USD) se compensa el precio de un generador de UFB para el sistema (50 000 USD), teniendo los tres proyectos con inversión similar.

4.2 Costos Operacionales (OPEX)

Considera los gastos recurrentes de operación, principalmente el consumo eléctrico y el costo del gas utilizado para el suministro de oxígeno. Se adopta una tarifa eléctrica media representativa de 0.2 [USD/kWh].

En los escenarios que emplean oxígeno, el gas se ingresa como un insumo externo cuyo costo se estima en 0.5 [USD/kg O₂].

4.3 Evaluación Costo-Beneficio de Implementación

La evaluación económica se basa en la comparación de CAPEX, OPEX e indicadores financieros entre los distintos escenarios de aireación, a partir de los resultados obtenidos mediante la simulación del proceso en el software SuperPro Designer. En todos los casos se mantuvieron constantes los ingresos anuales del sistema con el fin de aislar el efecto de la tecnología de transferencia de oxígeno sobre los costos y la rentabilidad del proyecto. Dado que el sistema de aireación no modifica la capacidad de tratamiento ni el volumen facturado, se asumió un ingreso anual constante de 30 MMUSD, correspondiente a tarifas por servicios sanitarios en un contexto de gestión municipal. La Tabla 11 presenta una síntesis de los principales indicadores económicos estimados para cada escenario, incluyendo inversión, costos operacionales, rentabilidad y huella de carbono asociada.

Tabla 11: Síntesis de Indicadores Económicos por Escenario

Indicador	Unidad	Aire	O₂	UFB O₂
Inversión total (CAPEX)	MMUSD	103.44	103.39	103.4
Costos Operacionales (OPEX)	MMUSD·año ⁻¹	21	20.7	20.7
Ingresos anuales	MMUSD·año ⁻¹	30	30	30
Margen Bruto	%	29.8	31	30.9
Retorno sobre la Inversión (ROI)	%	14.2	14.4	14.4
Tiempo de Recuperación (Payback)	Años	7.0	6.9	6.9
Tasa Interna de Retorno (IRR)	%	7.4	7.7	7.6
Valor Actual Neto	MMUSD	2.6	4.1	3.9
Huella de Carbono	kg CO ₂ eq/m ³	0.28	0.24	0.25

La reducción observada en los costos operacionales se asocia principalmente a una menor demanda energética del sistema de transferencia de oxígeno. En sistemas de lodos activados, la aireación puede representar entre el 40% y 60% del consumo eléctrico total de la planta. La utilización de oxígeno puro y tecnologías de generación de burbujas ultrafinas permite aumentar la eficiencia de transferencia de masa, reduciendo la potencia requerida para satisfacer la demanda de oxígeno del reactor biológico.

Desde el punto de vista financiero, los escenarios con oxígeno presentan un incremento del valor actual neto (VAN) respecto al escenario base con aire, acompañado de un leve aumento en la tasa interna de retorno (TIR) y una reducción marginal del período de recuperación de la inversión. No obstante, las diferencias económicas entre escenarios son moderadas, debido a que la inversión total del proyecto está dominada por la infraestructura de la planta de tratamiento, cuyo CAPEX supera ampliamente el costo específico del sistema de aireación.

En consecuencia, mejoras tecnológicas aplicadas específicamente al proceso de transferencia de oxígeno, como el uso de burbujas ultrafinas, tienden a reflejarse principalmente en reducciones de consumo energético más que en cambios significativos en la inversión total del proyecto. En este contexto, los resultados obtenidos sugieren que la implementación de UFB presenta una ventaja operativa y ambiental, manteniendo indicadores económicos comparables a los sistemas convencionales de aireación.

Por ello, aunque el escenario con UFB presenta beneficios operacionales y ambientales, su impacto en los indicadores financieros globales resulta limitado. Estos resultados sugieren que su implementación podría resultar especialmente favorable en plantas de mayor escala o en contextos donde el costo de la energía tenga una mayor incidencia en los costos operacionales.

4.4 Estimación de Reducción de Huella de Carbono

La huella de carbono se estima a partir de dos fuentes de emisión indirecta: el consumo eléctrico de los equipos del proceso y el transporte del oxígeno como insumo. El análisis utiliza los reportes de potencial de calentamiento global generados por SuperPro Designer, normalizados por volumen de afluente tratado [$kg\ CO_2\ eq/m^3$]. Para el consumo eléctrico se aplica un factor de emisión de $0.3\ [kg\ CO_2\ eq/kWh]$, correspondiente a la red eléctrica chilena, ingresado directamente en la configuración del programa. Para el oxígeno, se asigna un factor de $0.05\ [kg\ CO_2\ eq/kWh]$ asociado al transporte, ingresado como huella del insumo.

Las emisiones directas del proceso biológico, correspondientes a la degradación aeróbica de la materia orgánica, son reportadas por el programa como emisiones de gases de efecto invernadero. Este valor corresponde a $0.2\ [kg\ CO_2\ eq/m^3]$ y se mantiene constante en los tres escenarios, dado que la carga orgánica removida y la cinética biológica no varían.

El escenario base de aireación con aire presenta una huella de carbono total del orden de $0.28\ [kg\ CO_2\ eq/m^3]$, atribuible principalmente al consumo eléctrico de los sistemas de aireación. Al incorporar oxígeno puro, la huella se reduce a $0.24\ [kg\ CO_2\ eq/m^3]$. Esta reducción moderada refleja que el ahorro eléctrico por menor caudal de gas es parcialmente compensado por la huella de transporte del oxígeno.

De forma similar, ya que el consumo eléctrico de las burbujas ultrafinas es mayor debido al generador, la huella de $UFB\ O_2$ llega a $0.25\ [kg\ CO_2\ eq/m^3]$, situándose como una mejora frente al aire, pero siendo menos eficiente que el oxígeno puro debido al consumo del generador.

5. Conclusiones y Recomendaciones

La reducción del diámetro de burbuja en sistemas de burbujas ultrafinas (UFB) incrementa el área interfacial gas-líquido y favorece el aumento del coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno (K_La), aunque actualmente no existe una relación matemática teórica consolidada que lo describa con precisión en sistemas reales de tratamiento de aguas residuales.

En la caracterización de las tecnologías de generación de UFB se observa que no existe un método universalmente superior. Los sistemas basados en cavitación hidrodinámica, tanto tipo Venturi como tipo vórtice, presentan altos valores de eficiencia de aireación cuando operan con oxígeno puro, alcanzando eficiencias específicas de transferencia (SAE) de hasta 15.7 [kgO₂/kWh] en condiciones experimentales. Sin embargo, considerando criterios de escalabilidad, robustez operativa y consumo energético, la inyección de gas mediante boquillas en lazo de recirculación se identifica como la alternativa más equilibrada para aplicaciones industriales continuas, permitiendo generar burbujas dentro del rango definido por la norma ISO para UFB con una energía específica cercana a [0.1 kWh/m³].

Desde el punto de vista del modelado de transferencia de oxígeno, la incorporación de UFB se traduce en un aumento del coeficiente volumétrico de transferencia desde $K_La = 4$ [h⁻¹] en el escenario base hasta $K_La = 7.65$ [h⁻¹] en el escenario con UFB O₂. Al sustituir aire por oxígeno puro se observa una reducción significativa del caudal de gas, la cual se intensifica al incorporar burbujas ultrafinas (UFB). Como consecuencia, el caudal de gas disminuye desde 2 550 [m³/h] en el caso con aire a 510 [m³/h] con oxígeno puro y 255 [m³/h] en el sistema con UFB O₂. En términos energéticos el consumo del sistema de aireación se reduce desde 1 584 [MWh/año] en el escenario base a 792 [MWh/año] con oxígeno puro y 950 [MWh/año] con UFB O₂. La diferencia entre ambos escenarios con oxígeno se explica por el consumo adicional asociado al generador de burbujas y a la bomba de recirculación, estimado en aproximadamente 200 kW, consumo que es parcialmente compensado por la reducción del caudal de gas requerido.

Desde la perspectiva económica, los tres escenarios presentan inversiones totales similares del orden de 103 millones de USD. Esta similitud se debe a que el costo estimado del generador de UFB (aproximadamente 50,000 USD) es comparable al de los equipos de aireación convencional que reemplaza dentro del sistema. Los costos operacionales muestran una disminución moderada, pasando de aproximadamente 21 millones USD/año en el caso base a 20.7 millones USD/año en los escenarios con oxígeno. En términos de indicadores financieros, el escenario UFB-O₂ presenta un Valor Actual Neto (VAN) de 3.9 millones USD, superior al caso base (2.6 millones USD), junto con un período de recuperación cercano a 6.9 años. Estos resultados indican que la tecnología UFB es económicamente viable, aunque la diferencia respecto al escenario con oxígeno puro convencional es relativamente acotada.

En términos ambientales, la huella de carbono disminuye de 0.28 [kg CO₂eq/m³] a 0.24 [kg CO₂eq/m³] gracias al menor consumo eléctrico del sistema de aireación. Mientras, el escenario

con UFB O_2 la huella alcanza 0.25 [kg CO_{2eq}/m^3], situándose como una mejora respecto al sistema con aire, aunque ligeramente superior al escenario con oxígeno puro debido al consumo energético adicional del generador de burbujas.

Desde una perspectiva de diseño y operación, se concluye que las UFB no deben considerarse como un mecanismo único de aireación y mezcla en reactores de biomasa suspendida. Debido a su reducido diámetro y baja velocidad de ascenso, estas burbujas poseen una capacidad limitada para inducir mezcla a escala de reactor, lo que podría generar gradientes de concentración o zonas de sedimentación de biomasa. En consecuencia, su aplicación más realista corresponde a configuraciones híbridas que combinen transferencia de oxígeno mediante UFB con sistemas complementarios de mezcla hidráulica o agitación mecánica.

Para mejorar la robustez de los resultados obtenidos, se recomienda validar experimentalmente a escala piloto los valores de K_{La} reportados para sistemas de generación de UFB mediante boquillas en lazo de recirculación, considerando condiciones reales de aguas residuales municipales. En particular, resulta necesario evaluar el efecto de variables propias del medio, tales como sólidos suspendidos, surfactantes y temperatura, las cuales pueden modificar significativamente los coeficientes de transferencia de oxígeno respecto a las condiciones de agua limpia consideradas en la modelación.

Desde el punto de vista económico, se sugiere complementar el análisis mediante estudios de sensibilidad que permitan evaluar el impacto de variables críticas como el precio del oxígeno industrial, las tarifas eléctricas y la eficiencia real del generador de UFB. Estas variables presentan alta variabilidad en condiciones operacionales reales y podrían modificar de manera relevante los indicadores financieros del sistema.

Adicionalmente, se identifica como una línea de investigación relevante el estudio del efecto de la ausencia de nitrógeno en escenarios que utilizan oxígeno puro. La eliminación del N_2 modifica las propiedades de la fase gaseosa y puede influir en la hidrodinámica del reactor, la retención de gas, la coalescencia de burbujas y las estrategias de control del oxígeno disuelto. Asimismo, altas presiones parciales de oxígeno podrían afectar la actividad microbiana y procesos asociados como nitrificación y desnitrificación, aspectos que no son capturados por el modelo implementado en este estudio.

Finalmente, se recomienda evaluar la aplicación de UFB en sistemas de biomasa adherida, tales como biodiscos, reactores de lecho móvil o configuraciones híbridas, donde los requerimientos de mezcla son menores y las ventajas asociadas al incremento del coeficiente de transferencia de oxígeno podrían manifestarse con mayor claridad.

En síntesis, la tecnología UFB presenta un alto potencial como herramienta de intensificación de la transferencia de oxígeno, aunque su aplicación a escala real aún requiere validación experimental y ajustes en los modelos de simulación.

6. Referencias

- Abello-Passteni et al., X. (2020). Eco-efficiency assessment of domestic wastewater treatment technologies used in Chile. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 190-228. doi:10.24850/jtyca-2020-02-05
- Agarwal, A., Ng, W. J., & Liu, Y. (2011). Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment. *Chemosphere*, 84, 1175-1180. doi: 10.1016/j.chemosphere.2011.05.054
- Ahmed et al. (2018). Generation of nanobubbles by ceramic membrane filters: The dependence of bubble size and zeta potential on surface coating, size and injected gas pressure. *Chemosphere*, 203, 327-335. doi:https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.157
- Alheshibri, M., & et al., X. (2016). A History of Nanobubbles. *LANGMUIR*(32), 11086 - 11100. doi:http://dx.doi.org/10.1021/acs.langmuir.6b02489
- Arias et al., L. (2025). Comparative Analysis of Volumetric Mass Transfer Coefficients for Oxygen Uptake and Desorption with Nanobubbles. *Water*, 17, 130. doi:https://doi.org/10.3390/w17010130
- Baylar, A., & Ozkan, F. (2006). Applications of Venturi Principle to Water Aeration Systems. *Environmental Fluid Mechanics*. doi: DOI 10.1007/s10652-005-5664-9
- Bu, X., & Alheshibri, M. (2021). The effect of ultrasound on bulk and surface nanobubbles: A review of the current status. *Ultrasonics Sonochemistry*, 76, 105629. doi:https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105629
- Chuca Technology Consultants SPA. (2022). *UN ARTEFACTO PARA LA MEZCLA DE GASES EN AGUA EN FORMA DE GAS DISUELTO Y NANO BURBUJAS, ÚTIL EN PROCESOS INDUSTRIALES QUE TRABAJAN CON MÚLTIPLES FASES DE TIPO LÍQUIDO-GAS*. Obtenido de OMPI: https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=WO2023137572&_cid=P21-M83BK1-30123-1
- Chung Shi Liew, K., Rasdi, A., Budhijanto, W., Yuso, M. H., Bilad, M. R., Shamsuddin, N., . . . Putra, Z. A. (2020). Porous Venturi-Orifice Microbubble Generator for Oxygen Dissolution in Water. *Processes*, 8, 1266. doi:http://dx.doi.org/10.3390/pr8101266
- Drewnowski, J., Remiszewska-Skwarek, A., Duda, S., & Łagód, G. (2019). Aeration Process in Bioreactors as the Main Energy Consumer in a Wastewater Treatment Plant. Review of Solutions and Methods of Process Optimization. *Processes*, 7, 311. doi:http://dx.doi.org/10.3390/pr7050311

- Dukhin, A., & Renliang, X. (2024). A new approach to explaining nano-bubbles paradoxical longevity. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 700. doi:<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.134805>
- Duncan, P. B., & Needham, D. (2004). Test of the Epstein-Plesset Model for Gas Microparticle Dissolution in Aqueous Media: Effect of Surface Tension and Gas Undersaturation in Solution. *Langmuir*, 20, 2567-2578. doi:<https://doi.org/10.1021/la034930i>
- Einstein, A. (1905). Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. *Annalen der Physik. Annalen der Physik*, 549–560. doi:<https://doi.org/10.1002/andp.19053220806>
- Fifield, F. W., & Haines, P. J. (2000). *Environmental analytical chemistry*. Blackwell Science.
- Gañán Calvo, A. M., & Herrada Gutiérrez, M. Á. (2011). *España Patente n° ES2350208A1*. Obtenido de <https://patents.google.com/patent/ES2350208A1/es>
- Garcia-Ochoa, F., & Gomez, E. (2009). Bioreactor scale-up and oxygen transfer rate in microbial processes: An overview. *Biotechnology Advances*, 27(2), 153-176. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.10.006>
- Geankoplis, C. J. (1993). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*.
- Hu et al., X. (2023). Numerical Simulation and Structural Optimization of Swirl Flow Micro-Nano Bubble Generator. *Coatings*, 13, 1468. doi:<https://doi.org/10.3390/coatings13081468>
- Instituto Nacional de Normalización. (1987). *NCh 1333 Of.78*. Obtenido de Requisitos de calidad del agua para diferentes usos: https://ciperchile.cl/pdfs/11-2013/norovirus/NCh1333-1978_Mod-1987.pdf
- International Organization for Standardization. (2017). *ISO/TC 281*. Obtenido de ISO 20480-1:2017(en): <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:20480:-1:ed-1:v1:en>
- J. Yin, W. C. (2023). Research on bubble generation method based on flow control mechanism. *International Journal of Advanced Nuclear Reactor Design and Technology*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jandt.2023.08.003>
- Jadhav, A. J., & Barigou, M. (2021). Electrochemically Induced Bulk Nanobubbles. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60, 17999-18006. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c04046?urlappend=%3Fref%3DPDF&jav=VoR&rel=cite-as>
- Khuntia, S., Majumder, S. K., & Ghosh, P. (2012). Microbubble-aided water and wastewater purification: A review. *Reviews in Chemical Engineering*. doi:10.1515/revce-2012-0007

- Kobayashi, T., & Ushida, A. (2023). Stability of ultra-fine bubbles against temperature, phase change, and shear stress. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 145, 110899. doi:<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2023.110899>
- Kran Nanobubble. (2021). *Ficha Técnica Generadores Kran*. Obtenido de Yumpu: <https://www.yumpu.com/es/document/read/65933106/ficha-kran>
- Lee, J. I., & Kim, J.-M. (2022). Influence of temperature on bulk nanobubble generation by ultrasonication. *Colloid and Interface Science Communications*, 49, 100639. doi:<https://doi.org/10.1016/j.colcom.2022.100639>
- Li et al, T. (2021). Generation of Bulk Nanobubbles by Self-Developed Venturi-Type Circulation Hydrodynamic Cavitation Device. *Langmuir*, 37, 12952–12960. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c02010?urlappend=%3Fref%3DPDF&jav=VoR&rel=cite-as>
- Li, P., Takahashi, M., & Chiba, K. (2009). Enhanced free-radical generation by shrinking microbubbles using a copper catalyst. *Chemosphere*, 77, 1157–1160. doi:[10.1016/j.chemosphere.2009.07.062](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.07.062)
- Lide, D. R. (2003). *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (85 ed.). New York: Advisory Board.
- Limbeek, M. A., & Seddon, J. R. (2011). Surface Nanobubbles as a Function of Gas Type. *Langmuir*, 27(14), 8694-8699. doi:<https://doi.org/10.1021/la2005387>
- Limitless Health. (Febrero de 2024). *The Environmental Impact of Oxygen Cylinders: Sustainable Practices*. Obtenido de <https://limitlesshealth.co.za/the-environmental-impact-of-oxygen-cylinders-sustainable-practices/>
- Lizama Moreno, E. O., & Dahmen Lemus, R. E. (2023). *Estados Unidos Patente n° US20230302462*. Obtenido de <https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=US408982600>
- Ma et al., X. (2022). Coupling Effects of Ionic Surfactants and Electrolytes on the Stability of Bulk Nanobubbles. *Nanomaterials*, 12|, 3450. doi:<https://doi.org/10.3390/nano12193450>
- Maedaa, Y., Hosokawa, S., Baba, Y., Tomiyama, A., & Itob, Y. (2015). Generation mechanism of micro-bubbles in a pressurized dissolution method. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 60, 201-207. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.09.010>
- MANDAL, A., KUNDU, G., & MUKHERJEE, D. (2005). Comparative Study of Gas Holdup, Bubble Size Distribution and Interfacial Area in a Downflow Bubble Column. *Chemical Engineering Research and Design*, 423–428. doi:<https://doi.org/10.1205/cherd.04065>

- Matsunaga, T. (2018). *Estados Unidos Patente n° US9981229B2*. Obtenido de <https://patents.google.com/patent/US9981229B2/es>
- Metcalf, E. (1996). *Ingeniería de Aguas Residuales* (Tercera ed.). Mexico: McGraw-Hill.
- Moleaer. (2021). *Canadá Patente n° CA3133245A*. Obtenido de <https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=CA339276462>
- Nazari et al., S. (2022). Recent Developments in Generation, Detection and Application of Nanobubbles in Flotation. *Minerals*, 12, 462. doi:<https://doi.org/10.3390/min12040462>
- Nirmalkar et al., C. (2018). Interpreting the interfacial and colloidal stability of bulk nanobubbles. *The Royal Society of Chemistry*, 14, 9643. doi:10.1039/c8sm01949e
- Nirmalkar, N., Pacek, & Barigou. (2018). On the Existence and Stability of Bulk Nanobubbles. *Langmuir*, 10964–10973. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b01163>
- OK Engineering. (2018). *Manual de instrucciones del generador de microburbujas tipo flujo de bucle OK Nozzle, modelos estándar OKE-MB01~08FJ [Manual en japonés]*. Obtenido de <https://oknozzle.com/wp-content/uploads/2017/10/MBnozzlemanual.pdf>
- Oliveira, H., Azevedo, A., & Rubio, J. (2018). Nanobubbles generation in a high-rate hydrodynamic cavitation tube. *Minerals Engineering*, 116, 32-34. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.10.020>
- Perry, R. H. (1997). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (7th ed.). McGraw-Hill.
- Puga Traverso, J. P. (2023). *Chile Patente n° WO2023137572A1*. Obtenido de <https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=WO2023137572>
- Puga Traverso, J. P. (29 de 12 de 2023). *OMPI*. Obtenido de Un Artefacto para la Mezcla de Gases en Agua en Forma de Gas Disuelto y Nano Burbujas, Útil en Procesos Industriales que Trabajan con Múltiples Fases de Tipo Líquido-Gas: <https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=WO2023137572>
- Sadatomia, M., Kawaharaa, A., Matsuura, H., & Shikatanic, S. (2012). Micro-bubble generation rate and bubble dissolution rate into water by a simple multi-fluid mixer with orifice and porous tube. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 41, 23-30. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.03.002>
- Salager, J.-L. (2007). *Granulometría Teoría*. Mérida-Venezuela.
- Shah et al., S. (2022). Synergistic and antagonistic effects in micellization of mixed surfactants. *Journal of Molecular Liquids*, 368. doi:amphiphilicmolecules

- Silva et al, J. (2024). Use of Nanobubbles to Improve Mass Transfer in Bioprocesses. *Processes*. doi:<https://doi.org/10.3390/pr12061227>
- Sniders, A., & Laizans, A. (2006). Main Conditions of Wastewater Aeration Unit Design Parameters Selection. *Engineering for Rural Development*. Obtenido de https://lbtufb.lbtu.lv/conference/engineering-rural/2006/TF_Raksti-2006-160-164.pdf
- Spellman, F. R. (2003). *Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations*. CRC Press.
- Stokes, G. G. (1851). *On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums*. From the Transactions of the Cambridge Philosophical Society.
- SUEZ. (s.f.). *Aeration Systems*. Obtenido de Water Handbook: <https://www.suezwaterhandbook.com/processes-and-technologies/biological-processes/suspended-growth-cultures/aeration-systems>
- Tadesse et al., B. (2018). Recovery of fine and ultrafine mineral particles by electroflotation– A review. *MINERAL PROCESSING AND EXTRACTIVE METALLURGY REVIEW*, 40, 108-122. doi:https://doi.org/10.1080/08827508.2018.1497627?urlappend=%3Futm_source%3DResearchgate
- Takagi, S., & Matsumoto, Y. (2011). Surfactant Effects on Bubble Motion and Bubbly Flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 43, 615-636. doi: 10.1146/annurev-fluid-122109-160756
- Takahashi, M. (2005). Z Potential of Microbubbles in Aqueous Solutions: Electrical Properties of the Gas-Water Interface. *The Journal of Physical Chemistry*, 109, 21858-21868. doi:10.1021/jp0445270
- Tchobanoglous, G. (2003). *Wastewater engineering*. New York: McGraw-Hill.
- Treybal, R. E. (1988). *Mass-Transfer Operations*. McGraw-Hill.
- Ushikubo, F. Y., Enari, M., Furukawa, T., Nakagawa, R., Makino, Y., Kawagoe, Y., & Oshita, S. (2010). Zeta-potential of Micro- and/or Nano-bubbles in Water Produced by Some Kinds of Gases. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(26), 283-288. doi:<https://doi.org/10.3182/20101206-3-JP-3009.00050>
- W. Wesley Eckenfelder, J. (2009). *Industrial Water Quality*. Mc Graw Hill.
- Web of Science. (2024). *Analyze Result: Fine Bubbles*. Obtenido de <https://www.webofscience.com/wos/woscc/analyze-results/46182d68-acba-4638-9786-42dd0c244e30-011656398d>

- Web Of Science. (2024). *Analyze Results: nanobubbles*. Obtenido de <https://www.webofscience.com/wos/woscc/analyze-results/a1f453f6-2af3-42e0-bb0c-71c648f9037c-011406d94a>
- Weijss et al., J. H. (2012). Diffusive Shielding Stabilizes Bulk Nanobubble Clusters. *ChemPhysChem*, 13, 2197-2204. doi:DOI: 10.1002/cphc.201100807
- Wu et al, M. (2021). Micro-nano bubbles production using a swirling-type venturi bubble generator. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 170. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108697>
- Wu et al., C. (2012). Generation and characterization of submicron size bubbles. *Advances in Colloid and Interface Science*, 123-132. doi:doi:10.1016/j.cis.2012.06.012
- Wu, J., Zhang, K., Cen, C., Wu, X., Mao, R., & Zheng, Y. (2021). Role of bulk nanobubbles in removing organic pollutants in wastewater treatment. *AMB Express*, 11:96. doi:<https://doi.org/10.1186/s13568-021-01254-0>
- Xiong, Y., & Peng, F. (2015). Optimization of cavitation venturi tube design for pico and nano bubbles generation. *Elsevier B.V. on behalf of China University of Mining & Technology*, 2095-2686. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.05.002>
- Xue, S., Zhang, Y., Marhaba, T., & Zhang, W. (2022). Aeration and dissolution behavior of oxygen nanobubbles in water. *Journal of Colloid and Interface Science*, 609, 584–591. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.11.061>
- Xylem. (2025). *Aeration products*. Obtenido de <https://www.xylem.com/siteassets/campaigns/oceania/solving-critical-water-challenges/treatment-aeration-overview.pdf>
- Yasuda et al, K. (2019). Generation and reduction of bulk nanobubbles by ultrasonic irradiation. *Chemical Engineering Science*, 195, 455-461. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.09.044>
- Yasuda, K. (2024). Characteristics of Ultrafine Bubbles (Bulk Nanobubbles) and Their Application to Particle-Related Technology. *KONA Powder and Particle Journal*, 41, 183-196. doi:<https://doi.org/10.14356/kona.2024004>
- Yasui et al., K. (2016). Dynamic Equilibrium Model for a Bulk Nanobubble and a Microbubble Partly Covered with Hydrophobic Material. *Langmuir*, 32, 11101-11110. doi:<http://dx.doi.org/10.1021/acs.langmuir.5b04703>
- Zhang et al. (2012). Effects of Surfactants on the Formation and the Stability of Interfacial Nanobubbles. *Langmuir*, 28, 10471-10477. doi:<https://doi.org/10.1021/la301851g>

- Zhang et al., H. (2020). Surface enrichment of ions leads to the stability of bulk nanobubbles. *Soft Matter*, 16, 5470-5477. doi:10.1039/d0sm00116c
- Zhang et al., X. (2018). Impact of surface tension of wastewater on biofilm formation of microalgae *Chlorella* sp. *Bioresource Technology*, 266, 498-506. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.06.082
- Zhou et al., Y. (2021). Long-Term Stability of Different Kinds of Gas Nanobubbles in Deionized and Salt Water. *Materials*, 14, 1808. doi:https://doi.org/10.3390/ma14071808
- Zhou et al., X. (2024). Einstein-Stokes relation for small bubbles at nanoscale. *The Journal of Chemical Physics*. doi:https://doi.org/10.1063/5.0189490

7. Anexos

A. Propiedades Físico-Químicas del Oxígeno y del Agua

Tabla 12: Propiedades del Oxígeno

Propiedad	Valor	Unidades
Masa molecular	0.032	kg/mol
Temperatura Crítica	154.58	K
Presión Crítica	49.77	atm
Punto de Ebullición (1 atm)	-183	°C
Punto de Fusión (1 atm)	-218	°C
Densidad (20°C, 1 atm)	1.33	kg/m ³
Concentración de Saturación en agua (20°C, 1 atm)	9.08	mg/L

Tabla 13: Constante de Solubilidad de Henry para diversos Gases
Fuente: (Metcalf, 1996)

T [°C]	$H \times 10^{-4}$ [atm/mol]							
	Aire	CO ₂	CO	H ₂	H ₂ S	CH ₄	N ₂	O ₂
0	4.32	0.0728	3.52	5.79	0.0268	2.24	5.29	2.55
10	5.49	0.104	4.42	6.36	0.0367	2.97	6.68	3.27
20	6.64	0.142	5.36	6.83	0.0483	3.76	8.04	4.01
30	7.71	0.186	6.20	7.29	0.0609	4.49	9.24	4.75
40	8.70	0.233	6.96	7.51	0.0745	5.20	10.4	5.35
50	9.46	0.283	7.61	7.65	0.0884	5.77	11.3	5.88
60	10.1	0.341	8.21	7.65	0.1003	6.26	12.0	6.29

Tabla 14: Solubilidad del O₂ según Temperatura.
Fuente: (Fifield & Haines, 2000)

Temperatura [°C]	Solubilidad O ₂ [ppm]
10	11.28
15	10.07
20	9.08
25	8.26
30	7.57
35	6.98
40	6.47

Tabla 15: Propiedades del Agua a 20 [°C] y 1 [atm]

Propiedad	Símbolo	Unidades	Valor
Masa molecular	MM	kg/mol	18
Densidad	ρ_L	kg/m^3	998
Viscosidad	μ_L	$mPa \cdot s$	1.002
Tensión Superficial	γ	mN/m	72.8
Presión de Vapor	P_v	Pa	2333.13

Tabla 16: Presión Interna [atm] según Tensión Superficial

	Tensión Superficial				
	40 mN/m	50 mN/m	60 mN/m	70 mN/m	72.8 mN/m
Diámetro [μm]	40	50	60	70	72,8
10000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1000	1,002	1,002	1,002	1,003	1,003
100	1,02	1,02	1,02	1,03	1,03
10	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3
1	2,6	3,0	3,4	3,8	3,9
0,5	4,2	4,9	5,7	6,5	6,7
0,3	6,3	7,6	8,9	10,2	10,6
0,2	8,9	10,9	12,8	14,8	15,4
0,1	16,8	20,7	24,7	28,6	29,7
0,001	1580,1	1974,8	2369,6	2764,4	2874,9

Ecuación 36: Ecuación de Van der Waals

$$\left(P + \frac{a}{V_m^2}\right)(V_m - b) = RT$$

Ecuación 37: Efecto de la Temperatura sobre la Transferencia de Oxígeno.

Fuente: (Metcalf, 1996)

$$K_L a_{(T)} = K_L a_{(20^\circ C)} \theta^{T-20}$$

Los valores de θ varían dentro del intervalo entre 1.015 y 1.04. El valor típico de para aireadores, tanto mecánicos como de difusores es 1.024.

B. Despresurización

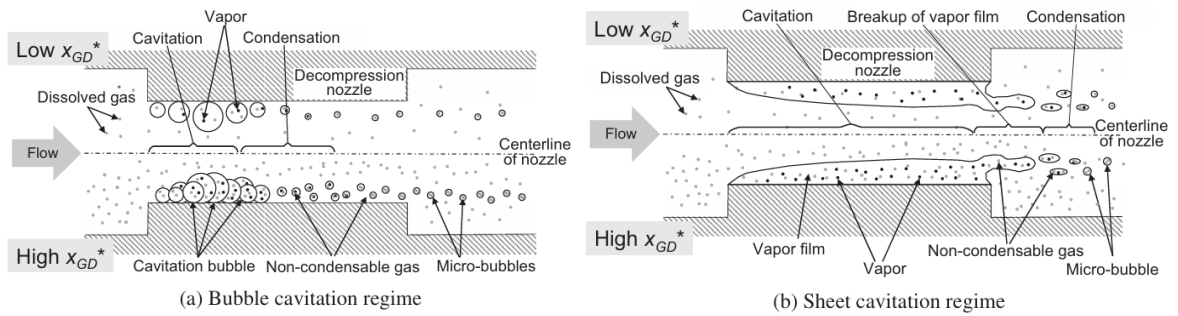


Figura 6: Cavitación por Burbujeo y Cavitación en Lámina producida por Despresurización.

Fuente: (Maedaa, Hosokawa, Baba, Tomiyama, & Itob, 2015)

C. Métodos de Generación de UFB

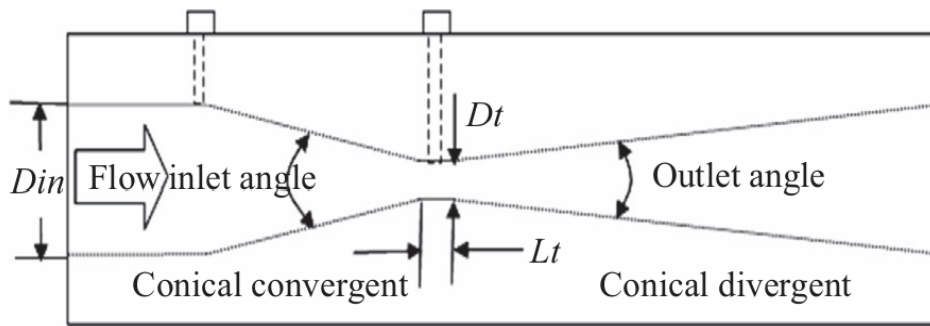


Figura 7: Diagrama de la Cavitación en un Tubo Venturi.

Fuente (Xiong & Peng, 2015)

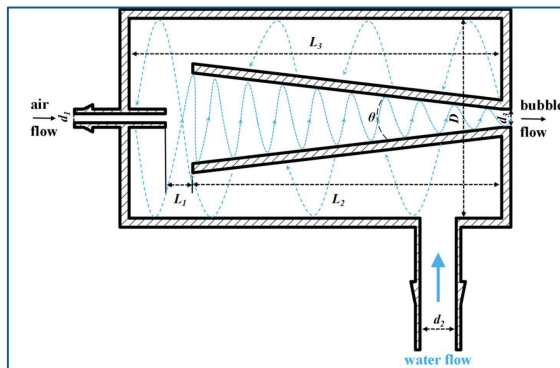


Figura 8: Izq. Diagrama de Cavitación de mecanismo de vórtice.

Fuente: (Hu et al., 2023)

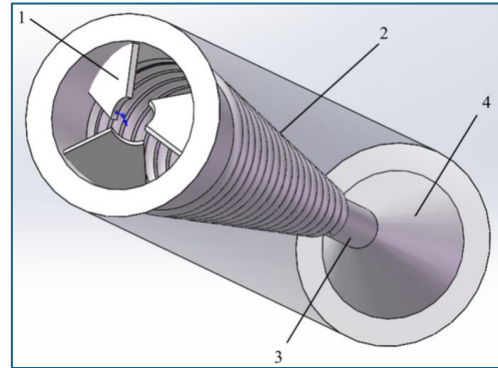


Figura 9: Der. Diagrama de Vórtice tipo Swirl

Fuente: (Wu, y otros, 2021)

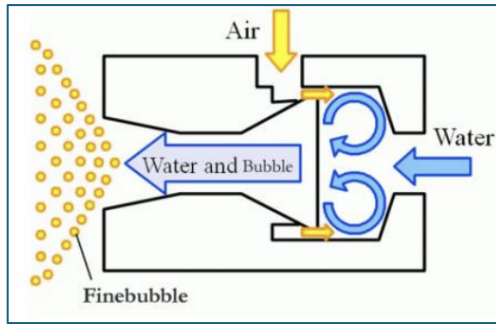


Figura 10: Izq. Inyección de Gas con Flujo en bucle.
Fuente: (OK Engineering, 2018).

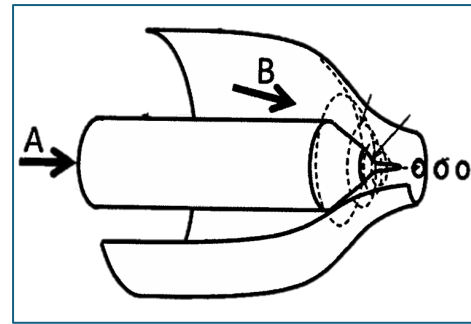


Figura 11 Der. Inyector de Gas tipo "Flow Focusing".
Fuente: (España Patente nº ES2350208A1, 2011)

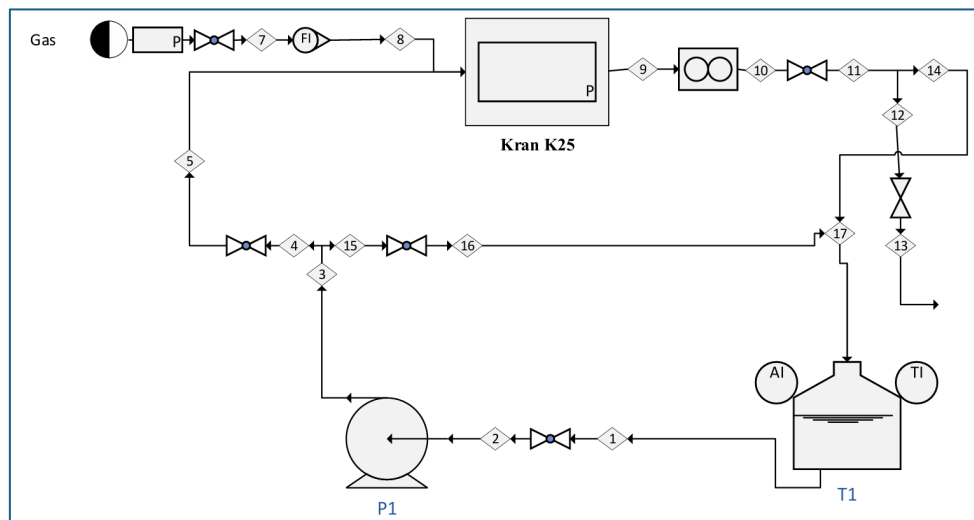


Figura 12: Generación de UFB con Inyección de Gas en un Lazo de Recirculación.
Fuente: (Arias et al., 2025)

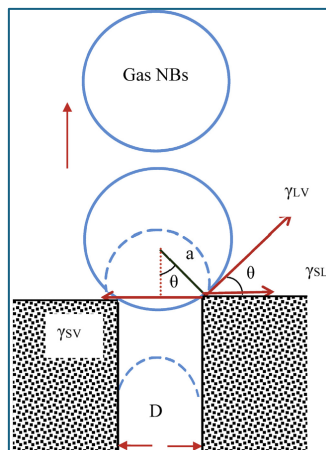


Figura 13: Izq. Formación de burbujas en los poros de membranas
Fuente: (Ahmed et al., 2018).

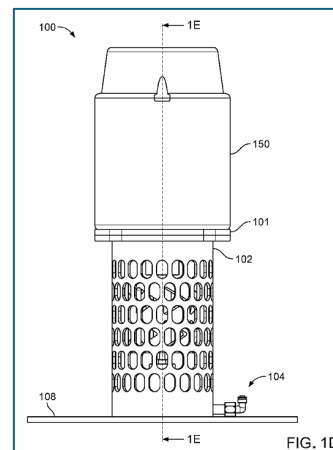


Figura 14: Der. Sistema de Inyección de Gas con Membrana.
Fuente: (Canadá Patente nº CA3133245A, 2021)

D. Parámetros de Eficiencia Energética

Ecuación 38: Potencia Eléctrica

$$P_{Ele} [W] = V_{el} [V] \cdot I [A]$$

Ecuación 39: Potencia Mecánica del Agitador

$$P_M [W] = N_p [-] \cdot \rho \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot N^3 [s^{-1}] \cdot D^5 [m]$$

Ecuación 40: Potencia Hidráulica

$$P_H [W] = \frac{\Delta P [Pa] \cdot Q \left[\frac{m^3}{s} \right]}{\eta_{Bomba}}$$

Ecuación 41: Tasa Estándar de Transferencia de Oxígeno

$$SOTR = K_L a_{20} C_{20}^* V$$

Ecuación 42: Tasa Real de Transferencia de Oxígeno

$$OTR = \alpha SOTR \cdot \frac{C^* - C}{C_{20}^*} \theta^{(T-20)}$$

Ecuación 43: Eficiencia Estándar de Transferencia de Oxígeno

$$SOTE = \frac{OTR}{Q_{aire} \cdot F_{O_2}} = \frac{OTR}{Y_R q_s \rho_{O_2}}$$

Ecuación 44: Eficiencia de Transferencia en Operación

$$OTE = \frac{OTR}{Q_{aire} \cdot F_{O_2}}$$

Ecuación 45: Eficiencia Estándar de Aireación

$$SAE = \frac{SOTR}{P}$$

E. Simulación

Tabla 17: Datos Reactor Aeróbico Biológico

PARÁMETROS OPERACIONALES		
Categoría	Valor	Unidades
Tipo de proceso	Bio Oxidación Aeróbica	–
Modo térmico	Adiabático	–
Temperatura referencia cinética	20	°C
Presión operación	1.013	bar
Concentración O ₂ disuelto	2.0	mg/L
Requerimiento de aire	0.01	std m ³ aire / (m ³ ·min)
Potencia total de aireación	100	kW
PARÁMETROS HIDRAÚLICOS		
Parámetro	Valor	Unidades
Volumen	2 500	m ³
Volumen de trabajo	2 125	m ³
Relación Vol. Trabajo/ Vol.	85	%
Tiempo de residencia hidráulica (TRH)	1.61	h
Tiempo de residencia de lodos (TRS)	26.75	h

Tabla 18: Parámetros Base del Caso de Estudio

Fuente: Elaboración propia desde reportes de SuperPro Designer

Parámetro	Unidad	Afluente	Efluente
Caudal	m ³ /h	2 000	1 903
Carga Orgánica	kg DBO ₅ /d	10 277	1 091
DBO ₅	mg/L	214	24
DQO	mg/L	412	42
SST	mg/L	159	29
OUR	kg O ₂ /h	383	

Tabla 19: Descripción y Caudal [m³/h] de las Corrientes en cada Escenario

Fuente: Elaboración Propia a partir de la Simulación

Etapas del proceso	Descripción	Nomenclatura	Caso Base	O ₂	UFB
T. Preliminar	Residuos Sólidos Urbanos	RS-01	-	-	-
T. Preliminar	Afluente	F-01	2000	2000	2000
T. Secundario	Flujo a reactor aeróbico 1	F-02	2751	2751	2751
T. Secundario	Flujo a reactor aeróbico 2	F-03	2670	2670	2670
T. Secundario	Gas a reactor 1	G-01	2550	510	255
T. Secundario	Gas a reactor 2	G-02	2550	510	255
T. Secundario	Emisión reactor 1	E-01	2383	412	166
T. Secundario	Emisión reactor 2	E-02	2447	475	229

T. Secundario	Flujo a clarificador	F-04	2655	2655	2655
T. Secundario	Efluente tratado	F-05	1904	1904	1904
Lodos	Gas a oxigenación de lodos	G-03	1275	1275	1275
Lodos	Emisión reactor de lodos	E-03	1259	1259	1259
Lodos	Purga desde clarificador (WAS)	F-06	751	751	751
Lodos	Recirculación de lodos (RAS)	F-07	714	714	714
Lodos	Retorno de lodos	F-08	38	38	38
Lodos	Lodo a oxigenación	F-09	135	135	135
Lodos	Lodo a espesador	F-10	136	136	136
Lodos	Sobre denante del espesador	F-11	109	109	109
Lodos	Lodo espesado	F-12	109	109	109
Lodos	Lodo espesado a filtro de banda	F-13	11	11	11
Lodos	Retorno del líquido filtrado	F-14	98	98	98
Lodos	Lodo Deshidratado	F-15	2	2	2
Lodos	Filtrado del filtro de banda	F-16	10	10	10
Lodos	Agua de Lavado	A-01	2	2	2

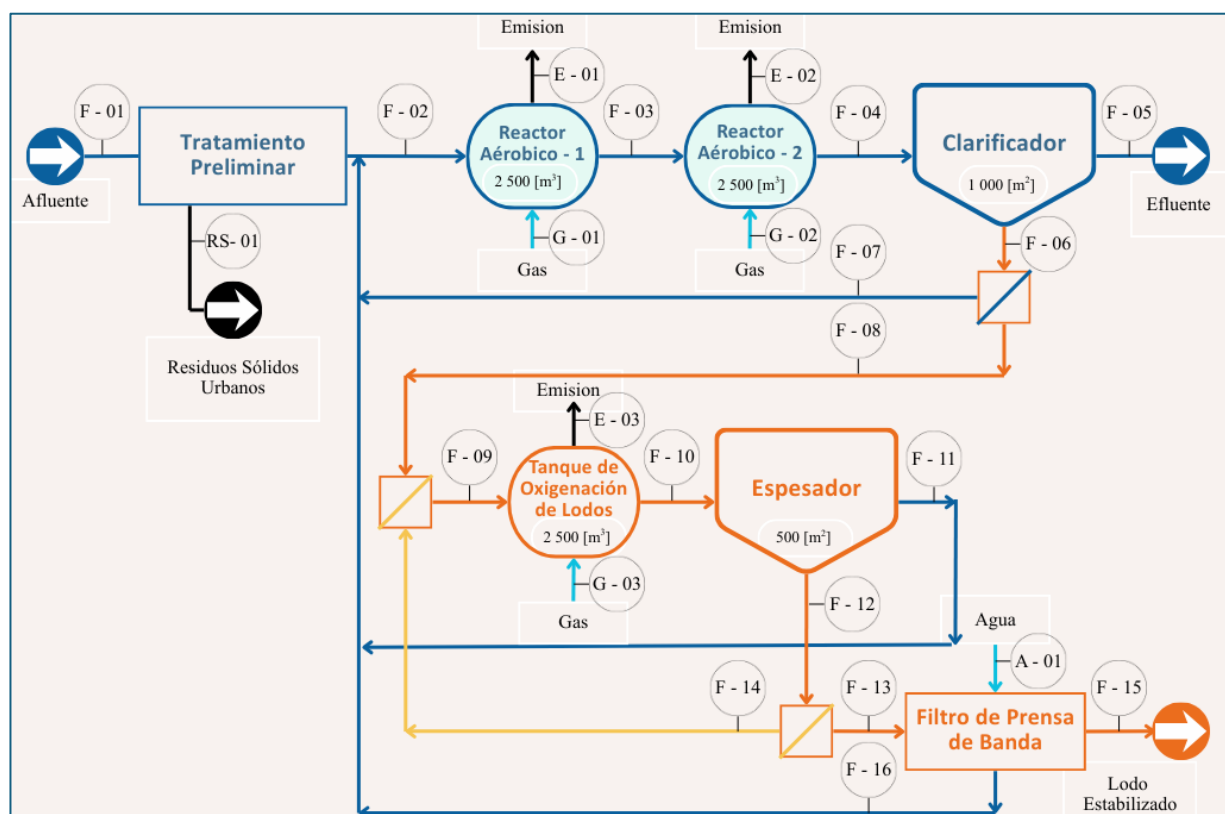


Figura 15: Diagrama de Flujo Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales por Lodos Activados.
Adaptación desde SuperPro Designer

Tabla 20: Estimación Costos de Equipos de la Planta Caso Base
Fuente: SuperPro Designer

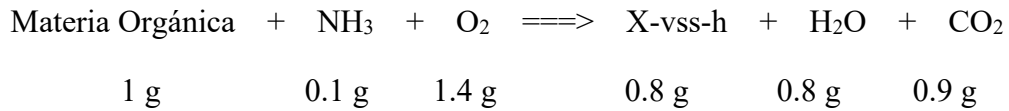
Tipo	Unidades	Tamaño	Unidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
Filtro de banda	1	1,5	m	\$ 226.000	\$ 226.000
Clarificador	2	1.000,00	m ²	\$ 551.000	\$ 1.102.000
Divisor de caudal	1	751,28	t/h	\$ -	\$ -
Divisor de caudal	1	107.048,24	kg/h	\$ -	\$ -
Caja genérica	3	630.913,33	kg/h	\$ -	\$ -
Mezclador	1	133.907,20	kg/h	\$ -	\$ -
Mezclador	4	660.840,63	kg/h	\$ -	\$ -
Espesador	1	500	m ²	\$ 364.000	\$ 364.000
Reactor aeróbico	2	2.500,00	m ³	\$ 3.152.000	\$ 6.304.000
Reactor aeróbico	2	2.500,00	m ³	\$ 3.152.000	\$ 6.304.000
Reactor aeróbico	1	2.500,00	m ³	\$ 3.152.000	\$ 3.152.000
					\$17.452.000

Tabla 21: Estimación CAPEX por Método de Generación de Burbujas Ultrafinas
Fuente: Elaboración Propia

Método	Equipo [USD]	CAPEX [USD/año]
Aire	500	\$ 10.406.050
Venturi	3 000	\$ 10.406.300
Vórtice	6 000	\$ 10.406.600
Inyección gas	9 000	\$ 10.406.900
Membranas	12 500	\$ 10.407.250

F. Reacciones

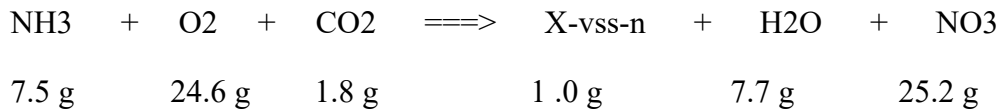
Reacción 1. Degradación del sustrato principal



- $k = 2,61 \text{ mg DBO}_4 / (\text{mg vss} - d) = 0,109 \text{ mg DBO}_4 / (\text{mg vss} - h)$ o
- $k = 0,08 \text{ mg de residuos domésticos} / (\text{mg vss} - h)$ (ya que $1 \text{ mg de residuos domésticos} = 1,36 \text{ mg DBO}_4$).
- $K_s = 6,8 \text{ mg DBO}_5 / \text{L} = 5 \text{ mg DomWaste} / \text{L}$

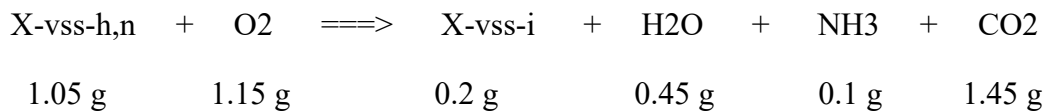
Se asume que la constante de velocidad anterior se aplica a $T = 20^\circ\text{C}$. El impacto de las variaciones de temperatura se tiene en cuenta asumiendo un valor theta de 1,04.

Reacción 2. Nitrificación



- $k = 1 \text{ mg NH}_3\text{-N} / (\text{mg X-vss-n} - d) = 0.041 \text{ mg NH}_3\text{-N} / (\text{mg X-vss-n} - h)$ or
- $k = 0.05 \text{ mg NH}_3 / (\text{mg X-vss-n} - h)$
- $K_s = 1.4 \text{ mg NH}_3 / \text{L}$

Reacción 3. Desintegración de la biomasa. Aplica tanto a X-vss-a como a X-vss-n.



- $k_d = 0.06 \text{ 1/d} = 0.002 \text{ 1/h}$