

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,
INFORMÁTICA Y MECÁNICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA



TESIS

**DISEÑO DE UN DIFUSOR DE BURBUJA FINA PARA LA REDUCCIÓN DE
CARGA ORGÁNICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES CUSCO**

PRESENTADO POR:

Br. JORGE ARTURO BLANCO CENTENO

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO MECÁNICO**

ASESOR:

Mgt. ROOSBEL DENNIS MAMANI CASTILLO

CUSCO – PERÚ

2025



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor ROOSBEL DENNIS MAMANI CASTILLO
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: DISEÑO DE UN DIFUSOR DE BURBUJA
FINA PARA LA REDUCCIÓN DE CARGA ORGÁNICA EN LA
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CUSCO

Presentado por: JORGE ARTURO BLANCO CENTENO DNI N° 47684543 ;
presentado por: DNI N°:
Para optar el título Profesional/Grado Académico de
INGENIERO MECÁNICO

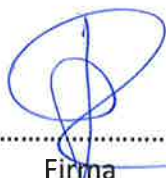
Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de**
Similitud en la UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 4 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	<u>X</u>
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto**
las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 14 de diciembre de 2025


Firma

Post firma ROOSBEL DENNIS MAMANI CASTILLO

Nro. de DNI 2400 2331

ORCID del Asesor 0000-0002-8998-184X

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 27259: 540610146

DISEÑO DE UN DIFUSOR DE BURBUJA FINA - JORGE BLANCO_REV2.docx

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:540610146

Fecha de entrega

14 dic 2025, 8:48 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

14 dic 2025, 9:21 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

DISEÑO DE UN DIFUSOR DE BURBUJA FINA - JORGE BLANCO_REV2.docx

Tamaño del archivo

34.1 MB

201 páginas

37.475 palabras

212.006 caracteres

4% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 12 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 3%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 3%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

PRESENTACIÓN

**SEÑOR DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA Y MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD
NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO.**

SEÑORES MIEMBROS DEL JURADO.

De conformidad con las disposiciones del Reglamento de Grados y Títulos Vigentes de nuestra casa de estudios, presento el trabajo de investigación titulado: **“DISEÑO DE UN DIFUSOR DE BURBUJA FINA PARA LA REDUCCIÓN DE CARGA ORGÁNICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CUSCO”**.

El presente trabajo se realizó con la finalidad de generar un proyecto de un dispositivo que genere aireación de manera adecuada dentro de un reactor de aguas residuales para mejorar las condiciones de salida de todo el volumen de agua tratada en la PTAR.

En mi trabajo de investigación he empleado conocimientos de la metodología de la investigación científica, mecánica de fluidos, hidráulica, y diseño mecánico aprendidos durante mi formación académica.

DEDICATORIA

Doy gracias a Dios por darme una nueva oportunidad en mi vida y poder culminar satisfactoriamente mi carrera profesional.

A mi padre Félix Blanco Monterroso y a mi madre Virginia Centeno Mendoza; por todo su apoyo, su incansable paciencia, y su perseverante motivación para lograr mis metas que son cada vez más importantes.

A mis hermanos Johnny Alberto, José Luis Cristian y mi Charito, por su ejemplo, la unión, toda su confianza en mi capacidad y sobre todo su cariño incondicional.

Jorge Arturo Blanco Centeno.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios quien me permite lograr mis objetivos, a mis familiares y amigos quienes estuvieron con su apoyo a cada momento de este camino.

A mi asesor de tesis, Mgtr. Ing. ROOSBEL DENNIS MAMANI CASTILLO, por estar involucrado desde el primer día en mi proyecto de tesis, por su apoyo académico y por solucionar todas mis dudas para la realización de la misma.

A mi maestro y guía en el campo profesional Ing. Mecánico DANNY CARRASCO VICHARRA por todo el apoyo brindado durante mis inicios en mi vida laboral.

Mi agradecimiento a todos los docentes de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, en especial a mi Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica por ser parte de este importante logro académico.

Bach. Jorge Arturo Blanco Centeno.

INTRODUCCIÓN

La presente tesis titulada “**DISEÑO DE UN DIFUSOR DE BURBUJA FINA PARA LA REDUCCIÓN DE CARGA ORGÁNICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CUSCO**”. busca presentar una mejora a los dispositivos de aireación tradicionales mediante un diseño eficiente en la geometría y el aprovechamiento de los materiales que se encuentran en el mercado; de esta manera reducir los contaminantes (carga orgánica) presentes en las aguas servidas tratadas en la PTAR de san Jerónimo de Cusco.

Los dispositivos de aireación actuales, así como la configuración de estos mismos dentro de los reactores en las etapas secundarias del tratamiento de aguas servidas son un problema importante ya que la carga orgánica a eliminar mediante el proceso de oxidación es deficiente; de esta manera realizando los cálculos adecuados se logra una reducción considerable en los parámetros de salida del efluente tratado.

Al diseñar un dispositivo con un ingreso adecuado a cada difusor de burbuja fina podremos lograr una aireación eficiente dentro de los reactores secundarios de las PTARs en nuestra localidad, esto conlleva a un mejor manejo de las aguas tratadas y a una reducción considerable en el consumo energético.

La metodología de investigación que se presenta es de enfoque científico, cuantitativo del tipo explicativo.

Esta tesis está organizada por nueve capítulos: en el primer capítulo se presenta las generalizades para el planteamiento del problema; el segundo revisa el marco teórico sobre las tecnologías actuales y los dispositivos de aireación; en el tercero el método de investigación; el cuarto presenta la identificación de parámetros de operación; el quinto presenta la influencia de las características geométricas; el sexto se desarrolla la validación del diseño; el séptimo describe la rentabilidad de una futura implementación; el octavo mostrará todas las pruebas de

hipótesis y finalmente la presentación de resultados y discusión de los mismos en el capítulo noveno.

RESUMEN

La investigación realizada trata de un dispositivo de aireación mediante burbuja fina.

Conforme a Kamei et al. (2023) un difusor de burbuja fina es un dispositivo que permite generación de burbujas de gas cuyas dimensiones oscilan entre micrómetros y nanómetros.

En este contexto, los difusores de burbujas finas han surgido como herramientas estratégicas para mejorar la transferencia de oxígeno disuelto. Estos dispositivos aumentan notablemente la transferencia de masa en la interfase, ya que crean pequeñas burbujas que tienen un largo tiempo de residencia en el medio líquido, mejorando así el proceso de oxigenación. El coeficiente global de transacción de masa (KLa) se ve influenciado positivamente tanto por el área interfacial como por las condiciones fluidodinámicas del sistema. (Rizzardi , y otros, 2023).

La metodología de investigación que se presenta es de enfoque científico, cuantitativo del tipo explicativo.

La metodología de diseño a utilizar en este proyecto será una metodología propia adaptada y derivada de la VDI 2221, la cual es reconocida por su enfoque sistemático y estructurado en el diseño de productos técnicos. Esta metodología permitirá establecer un proceso claro y ordenado para el diseño del sistema de aireación, centrado en la optimización del parámetro KLa , crucial para la eficiencia del proceso de aireación.

Se realizó el modelado y luego en análisis mediante MATLAB (simulink) donde se determinó que la reducción de la carga orgánica presente en el tanque reactor es considerable.

Palabras clave: Difusor, burbuja, fina, carga.

ABSTRACT

This research focuses on a fine bubble aeration device.

According to Kamei et al. (2023), a fine bubble diffuser is a device that generates gas bubbles with dimensions ranging from micrometers to nanometers.

In this context, fine bubble diffusers have emerged as strategic tools for improving dissolved oxygen transfer. These devices significantly increase mass transfer at the interface, as they create small bubbles with a long residence time in the liquid medium, thus improving the oxygenation process. The overall mass transfer coefficient (KLa) is positively influenced by both the interfacial area and the fluid dynamic conditions of the system (Rizzardi et al., 2023).

The research methodology presented here is a scientific, quantitative, and explanatory approach. The design methodology used in this project will be a proprietary methodology adapted from VDI 2221, which is recognized for its systematic and structured approach to the design of technical products. This methodology will establish a clear and organized process for the design of the aeration system, focusing on optimizing the KLa parameter, crucial for the efficiency of the aeration process.

Modeling was performed, followed by analysis using MATLAB (Simulink), which determined that the reduction of the organic load present in the reactor tank is considerable.

Keywords: Diffuser, bubble, fine, charge.

ÍNDICE

ÍNDICE	ii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
INDICE DE FIGURAS.....	viii
CAPÍTULO I.....	1
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1. Situación Problemática	1
1.2. Formulación del Problema.....	3
1.2.1. Problema general	3
1.2.2. Problemas específicos	4
1.3. Objetivos de la Investigación.....	4
1.3.1. Objetivo general.....	4
1.3.2. Objetivos específicos	4
1.4. Hipótesis	5
1.4.1. Hipótesis general.....	5
1.4.2. Hipótesis específicas	5
1.5. Identificación de variables e Indicadores.....	5
1.6. Operacionalización de variables	6
1.7. Justificación de la investigación	9
1.8. Alcances	9
1.9. Limitaciones	10
CAPÍTULO II	12
II. MARCO TEÓRICO	12
2.1. Antecedentes empíricos de la investigación	12
2.1.1. Antecedentes a nivel internacional.....	12
2.1.2. Antecedentes a nivel nacional.....	15

2.2. Bases teóricas	20
2.2.1. Diseño de un Difusor de burbuja fina	20
2.2.2. Carga orgánica	27
2.2.3. Marco conceptual.....	37
CAPÍTULO III	43
III. METODOLOGÍA	43
4.1. Ámbito de estudio.....	43
4.2. Localización política y geográfica.....	44
4.3. Método de investigación.....	45
4.4. Tipo y nivel de investigación.....	45
4.5. Unidad de análisis.....	46
4.6. Población de estudio	47
4.7. Tamaño de muestra (Centrarnos en una PTAR en específico “Cusco”)	47
4.8. Técnicas de selección de muestra.....	47
4.9. Técnicas de recolección de información.....	47
4.10. Técnicas de análisis e interpretación de la información	48
4.11. Metodología de Diseño.....	51
4.12. Técnicas para demostrar la verdad o falsedad de la hipótesis planteada	51
CAPÍTULO IV	53
IV. IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN.	53
4.1. Base de datos y formulación del modelo.....	53
4.1.1. Presentación de datos históricos de referencia.....	53
4.1.2. Modelo matemático para las condiciones de operación y diseño.	55
4.2. Simulación, evaluación, y diseño final	67
4.2.1. Simulación de condiciones de operación y diseño.....	67
CAPÍTULO V	75
V. INFLUENCIA DE CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS.	75

5.1. Diseño geométrico del difusor.....	75
5.1.1. Materiales.....	76
5.1.2. Geometría del cuerpo.....	77
5.1.3. Configuración de orificios	78
5.1.4. Requerimientos mecánicos	79
5.1.5. Pérdida de carga en la línea	81
5.1.6. Opciones de soporte del sistema.....	84
CAPÍTULO VI.....	87
VI. VALIDACION DEL DISEÑO	87
6.1. Modelo matemático para estimar la eficiencia teórica de remoción de contaminantes	87
6.2. Evaluación teórica de Oxígeno disuelto	90
6.3. Validación matemática de diseño	92
6.3.1. Demanda Química de Oxígeno.....	92
6.3.2. Demanda Bioquímica de Oxígeno	93
6.3.3. Sólidos Totales en Suspensión.....	93
CAPÍTULO VII.....	94
VII. RENTABILIDAD DE FABRICACIÓN DEL DISEÑO.....	94
7.1. Evaluación financiera y análisis del flujo económico	94
CAPÍTULO VIII	114
VIII. PRUEBAS DE HIPÓTESIS.....	114
8.1. Primera Hipótesis Específica.....	114
8.2. Segunda Hipótesis Específica	115
8.3. Tercera Hipótesis Específica	117
8.4. Cuarta Hipótesis Específica	119
8.5. Hipótesis General	119
CAPÍTULO IX.....	121
IX. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	121

9.1. Presentación de resultados	121
9.2. Discusión con antecedentes de estudio.....	128
CONCLUSIONES	135
RECOMENDACIONES	137
BIBLIOGRAFÍA.....	139
ANEXOS	146
a. Matriz de consistencia.....	146
b. Matriz de operacionalización.....	148
c. Planos del difusor tubular de burbuja fina con garganta Venturi.....	150
d. Validación por Simulación.	154
e. Validación por Profesionales.	161
f. Especificaciones técnicas – Fabricante SSI Aeration.....	172
g. Especificaciones técnicas – Fabricante Barmatec	174
h. Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM	176
i. Rugosidad absoluta – UNAM.....	178
j. Código de Matlab para ejecución de la Simulación 01	180
k. Código de Matlab para ejecución de la Simulación 02	181
l. Código de Matlab para ejecución de la Simulación 03	182

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Datos históricos de operación – PTAR San Jerónimo (2023)</i>	54
Tabla 2. <i>Resumen de los escenarios de simulación iniciales.</i>	67
Tabla 3. <i>Primer cálculo de KLa para primera simulación.</i>	67
Tabla 4. <i>Establecimiento de parámetros de operación a partir de la primera simulación.</i>	69
Tabla 5. <i>Segundo cálculo de KLa para la segunda simulación.</i>	69
Tabla 6. <i>Establecimiento de parámetros de operación a partir de la segunda simulación.</i> ...	71
Tabla 7. <i>Tercer cálculo de KLa para la tercera simulación.</i>	72
Tabla 8. <i>Condiciones de operación y diseño del difusor.</i>	73
Tabla 9. <i>Comparación de propiedades de materiales.</i>	76
Tabla 10. <i>Perdidas de presión ante distintos diseños de garganta Venturi.</i>	78
Tabla 11. <i>Dimensionado del difusor de burbuja fina</i>	81
Tabla 12. <i>Indicadores promedio del afluente y efluente</i>	89
Tabla 13. <i>Primer cálculo de concentración de oxígeno con consumo biológico.</i>	92
Tabla 14. <i>Validación de Remoción de indicador DQO</i>	92
Tabla 15. <i>Validación de remoción de indicador DBO</i>	93
Tabla 16. <i>Validación de remoción de indicador SST</i>	93
Tabla 17. <i>Presupuesto de Materias Primas Directas</i>	95
Tabla 18. <i>Costo unitario MPD</i>	95
Tabla 19. <i>Presupuesto de Inversiones Tangibles</i>	96
Tabla 20. <i>Costos de personal</i>	97
Tabla 21. <i>Resumen de costos de MOD</i>	97
Tabla 22. <i>Mano de Obra Indirecta</i>	98
Tabla 23. <i>Mano de Obra Indirecta unitaria</i>	98
Tabla 24. <i>Mano de Obra Indirecta unitaria</i>	98
Tabla 25. <i>Costo unitario de MPD</i>	99
Tabla 26. <i>Costo unitario de MPD</i>	100
Tabla 27. <i>Presupuesto de Costo de Ventas (costo de producción)</i>	100
Tabla 28. <i>Presupuesto de Personal Administrativo</i>	102
Tabla 29. <i>Presupuesto de Otros Gastos Administrativos</i>	103
Tabla 30. <i>Presupuesto de Gastos Administrativos</i>	103
Tabla 31. <i>Presupuesto de Personal de Ventas</i>	104

Tabla 32. <i>Presupuesto de Otros Gastos de Ventas</i>	104
Tabla 33. <i>Presupuesto de Gastos de Ventas</i>	105
Tabla 34. <i>Presupuesto de Gastos Operativos</i>	105
Tabla 35. <i>Presupuesto Operativo</i>	105
Tabla 36. <i>Capital de trabajo inicial</i>	107
Tabla 37. <i>Presupuesto de inversión</i>	107
Tabla 38. <i>Presupuesto de Inversiones Intangibles</i>	108
Tabla 39. <i>Amortización de Intangibles</i>	108
Tabla 40. <i>Estado de resultados proyectados</i>	109
Tabla 41. <i>Flujo de Caja</i>	110
Tabla 42. <i>Cuadro de demanda proyectada</i>	111
Tabla 43. <i>VAN</i>	112
Tabla 44. <i>TIR</i>	112
Tabla 45. <i>Periodo de recuperación económico</i>	112
Tabla 46. <i>Resultados de parámetros hidráulicos y transferencia</i>	116
Tabla 47. <i>Indicadores de calidad del agua</i>	117
Tabla 48. <i>Eficiencia de indicadores de calidad del agua</i>	117
Tabla 49. <i>Remoción promedio de indicadores.</i>	125
Tabla 50. <i>Remoción de indicador SST</i>	125
Tabla 51. <i>Remoción de indicador DBO</i>	126
Tabla 52. <i>Remoción de indicador DQO</i>	127

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Límites Máximos Permisibles para los Efluentes de PTAR	37
Figura 2. Tratamiento secundario de la PTAR Seda Cusco	48
Figura 3. Dispositivo de burbuja fina (Modelo 1).....	50
Figura 4. Dispositivo de burbuja fina (Modelo 2).....	50
Figura 5. Primera simulación de parámetros de diseño y operación en Matlab.....	68
Figura 6. Primera simulación de parámetros de diseño y operación en Matlab.....	69
Figura 7. Segunda simulación de parámetros de diseño y operación en Matlab.....	70
Figura 8. Respuesta de segunda simulación de diseños ante estímulo de escalón unitario.....	70
Figura 9. Revisión de Ts y Tr de diseño E-1.....	71
Figura 10. Tercera simulación de parámetros de diseño y operación en Matlab	72
Figura 11. Tercera simulación de parámetros de diseño y operación en Matlab	73
Figura 12. Boceto del diseño geométrico del difusor de burbuja fina.....	81
Figura 13. Estimación de coeficiente de fricción para tubo liso de Plástico	83
Figura 14. Estimación de coeficiente de fricción para tubos estirados de acero	83
Figura 15. Soporte de tipo parrilla	84
Figura 16. Implementación de sistema en soporte de tipo parrilla.....	85
Figura 17. Soporte de tipo varilla con abrazaderas	85
Figura 18. Implementación de sistema en soporte de tipo varilla con abrazaderas.....	86
Figura 16. Porcentaje de OD (%) alcanzado de acuerdo al valor de diseño (KLa).....	115
Figura 17. Diagrama TRH.....	116
Figura 18. Flujo de funcionamiento de la PTAR con la incorporación del Sistema de Aireación	122
Figura 19. Referencia ilustrativa de la disposición de los difusores en el reactor. Fuente: elaboración propia.....	122
Figura 20. Gráfico de la remoción promedio de indicadores	125
Figura 21. Grafica de la remoción de indicador SST	126
Figura 22. Grafica de la remoción de indicador DBO	127
Figura 23. Grafica de la remoción de indicador DQO	128

CAPÍTULO I

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Situación Problemática

La gestión eficiente en la purificación de líquidos cloacales representa uno de principales retos ambientales que afrontan países en formación, especialmente en contextos urbanos donde el crecimiento poblacional supera la capacidad de las infraestructuras existentes. De acuerdo con Mora-Aparicio et al. (2022) Estas aguas contienen una compleja de compuestos biológicos y minerales, siendo materia orgánica biodegradable medida según consumo biológico de oxígeno (CBO) y del requerimiento químico de oxígeno (RQO) uno de los principales indicadores de contaminación que compromete el bienestar colectivo y los entornos hídricos. Diversas plantas de tratamiento en América Latina no logran alcanzar eficiencias óptimas en remoción a esta carga. Tal es el caso de la PTAR Los Tajos, en Costa Rica, donde, a pesar de alcanzar una remoción del 49.8 % en DBO y del 68.5 % en sólidos suspendidos totales, su diseño estructural limitado impide cumplir con estándares más exigentes, especialmente durante épocas de alta carga hidráulica (Berrío & Ossa, 2024). Este tipo de deficiencias evidencia la urgencia de optimizar las infraestructuras responsables del suministro de oxígeno, particularmente en las unidades de aireación, cuya efectividad es crucial para la oxidación biológica de los contaminantes.

En este proceso, los difusores de aire son componentes clave. Conforme a lo mencionado por Echeverría et al. (2021) Su diseño geométrico influye directamente en la generación de burbujas finas, que optimizan la transferencia de oxígeno y, por tanto, la eficiencia del proceso biológico. Se ha comprobado que los sistemas de burbuja fina aumentan el tiempo de retención y la superficie de contacto gas-líquido, favoreciendo así el metabolismo

de los seres microscópicos responsables de descomponer los compuestos orgánicos. Sin embargo, muchas PTAR de mediana escala operan con dispositivos que no han sido diseñados bajo criterios mecánicos adecuados, lo cual limita su rendimiento y dificulta su adaptación a las características específicas del afluente.

García et al. (2022) menciona que la situación se agrava en sectores industriales como el curtidorero o textil, donde los efluentes presentan elevado contenido de compuestos orgánicos, elementos metálicos tóxicos y colorantes. En estos contextos, el uso de dispositivos de tratamiento mal dimensionados, como celdas de electrocoagulación o sistemas de aireación no optimizados, repercute negativamente en el cumplimiento de los límites normativos. Por ejemplo, la planta Alianza Virgen de la Asunción presentó concentraciones de DQO de hasta 94.2 mg/L y DBO de 25.2 mg/L en su efluente tratado, lo que evidencia deficiencias en su diseño operativo.

Estudios recientes han resaltado que el diseño mecánico de los dispositivos influye directamente en la eficiencia global de las PTAR, así como en el tiempo de funcionamiento de los equipos y en los costos operativos. Modificaciones en la geometría de electrodos, el espaciamiento entre componentes o la distribución del flujo pueden incrementar significativamente la eficiencia del sistema, siempre que se basen en criterios técnicos validados y simulaciones funcionales (Peñuela & Leyes, 2021). En este sentido, el diseño mecánico de los difusores representa una oportunidad concreta para mejorar el desempeño de las plantas mediante una mayor eficiencia en la aireación.

Echeverría et al. (2021) menciona que los casos exitosos, como el de la planta Colquerancho en Bolivia, muestran que la incorporación de dispositivos como el reactor anaerobio compartimentado (RAC), acompañado de mejoras en pretratamiento y lodos, logró incrementar la remoción de DQO de 52 % a 67 %, confirmando el impacto directo del rediseño

de unidades funcionales en la eficiencia de la planta De igual modo, Centeno-Bordones et al. (2021) en el sector petrolero, la combinación de tecnologías como la oxidación avanzada solar con sistemas biológicos ha permitido remociones de DQO de hasta 86.5 % y de DBO5 de 72.9 %, demostrando que los dispositivos bien diseñados pueden ser decisivos incluso en ambientes con alta complejidad contaminante.

Pese a estos avances, Santiago et al. (2025) aún persiste una brecha técnica respecto al diseño específico y optimizado de dispositivos como los difusores de burbuja fina. Muchos de ellos no consideran factores críticos como la distribución homogénea del aire, la resistencia al ensuciamiento o la pérdida mínima de presión, aspectos fundamentales para garantizar su funcionalidad en condiciones reales de operación. Esta carencia limita el rendimiento de las plantas, incrementa los gastos operativos y compromete la adherencia a las regulaciones ecológicas.

Por tanto, se identifica como problema central la falta de diseños mecánicos eficientes y contextualizados de difusores de burbuja fina, que respondan a los parámetros particulares de funcionamiento de las PTAR y que contribuyan de forma efectiva a la disminución del contenido orgánico en los vertidos.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema general

¿Cómo el diseño de un difusor de burbuja fina contribuye a la reducción de carga orgánica en la planta de tratamiento de aguas residuales Cusco?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cómo determinar los parámetros de operación del difusor de burbuja fina que optimizan el aprovechamiento de oxígeno para la reducción de carga orgánica en la planta de tratamiento de aguas residuales Cusco?
- ¿Cómo influyen las características geométricas del difusor de burbuja fina en la concentración de oxígeno en la planta de tratamiento de aguas residuales Cusco?
- ¿Cómo validar el diseño de difusor de burbuja fina en función de los valores de concentración de DQO, DBO y SST en la planta de tratamiento de aguas residuales Cusco?
- ¿Cuál es la rentabilidad de llevar a cabo la fabricación del diseño de un difusor de burbuja fina para su implementación en sistemas de tratamiento de aguas?

1.3. Objetivos de la Investigación

1.3.1. Objetivo general

Diseñar un difusor de burbuja fina que contribuya a la reducción de carga orgánica en la planta de tratamiento de aguas residuales Cusco.

1.3.2. Objetivos específicos

- Identificar los parámetros de operación del difusor de burbuja fina que optimizan el aprovechamiento de oxígeno para la reducción de carga orgánica en la planta de tratamiento de aguas residuales Cusco.
- Evaluar la influencia de las características geométricas del difusor de burbuja fina en la concentración de oxígeno de la planta de tratamiento de aguas residuales Cusco.
- Validar el diseño de difusor de burbuja fina en base a los valores de concentración de DQO, DBO y SST en la planta de tratamiento de aguas residuales Cusco.
- Evaluar la rentabilidad de fabricación del diseño de un difusor de burbuja fina para su implementación en sistemas de tratamiento de aguas.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

El diseño de un difusor de burbuja fina contribuye significativamente a la reducción de la carga orgánica en la planta de tratamiento de aguas residuales Cusco.

1.4.2. Hipótesis específicas

- Determinar adecuadamente los parámetros de diseño permite optimizar el aprovechamiento de oxígeno para reducir la carga orgánica en la planta de tratamiento de aguas residuales Cusco.
- Las características geométricas del difusor de burbuja fina influyen significativamente en la concentración de oxigenación del sistema de tratamiento de aguas residuales Cusco.
- La validación del funcionamiento del difusor de burbuja fina permite reducir los valores de concentración de DQO, DBO y SST en la planta de tratamiento de aguas residuales Cusco.
- La fabricación del diseño de un difusor de burbuja fina resulta rentable, dado que los indicadores económicos proyectados son positivos y superiores a los valores mínimos requeridos para justificar la inversión.

1.5. Identificación de variables e Indicadores

Variable Independiente: Difusor de burbuja fina

Variable Dependiente: Carga Orgánica

Indicadores

- Diámetro de orificios del difusor
- Simulación del dispositivo
- Concentrabilidad de oxígeno en el reactor
- Caída de presión a través del difusor

- Tiempo de operación
- Simulación de datos
- Concentrabilidad de DBO5 en efluente
- Concentración de DQO total
- Porcentaje de sólidos suspendidos totales (SST)

1.6. Operacionalización de variables

Diseño de difusor de burbuja fina para la reducción de carga orgánica en plantas de tratamiento de aguas residuales					
Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición
Variable Independiente: Difusor de burbuja fina	Un difusor de burbuja fina es un dispositivo que libera aire en forma de microburbujas en sistemas de tratamiento de aguas, permitiendo una mejor oxigenación del agua para favorecer la descomposición biológica de contaminantes por microorganismos, optimizando así la eficiencia del proceso.	Son elementos que actúan como intermediarios entre el aire u oxígeno y el agua. Por lo tanto, facilitan el paso de burbujas, ya sean grandes o pequeñas, a través de sus aberturas, generadas al aplicar presión de aire u oxígeno sobre un material permeable sumergido en agua, con el propósito de favorecer el proceso de oxidación de la materia orgánica disuelta o suspendida en depósitos de agua (Reynaga, Díaz, & Pocorey, 2020).	Diseño Geométrico	Diámetro de orificios del difusor	Milímetros (mm)
				Simulación del dispositivo	Tiempo de establecimiento
			Eficiencia de Oxigenación	Concentración de oxígeno disuelto en el reactor	Miligramo por litro (mg/L)
			Pérdida de Carga	Caída de presión a través del difusor	Kilopascales (KPa)
			Durabilidad Operativa	Tiempo de operación	Horas (h)
				Simulación de datos	Kla (h^{-1})
Variable Dependiente: Carga orgánica	La carga orgánica es la cantidad de materia orgánica presente en el agua residual, generalmente expresada en gramos o kilogramos de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) por	Cantidad de compuestos orgánicos, usualmente representada mediante la DBO5, que se introduce en un sistema de tratamiento específico presente en	Demanda Bioquímica de Oxígeno	Concentración de DBO5 en el efluente	Miligramo por litro (mg/L)
			Demanda Química de Oxígeno	Concentración de DQO total	Miligramo por litro (mg/L)
			Sólidos Orgánicos	Sólidos suspendidos totales	Mililitro /por litro

	día. Representa el alimento disponible para los microorganismos en el tratamiento biológico.	el agua residual; se expresa como masa por unidad de tiempo por unidad de área o por unidad de masa (Calderón & Orellana, 2022).		(SST)	(ml/L)
--	--	--	--	-------	--------

1.7. Justificación de la investigación

La presente investigación busca abordar el requerimiento urgente de formar los pasos de aireación en instalaciones destinadas al saneamiento de aguas usadas mediante el diseño mecánico de un difusor de burbuja fina capaz de mejorar el rendimiento en la eliminación de partículas sólidas en suspensión (PSS), los cuales representan un componente clave de la carga orgánica que afecta la calidad del efluente tratado. La problemática ambiental vinculada al vertimiento de efluentes con alta concentración de SST no solo compromete la observancia de la regulación actual, sino que limita la capacidad operativa de las instalaciones, en particular las que aún emplean dispositivos de aireación obsoletos o mal dimensionados. En este sentido, el enfoque pretende desarrollar un dispositivo considerando factores como: la distribución de orificios, la reducción de presión, la vida útil y la eficiencia de transferencia de oxígeno. Estos factores afectan directamente la desestabilización de partículas y la reducción de sólidos orgánicos. Desde una perspectiva metodológica, el estudio incluye la elaboración y la proyección de una representación de difusor, que permitirá comprobar su rendimiento en entornos controlados y, por lo tanto, proporcionar evidencia válida y reproducible que se podrá utilizar en el futuro para diferentes aplicaciones. Además, este diseño puede describirse como teniendo una relevancia práctica, ya que puede ser escalado y configurado para situaciones del mundo real, ayudando así en la mejora continua del tratamiento, el refinamiento de procesos y la consecución de la fiabilidad ambiental.

1.8. Alcances

- Se desarrollará el diseño mecánico y funcional de un difusor de burbuja fina enfocado a mejorar la eficacia en aireación en métodos de depuración de aguas residuales.
- Se incluirá la elaboración de planos técnicos del dispositivo y la selección adecuada de insumos y materiales para su fabricación.

- Se utilizarán herramientas de simulación computacional para analizar el comportamiento del difusor bajo condiciones normales de operación.
- Se calculará el impacto del diseño en disminución de parámetros contaminantes, específicamente DBO5, DQO y SST, utilizando datos experimentales y normativos.
- Las pruebas de validación se realizarán en condiciones controladas, representativas de sistemas biológicos convencionales.
- El diseño estará orientado a plantas de tratamiento de tipo piloto o de mediana capacidad, con énfasis en la facilidad de implementación.
- Se considerarán criterios de eficiencia energética, durabilidad operativa y compatibilidad con tecnologías existentes.

1.9. Limitaciones

- No habrá fabricación física del difusor, por lo tanto, la validación estará restringida a simulaciones computacionales y análisis teóricos.
- La investigación no incluye la implementación en la vida real del difusor en una planta de tratamiento, por lo que variables del campo como interferencias mecánicas o mantenimiento operativo no aplican.
- El enfoque del estudio estará únicamente centrado en el diseño del difusor, y no en el diseño completo de plataforma de aireación o componentes a mayor nivel en la planta de tratamiento.
- No se evaluarán condiciones de operación extremas, como sobrecarga hidráulica, choques de caudal o variaciones abruptas de temperatura.
- No se incluirán efluentes industriales con alta carga tóxica, metales pesados o compuestos no biodegradables, limitando el análisis a residuales típicas de proveniencia doméstica.

- El rendimiento en la eliminación a materia biodegradable se estimará mediante indicadores teóricos y simulados, no por mediciones en laboratorio con muestras reales.
- La selección de materiales estará basada en criterios técnico-normativos generales, sin pruebas físicas de resistencia, ensuciamiento o desgaste.

CAPÍTULO II

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes empíricos de la investigación

2.1.1. Antecedentes a nivel internacional

1. Sánchez y Román (2020) en su investigación “Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales industriales para una empresa empacadora y exportadora de camarón en la ciudad de Guayaquil” donde señalaron como propósito diseñar un esquema de depuración de aguas industriales (PTARI) fue desarrollado para la compañía Frigoexport C.A., con el propósito de satisfacer las exigencias ecológicas y maximizar la eficacia en aprovechamiento hídrico. El enfoque metodológico implicó la formulación de una estructura modular destinada al procesamiento de efluentes industriales, basándose en ensayos de tratabilidad para definir parámetros óptimos como la cantidad adecuada de agentes coagulantes y la regulación del nivel de acidez. Entre hallazgos más relevantes encuentran registros de consumo biológico de oxígeno (DBO5) de 57,02 mg O₂/l y de requerimiento químico (DQO) de 188,03 mg O₂/l, obtenidos tras aplicar el sistema de depuración. La propuesta incorpora un tratamiento fisicoquímico compuesto por fases de coagulación, floculación y un proceso prolongado de aireación, complementado con un biorreactor destinado a la eliminación de compuestos orgánicos. Las deducciones finales señalan que el modelo de planta presentado favorecerá el reaprovechamiento del agua, alineándose con las disposiciones regulatorias ambientales y promoviendo un desempeño más eficiente del sistema operativo.

2. Torres (2024) en su trabajo nombrado “Diseño de una unidad de tratamiento de aguas residuales domésticas para las instalaciones del Campus María Auxiliadora” tuvo por finalidad desarrollar un diseño a tratantes adecuados de residuales a dicho área. El enfoque metodológico adoptado corresponde a un estudio de carácter experimental, en el cual se llevaron a cabo evaluaciones fisicoquímicas de los efluentes con el fin de determinar sus propiedades,

empleando indicadores como el consumo biológico de oxígeno (CBO) y la cantidad de partículas sólidas en suspensión (PSS) y pH. Los resultados evidenciaron una alta carga orgánica, con una eficiencia de remoción de contaminantes del 83% con el diseño propuesto, que incluye un reactor biológico y un sedimentador secundario, el costo del proyecto se estimó en 86,050 USD, lo cual se considera viable para su implementación. En cuanto a las conclusiones, se determinó que el diseño propuesto cumple con las normativas ambientales, ya que logra disminuir aguas residuales a niveles aceptables para su descarga, además, se recomienda implementar esta instalación de depuración no únicamente para cumplir con la legislación vigente, sino también para mejorar la gestión ambiental del campus y apoyar la formación técnica de los estudiantes.

3. Tsave et al. (2021) en su estudio titulado “Un dispositivo híbrido para mejorar la flotación de partículas finas mediante la combinación de microburbujas con burbujas convencionales” tuvieron de propósito desarrollar un dispositivo híbrido que combine burbujas convencionales y microburbujas generadas por electrólisis de agua para mejorar la flotación de partículas finas, comúnmente difíciles de recuperar debido a su baja eficiencia de colisión con burbujas. La metodología incluyó la fabricación de un generador de microburbujas a escala de banco, adaptado a una célula de flotación tipo Denver. Los resultados experimentales mostraron una mejora del 10% en la recuperación de partículas finas con la adición de microburbujas, el análisis del tamaño de las burbujas reveló que la combinación de burbujas convencionales y microburbujas aumenta la eficacia de la flotación de partículas finas y ultrafinas. Concluyeron que el uso de microburbujas en combinación con burbujas convencionales mejora significativamente la recuperación de minerales finos, mostrando un potencial para su aplicación en la industria minera para recuperar minerales de bajo grado. Esta mejora es fundamental, ya que permite una mayor eficiencia en la extracción de minerales valiosos a partir de partículas finas.

4. Lim et al. (2023) en su investigación nombrada “Mejora del crecimiento de microalgas y la captura de carbono mediante la generación de microburbujas en fotobiorreactores de panel plano: Impactos de diferentes diseños de burbujeadores de gas en el rendimiento de la mezcla” tuvieron el propósito evaluar y comparar la efectividad de diferentes tipos de spargers en la generación de burbujas de microtamaño, conocidas por crecer las microalgas y la fijación de CO₂. La metodología consistió en utilizar un fotobiorreactor de panel plano de 10L y probar tres diseños de spargers: spargers de tubo (PS), spargers

comerciales (CMS) y spargers personalizados (CUS), evaluando su rendimiento a través del tiempo de mezcla, coeficientes de transferencia de CO₂ y la distribución del tamaño de las burbujas. Los resultados demostraron que, aunque los spargers PS tenían menores costos, no lograban producir burbujas de microtamaño y presentaban un bajo rendimiento en la mezcla. En cambio, los spargers CUS, con una orientación novedosa de doble sparger, mejoraron significativamente la mezcla y la generación de burbujas, superando tanto a los PS como a los CMS. El análisis de costos mostró que los CMS, aunque menos efectivos que los CUS, podrían ser una opción viable para regiones con recursos limitados. El estudio concluyó que los diseños personalizados de spargers son fundamentales para avanzar en los sistemas de captura de CO₂ basados en microalgas, pero también destacó que soluciones rentables como los CMS son necesarias para una adopción más amplia en países en desarrollo. Estos hallazgos contribuyen a mejorar la escalabilidad del cultivo para la captura masiva de carbono y apoyan el marco de la bioeconomía circular.

5. Chen et al. (2022) en el estudio “Simulación de grandes remolinos de mezcla mejorada con columnas flotantes” tuvieron objetivo de investigación evaluar diferentes configuraciones de difusores en reactores de burbujas utilizando simulaciones de grandes remolinos para determinar su eficiencia en el proceso de mezcla. La metodología empleada consistió en simular el transporte de un trazador pasivo mediante un modelo Euleriano-Lagrangiano, admitido con fichas experimentales. Se analizaron tres tipos de difusores y se evaluaron factores como el tamaño de burbuja, el caudal de gas y la disposición de los difusores. Los resultados mostraron que las configuraciones con pantallas de burbujas ofrecieron un mejor rendimiento que las columnas tradicionales, ya que generaron una mezcla más homogénea y redujeron los tiempos de mezcla. Además, se estimó que incrementar el caudal de gas no es tan efectivo como mejorar la disposición de los difusores. Las simulaciones mostraron un incremento importante en la eficiencia energética y en el desempeño de la mezcla

que contenía las burbujas. En resumen, el estudio evidencia que la disposición y el tamaño adecuado de los difusores influyen mejorar la eficiencia de formas de aireación, lo que resulta relevante en diseño de reactores químicos y tratamiento de aguas residuales dado que optimizan los recursos energéticos y operacionales en la industria.

2.1.2. Antecedentes a nivel nacional

1. Omonte y Romero (2020) en el trabajo titulado “Evaluación de la Concentración de Oxígeno con Difusores de Burbuja Fina y Gruesa en el Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas” se explicó que el objetivo de este estudio era cómo la clase de dispositivo de dispersión y la profundidad en sumergimiento impactan intercambio en oxígeno durante los pasos de aireación de aguas usadas. Efectuaron test de incorporación de oxígeno a la aireación, a tres profundidades diferentes: 35, 70, y 105 cm. aproximadamente. Con un diseño experimental factorial 2x3. El aspecto de difusor tiene impacto notable a la velocidad en oxigenación, para el emisor de microburbujas el valor del coeficiente de intercambio de oxígeno K_L fue de 0.21 a 0.24 min^{-1} , mientras para el de burbuja gruesa, los valores fueron mucho más bajos 0.046 a 0.049 min^{-1} . La sumergida profunda si bien aumenta el K_L en menor medida en los valores en donde hay aumento, no hay una relación proporcional significativa. Estos hallazgos sugieren que, para optimizar la oxigenación, es preferible utilizar difusores de burbuja fina a mayores profundidades, ya que permiten una saturación más rápida del oxígeno, lo cual es clave a tratado eficiente de residuales. En resumen, el estudio enfatiza la necesidad de una adecuada selección del difusor y las condiciones operativas con el fin de incrementar el rendimiento en la depuración de aguas servidas. El uso de difusores de burbuja fina no solo optimiza a oxigenación, sino que también contribuye a una mayor eficiencia en la reducción de contaminantes. Aunque la profundidad de sumergencia no presentó una relación

directa tan significativa, su variabilidad puede ser tomada en cuenta al elaborar configuraciones de aireación para mejorar la eficiencia energética y operativa.

2. Lozano (2020) en su trabajo “Influencia del tipo de sistema de aireación difuso en la eficiencia de transferencia de oxígeno en aguas residuales domésticas Huancayo-2020” tuvo como propósito analizar el efecto que ejercen los mecanismos de aireación por difusión sobre el rendimiento del intercambio de oxígeno, considerando tres variantes de emisores de burbujas: microburbujas, burbujas medianas y burbujas de gran tamaño. La estrategia metodológica implementada contempló experimentos orientados a registrar concentraciones de diversas y coeficiente de difusión de masa y eficacia en incorporación de oxígeno. Los hallazgos demostraron que la elección de plataforma de aireación impacta de forma considerable en eficacia del proceso de transacción a oxigenación. El sistema de aireación de burbujas finas (Tipo A) mostró la mayor eficiencia, con un valor promedio de 0.79769%. Además, a medida que se concentra oxígeno disuelto crecía, eficiencia de transferencia de oxigenación disminuía, tendencia que se mantuvo constante en todos los sistemas probados. El estudio concluye que los sistemas de aireación de burbujas finas son los más efectivos para la transferencia, y que la eficiencia disminuye con el incremento de oxigenación. Además, el coeficiente de transferencia se eleva en mayor medida en las burbujas finas, lo que también resulta en un mejor rendimiento en términos de transferencia de oxígeno, la investigación destaca la importancia de seleccionar sistemas de aireación adecuados para optimizar los procesos de tratado de residuales, especialmente en formas de consumo energético.

3. Alfaro y Nina (2022) en su estudio nombrado “Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales en la comunidad campesina de Llaspay, distrito de Huanoquite, provincia de Paruro, región Cusco-2021” tuvieron como finalidad elaborar depuración de aguas servidas destinado a atender a una comunidad de 450 personas en la localidad de Llaspay. El

procedimiento metodológico contempló la evaluación fisicoquímica y microbiológica de los efluentes generados por los habitantes, siguiendo los criterios definidos por reglamentación nacional, en particular la Directriz Técnica O.S. 090 relacionada con instalaciones para tratamiento residual. Los datos obtenidos evidenciaron que variables como el consumo biológico de oxígeno (CBO), el requerimiento químico de oxígeno (RQO) y la presencia de bacterias fecales superaban los umbrales establecidos, lo cual respaldaba la necesidad de incorporar un sistema de saneamiento adecuado. El diseño contempló un tratamiento preliminar con compartimiento de rejillas y separador de arenas, una etapa inicial con un depósito Imhoff y área de deshidratación, seguida de una fase biológica con fosas de infiltración. El presupuesto total para la implementación de la planta fue de S/. 699,917.39, que incluyó los costos directos e indirectos. Con este proyecto, se busca mejorar formas de salubridad y excelencia de vida de personas en la comunidad, reduciendo contaminación ambiental por residuales y promoviendo el acceso a servicios de saneamiento

4. Díaz y Gamboa (2021) en su estudio nombrado "Eficacia de los difusores de Burbuja Gruesa y fina en la Disminución de la Materia Orgánica del Agua Residual Doméstica-Cajamarca 2021" su propósito principal fue evaluar efectividad de difusores de burbuja gruesa y fina en la reducción de materia orgánica en residuales domésticas. La investigación adoptó un enfoque experimental, utilizando dos reactores biológicos con difusores de burbuja fina (3") y gruesa (9"), evaluando la remoción de materia orgánica a través en parámetros como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) y el oxígeno disuelto (OD). Resultados detallaron, el difusor de burbuja fina tuvo una modificación del 88.31%, mientras que el de burbuja gruesa alcanzó un 79.75%. Las evaluaciones estadísticas evidenciaron discrepancias notables entre los dos tipos de difusores, con un valor p menor al 0.05. En conclusión, se confirma que ambos tipos de difusores son eficaces en la reducción orgánica, aunque difusor de burbuja fina resultó ser más eficiente, contribuyendo significativamente a crecimiento de excelencia de agua

tratada. Concluyendo, ambos tipos de difusores demostraron ser eficaces en remoción de orgánica del agua residual, contribuyendo a la optimización de calidad del agua. Sin embargo, el difusor de burbuja fina sobresale al alcanzar una remoción mayor del 88.3%, lo que lo posiciona como una alternativa con mayor rendimiento para depuración de servidas con alta carga. Esta mayor eficiencia en transacción de oxígeno del difusor de fina permite una degradación más efectiva de la materia orgánica, lo que tiene implicaciones positivas para la optimización de procesos en instalaciones de depuración de aguas usadas.

5. Veleriano (2023) en su trabajo titulado “Eficiencia de la Planta de Tratamiento de Agua residuales del Distrito de Yunguyo-Puno, 2022” tuvo por objetivo analizar eficiencia de Planta de Tratamiento de Residuales (PTAR), evaluando su capacidad para remover cinco indicadores: sustancias oleosas, bacterias termorresistentes, consumo biológico de oxígeno en cinco días (CBO5), requerimiento químico de oxígeno (RQO) y partículas suspendidas totales (PST). El procedimiento metodológico se basó en la recolección de muestras tanto del ingreso como del egreso del sistema, las cuales fueron examinadas en un laboratorio técnico con el motivo de hallar eficacia a eliminación de cada uno de los componentes evaluados. Los resultados mostraron una eficiencia global del 79.66%, destacándose sólidos con una remoción del 98.80%, mientras que los coliformes termotolerantes presentaron una remoción baja del 42.50%. Se compararon los resultados con los Límites Máximos Permisibles (LMP) dados por el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, y observó que seis de los siete parámetros cumplían con la normativa, excepto los coliformes termotolerantes. En conclusión, la PTAR de Yunguyo demuestra una eficiencia satisfactoria en remoción de gran parte de contaminantes, aunque se requieren mejoras en el tratamiento de coliformes, lo cual es crucial para cumplir con los estándares ambientales y garantizar un tratamiento adecuado de las aguas residuales. Por último, la eficiencia en el PTAR del distrito de Yunguyo es muy notable, ya que, gran parte de aspectos, se logró una eficiencia de 79.66%. En la parte de física del tratamiento del agua,

la Remoción del TRI se acerca a un valor absoluto de 98.80% lo que indica un altísimo nivel de eficiencia operativa en la planta. En contrapartida, la concentración de coliformes termo tolerantes mostró igualmente baja eficiencia en términos de remoción 42.50%, lo que sugiere deficiencia en el tratamiento microbiológico, probablemente, por la ausencia de un sistema de desinfección, como el hipoclorito de sodio. Este punto destaca claramente el déficit que existe en los tratamientos biológicos y microbiológicos que se hacen a nivel de planta para garantizar el cumplimiento de leyes peruanas.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Diseño de un Difusor de burbuja fina

Conforme a Kamei et al. (2023) un difusor de burbuja fina es un dispositivo que permite generación de burbujas de gas cuyas dimensiones oscilan entre micrómetros y nanómetros, Elasticsearch lo definió optimiza el intercambio de materia entre los estados líquido y gaseoso. Su aplicación más frecuente se encuentra en tratamiento de aguas residuales donde optimiza mayores disoluciones de gases como H₂ en sistemas de desnitrificación biológica.

Este tipo de difusor permite que las burbujas permanezcan en el agua por más tiempo debido a su pequeño tamaño, aumenta eficacia de transacción de oxígeno o nutrientes y ayuda a mejorar rendimiento del reactor biológico. Además, la reducción en el consumo de gas es un beneficio económico importante en sistemas industriales y ambientales (Kamei, y otros, 2023).

Ahora bien, el proceso de aireación debe ser mencionado. De acuerdo a Rizzardi et al. (2023) esta es una heterogeneidad de fases de un sistema considerado fundamental en ecología industrial y en ingeniería de procesos, y también en tratamiento de residuales. Este procedimiento demanda la transacción de oxígeno en entrada de gas hacia salida líquido, fenómeno el cual puede ocurrir de manera burbujeante o no burbujeante. Enormemente en actividades que requieren oxigenación del medio, como en los bioreactores, el aireamiento mediante burbujas es de gran interés.

En este contexto, los difusores de burbujas finas han surgido como herramientas estratégicas para mejorar la transferencia de oxígeno disuelto. Estos dispositivos aumentan notablemente la transferencia de masa en la interfase, ya que crean pequeñas burbujas que tienen un largo tiempo de residencia en el medio líquido, mejorando así el proceso de oxigenación. El coeficiente global de transacción de masa (KLa) se ve influenciado

positivamente tanto por el área interfacial como por las condiciones fluidodinámicas del sistema. (Rizzardi , y otros, 2023).

Sin embargo, la limitada capacidad del agua para disolver oxígeno es una barrera inherente al proceso, aumentando los costos operativos debido a alta demanda de los sistemas de aireación, que pueden representar entre el 60% y el 80% del consumo total de energía en una planta de tratamiento. Este contexto ha impulsado la búsqueda de tecnologías más eficientes, incluyendo difusores de membrana hechos de EPDM o cerámica que producen burbujas más pequeñas y uniformes (Rizzardi , y otros, 2023).

Asimismo, Lozano (2020) señala que, como parte de varias consideraciones medioambientales como la piscicultura y tratamiento de residuales, la aireación resulta ser un proceso de vital importancia. La acción de aireación tiene como su función cardinal la inyección en el agua para el ciclo biológico, tratamiento químico y cambios de estado del agua, además, para el uso de agua liviana. Dos de los usos primarios de aireación, provenientes de la industria, son: difusos, mecánicos e híbridos. Todos estos tipos de sistemas de aireación cuentan con la oportuna idoneidad a las determinadas condiciones de empleo de los sistemas.

La aireación difusa detalla soltar burbujas aireadas en agua mediante un difusor. Estas burbujas pueden tener diferentes dimensiones, y su distribución en el medio acuático está a su dispersión dentro del agua es indicador importante del oxígeno en el agua. Este sistema mejora con procesos de oxidación que requieren un nivel de disolución de gas en el líquido. En particular, las burbujas finas mejoran el oxígeno y disminuyen la gran cantidad de energía que tiene que ser gastada para alcanzar el nivel necesario (Lozano, 2020).

El empleo de difusores de burbuja fina (FB) en el caso de los reactores de desnitrificación biológica ha detallado resultados buenos en cuanto a disolución de hidrógeno, optimizando así remoción de nitratos de aguas subterráneas. En cambio, los sistemas

mecánicos funcionan agitando o bombardeando aire a través de dispositivos rotativos, como rotores o agitadores. Este tipo de aireación se da en los procedimientos de depuración de líquidos contaminados donde la transacción de oxígeno no rige únicamente de dispersión a burbujas, sino también a la turbulencia que resulta de movimientos mecánicos.

A pesar de que los sistemas mecánicos son menos eficientes en la disolución de gases, estos son más utilizados debido a su simplicidad y robustez. En conclusión, los sistemas híbridos integran las ventajas de los sistemas difusos y mecánicos. Estos sistemas son particularmente útiles en situaciones donde existe una necesidad alta de transferencia de oxígeno, pero al mismo tiempo se requiere un control de la turbulencia que puede causar la resuspensión de sólidos. Los sistemas híbridos proporcionan un balance entre eficiencia energética y efectividad en la oxigenación del líquido, lo que los hace una alternativa adecuada en escenarios complejos de tratamiento de aguas o en acuicultura intensiva (Lozano, 2020).

Sistemas de aireación

De acuerdo con Sanabria (2021) los sistemas de aireación constituyen plataforma importante en procesamiento biológico de residuales, permiten suministrar oxígeno al medio acuoso con el objetivo de mantener el proceso metabólico de microorganismos aerobios responsables de biodegradación de compuestos orgánicos. En contextos donde se pretende alcanzar una depuración eficiente con bajo consumo energético, la elección del sistema de aireación es crítica, tanto desde una perspectiva técnica como financiera. Entre las tecnologías más destacadas se encuentran los biodiscos rotatorios, que ofrecen una alternativa robusta y de bajo consumo frente a los sistemas convencionales.

El principio físico que subyace en estos sistemas es la transferencia de oxígeno desde la fase gaseosa hacia el agua, fenómeno que ocurre por difusión a través de una interfaz gas-líquido. Este proceso está controlado por gradientes de concentración y por resistencia a

transacción de masa, modelada frecuentemente mediante el modelo de la doble capa de Lewis y Whitman, la cual conceptualiza una capa gaseosa y una capa líquida que ofrecen resistencia al paso del gas. El parámetro técnico que cuantifica esta transferencia es coeficiente volumétrico de transacción de oxígeno (KLa), cuya magnitud depende de diseño del equipo, la geometría de contacto, el grado de turbulencia, y las condiciones fisicoquímicas del líquido (temperatura, presión, concentración de solutos, entre otros) (Sanabria, 2021).

Los reactores de biodiscos consisten en discos circulares fabricados en polímeros resistentes (como PVC o polietileno), montados sobre un eje que rota lentamente y cuya superficie permite la formación de una biopelícula microbiana. Durante la rotación, estos discos se sumergen parcialmente en el agua residual, generando una interacción alternada entre la biopelícula y el oxígeno atmosférico, lo que estimula la respiración celular y, por tanto, la oxidación de materia orgánica. Esta alternancia aire-agua mejora el perfil de oxigenación sin requerir grandes volúmenes de aire forzado, lo cual reduce considerablemente el consumo energético (Sanabria, 2021).

El rendimiento del sistema no solo depende de la velocidad de rotación, sino también de la morfología del disco. Discos lisos, perforados o acanalados exhiben distintos comportamientos en términos de generación de turbulencia, área de contacto y adherencia microbiana. Los estudios experimentales realizados con diferentes configuraciones demuestran que, al aumentar la velocidad de giro, también se incrementa el valor de KLa , debido a una mayor renovación del líquido en la interfase y una mejora en el contacto aire-agua energético (Sanabria, 2021).

De acuerdo Borekova et al. (2016) en comparación con otros sistemas, como los aireadores por difusión o impulsores mecánicos de alta velocidad, los biodiscos presentan múltiples ventajas operativas: bajo consumo energético, mejor resistencia ante fluctuaciones

hidráulicas y de carga orgánica, accesibilidad de soporte, y posibilidad de operar en aspectos adversos. No obstante, también se deben considerar limitaciones estructurales como el deterioro mecánico de los discos o la dificultad de su fabricación especializada.

En síntesis, los sistemas de aireación basados en discos rotatorios representan una tecnología ambientalmente sostenible, que combina fundamentos fisicoquímicos sólidos con ventajas técnicas operativas, y cuya eficiencia puede ser optimizada mediante ajustes en el diseño geométrico y en las condiciones de operación, logrando una transferencia de oxígeno eficiente en procesos de depuración de residuales

Tratamiento de aguas residuales

En contexto actual creciente la presión de hídricos hace que depuración de aguas contaminadas se convierta en una solución esencial para sostener aspectos de contaminación antropogénica y recuperar este recurso vital. De acuerdo con Rojas y Montero (2022) menciona que la depuración de estas aguas comprende diversas etapas que buscan remover progresivamente agentes nocivos de tipo físico, químico y microbiológico. Inicialmente, se hace pretratamiento orientado a retiro de residuos de gran tamaño y grasas, a fin de preservar el correcto desempeño de las estructuras posteriores. Luego, durante la etapa inicial, se remueven partículas que pueden depositarse por gravedad o flotantes mediante procesos como el tamizado o la decantación gravitacional.

Posteriormente, en tratamiento secundario, ocurre transformación biológica de forma orgánica disuelta. Esta fase está mediada por microorganismos aerobios, quienes, en presencia de oxígeno, degradan compuestos orgánicos generando biomasa, dióxido y agua. Este paso de digestión aeróbica requiere un sistema de aireación eficaz para garantizar niveles óptimos de oxígeno disuelto, lo cual acelera la degradación de los contaminantes. Las bacterias floculantes,

hongos resistentes a pH bajos, protozoos depredadores, algas fotosintéticas y metazoos conforman la comunidad biológica involucrada (Rojas & Montero, 2022).

A medida que se complejiza el tratamiento, se emplean técnicas avanzadas como adsorción con carbón o la ósmosis para erradicar contaminantes específicos. Así, se alcanza un nivel de purificación que posibilita la reutilización del agua. La clasificación de los microorganismos por su tolerancia al oxígeno (aerobios, anaerobios, facultativos) resulta clave para diseñar condiciones ambientales óptimas. Finalmente, es importante subrayar que el origen de estas aguas provenientes de actividades urbanas, industriales o agrícolas determina su carga contaminante y, por ende, el diseño del sistema de tratamiento (Rojas & Montero, 2022).

Principio de continuidad

Conforme a White y Xue (2021), la ecuación de continuidad se fundamenta en el principio de conservación de la masa, indicando que el caudal volumétrico de un fluido es constante a lo largo de una línea de flujo cuando no existen pérdidas o acumulaciones. En sistemas de aireación, esta ecuación permite comprender cómo el cambio en el diámetro de las tuberías o de las gargantas del difusor afecta la velocidad de salida del aire, lo cual se traduce en variaciones en el tamaño de burbuja y en la eficiencia de transferencia de oxígeno.

Según Fox, McDonald y Pritchard (2020), esta relación es clave en el diseño de difusores porque asegura que el suministro de aire calculado se distribuya de manera proporcional en función de la geometría del dispositivo. Su aplicación permite dimensionar orificios de salida y predecir el comportamiento del flujo en condiciones de operación reales, garantizando la estabilidad del sistema de aireación en reactores biológicos.

Ecuación de Bernoulli

De acuerdo con Çengel y Cimbala (2020), la ecuación de Bernoulli describe la conservación de la energía mecánica en un fluido en movimiento, relacionando la presión, la velocidad y la altura a lo largo de una trayectoria de flujo. Su aplicación en el diseño de difusores permite determinar la presión disponible en cada punto del sistema de aireación y calcular la presión mínima que debe superar el aire para vencer la columna líquida.

Según Mott y Untener (2021), la ecuación de Bernoulli también permite analizar los efectos de aceleración del aire en zonas de reducción de diámetro y su recuperación parcial en zonas de expansión. Este análisis es fundamental en la sección Venturi de los difusores, ya que la relación entre la caída de presión y el aumento de velocidad en la garganta determina la eficiencia con que el aire se transforma en microburbujas al ingresar al medio líquido.

Principio Venturi

Conforme a Streeter, Wylie y Bedford (2017), el principio de Venturi explica que cuando un fluido atraviesa una reducción en su sección transversal, su velocidad aumenta y la presión disminuye, lo cual se deriva de la aplicación conjunta de la ecuación de continuidad y la de Bernoulli. Este principio es aplicado en dispositivos denominados tubos de Venturi, ampliamente usados para medir caudal y para inducir mezclas. En el caso de sistemas de aireación, su incorporación permite intensificar la salida de aire a través de la garganta del difusor, incrementando la velocidad y favoreciendo la fragmentación del flujo en burbujas finas.

El diseño de secciones Venturi en sistemas hidráulicos y ambientales se ha consolidado como una alternativa para mejorar la dispersión de fluidos y gases, reduciendo el consumo energético por unidad de transferencia. En el contexto de los difusores de burbuja fina, este

principio se aprovecha para aumentar el área de contacto gas-líquido y, en consecuencia, mejorar el coeficiente global de transferencia de oxígeno.

2.2.2. Carga orgánica

Aguas residuales

Quinteros (2022) La depuración de los efluentes líquidos constituye fundamental a mitigar contaminantes a estas pueden generar. Las aguas residuales son aquellas cuyo estado modifican debido a la intervención humana, y necesitan tratados específicos anteriormente de reusadas, descargadas a fuentes hídricas naturales o hacia la red de drenaje sanitario. Se componen en su mayoría de agua (aproximadamente el 99.9%) y una pequeña fracción de sólidos orgánicos e inorgánicos originados en actividades humanas. Estos sólidos provienen de fuentes diversas, como alimentos, desechos domésticos, comerciales e industriales, lo que las convierte en un potencial factor de contaminación si no son adecuadamente tratadas. Los efluentes líquidos pueden categorizarse en distintas clases de acuerdo con su procedencia y el tipo de contaminantes presentes:

Aguas residuales domésticas, estas provienen de viviendas, comercios, oficinas, y lugares recreativos, y contienen principalmente desechos orgánicos originados por las actividades diarias de los seres humanos. Aguas residuales industriales, se generan a partir de pasos productivos de industrias, composición de estas aguas varía según el tipo de industria y los productos manufacturados, estas aguas requieren un tratamiento especializado antes de su descarga en la red de alcantarillado o en el medio ambiente, con el fin de evitar daños ecológicos y aguas pluviales, son las aguas de lluvia que se recogen de techos, calles y otras superficies. Estas aguas también pueden arrastrar contaminantes desde la superficie hacia los cuerpos de agua receptores, contribuyendo a la contaminación. (Quintero, 2022).

En cuanto a su tratamiento, de acuerdo con Rojas (2002) las aguas residuales deben pasar por una serie de etapas que abarcan las fases de preprocesamiento, depuración inicial, etapa biológica y tratamiento avanzado. El pretratamiento tiene como objetivo de descartar los sólidos grandes, piedras y aceites, que pueden dañar los equipos del sistema. En procesado primario, se separan los sólidos pequeños mediante procesos como sedimentación y flotación. La fase biológica se orienta a la remoción de impurezas disueltas a través de mecanismos microbiológicos, en los que microorganismos consumen la materia orgánica biodegradable. Finalmente, el tratamiento terciario busca dar un acabado final a las aguas residuales mediante técnicas como la filtración, desinfección y ósmosis inversa, dependiendo de los estándares de calidad requeridos para el vertido o reutilización del agua.

La gestión eficaz de los efluentes líquidos es crucial para evitar consecuencias perjudiciales para los ambientes hídricos y bienestar de individuos. Entre aspectos indeseables que las aguas residuales pueden generar se incluyen modificación de calidad del agua, la muerte de especies acuáticas respecto a disminución del disuelto, turbidez y existencia de microorganismos patógenos. El control adecuado de la carga orgánica y otros contaminantes en estas aguas es esencial para prevenir estos impactos.

Parámetros de calidad de agua

El estado del recurso hídrico representa un elemento clave para el bienestar humano, el ecosistema y las actividades productivas, para evaluarla de manera adecuada, es necesario analizar tres tipos de factores: microbiológicos, químicos y físicos, cuales permiten conocer el estado del agua y sus posibles riesgos para el uso que se le quiera dar. A continuación, se detallan los fundamentales aspectos empleados a determinar calidad del agua.

Parámetros Físicos

De acuerdo a Rigola (1989) señala que, desde un enfoque técnico, los parámetros físicos constituyen indicadores fundamentales para evaluar el estado de calidad del recurso hídrico, aun cuando no representen una medida directa de contaminación. Estos parámetros permiten identificar alteraciones evidentes en el cuerpo de agua, revelando zonas comprometidas por agentes contaminantes. Dentro de esta categoría se encuentra la percepción organoléptica del agua, como el sabor y el olor, factores de naturaleza subjetiva que, pese a carecer de unidad de medida o instrumentos de cuantificación, advierten la presencia de sustancias disueltas como cloruros, sulfatos, dióxido de carbono libre o compuestos fenólicos, los cuales pueden conferirle características organolépticas desagradables.

El color, por su parte, se relaciona con la capacidad del agua de adquirir específicas longitudes del espectro visible, siendo útil para identificar compuestos disueltos, materia orgánica en descomposición o metales pesados. La turbidez evalúa la interferencia en el paso de la luz, causada por partículas coloidales o en suspensión, y se mide en Unidades Nefelométricas (NTU), constituyendo una barrera para procesos como la desinfección (Rigola, 1989).

La conducción eléctrica revela habilidad del agua para transmitir corriente, y depende específicamente de concentración iónica presente; cuanto mayor sea la pureza del agua, menor será su conductividad. Asimismo, la temperatura condiciona solubilidad de oxígeno, alterando procesos metabólicos y químicas o bioquímicas a los ambientes acuáticos (Autoridad Nacional del Agua, 2011). Por otro lado, da una estimación de materia orgánica existente, esencial para evaluar la carga contaminante y su potencial impacto ambiental. Estos parámetros, en conjunto, permiten realizar un diagnóstico integral sobre el estado físico del agua, siendo esenciales en estudios de monitoreo, control y tratamiento

Parámetros Químicos

De acuerdo con Arias et al. (2022) las variables químicas se vinculan con el potencial del agua para incorporar distintos compuestos en disolución, estos se determinan mediante análisis cuantitativos, y entre los más importantes se encuentran el pH evalúa acidez o alcalinidad, un pH desequilibrado puede repercutir el paso de tratado y la vida acuática. El rango óptimo para la mayoría de las especies acuáticas es entre 6.5 y 8.5.

El Consumo Biológico de Oxígeno en cinco días (CBO5): Este indicador cuantifica el volumen de oxígeno requerido por los organismos microscópicos con el fin de desintegrar los compuestos orgánicos presentes durante un lapso de cinco jornadas. Un valor elevado de CBO refleja una alta concentración de materia biodegradable, lo cual puede disminuir la presencia de oxígeno disuelto en el recurso hídrico, afectando a los organismos acuáticos. La Demanda Química de Oxígeno (DQO) es similar a la DBO, pero esta forma refleja la el número de oxígeno requerido para descomponer materia orgánica mediante agentes químicos como el dicromato de potasio. El Requerimiento Químico de Oxígeno (RQO) sirve como medida representativa del total de compuestos orgánicos existentes en un medio acuático. Por su parte, el Oxígeno Disuelto (OD) constituye un parámetro esencial para los procesos respiratorios de las especies que habitan en entornos hídricos. Concentración de oxígeno disuelto se abarca un factor determinante en la evaluación del estado ambiental del agua; su presencia en niveles bajos puede señalar contaminación y la imposibilidad de sustentar vida acuática (Arias et al., 2022)

Parámetros Microbiológicos

Arias (2022) menciona que dichos parámetros están enfocados en presencia de organismos patógenos en agua, lo que constituye una amenaza a el bienestar humano. Los principales indicadores microbiológicos incluyen, los coliformes fecales, se emplean como señales de presencia de residuos de origen fecal, la presencia de estos microorganismos sugiere

que el agua podría estar contaminada con patógenos que causan enfermedades gastrointestinales y otras infecciones. Además de los coliformes fecales, se pueden encontrar otros organismos microscópicos causantes de enfermedades presentes en agua. La detección de estos organismos es crucial a analizar seguridad microbiológica del agua, especialmente en fuentes utilizadas para consumo humano.

La determinación de calidad del agua requiere evaluación de estos parámetros a fin de tomar decisiones informadas sobre el tratamiento necesario. Para este propósito, los resultados derivados deben ser verificados en comparación con los puntos de referencia proporcionados por las autoridades sanitarias y ecológicos, garantizando que el recurso hídrico resulte apto para su aprovechamiento previsto, ya sea como agua potable, para riego o procesos industriales. Además, los límites predefinidos deben ser controlados sistemáticamente para posibles contaminaciones con fin de mitigar impactos perjudiciales en salud humana y los ecosistemas (Rigola, 1989).

Características de aguas residuales

Correa (2022) destaca, es que aguas residuales provenientes de áreas residenciales, industriales y comerciales contienen una diversidad de características que influyen en su calidad y, en consecuencia, en el impacto en ambiente y salud. Estas características se agrupan en tres clases fundamentales: físicas, químicas y microbiológicas. La correcta identificación y estudio de estos parámetros es relevante para formación de plataformas de tratamiento adecuados y para las medidas necesarias que garanticen que los efluentes vertidos en cuerpos de agua o reutilizados cumplan con estándares de calidad establecidos.

Características Físicas

Las propiedades físicas de aguas residuales son muy importantes para analizar su nivel de contaminación y decidir qué métodos de tratamiento son necesarios. Estos incluyen las

muestras de color, turbidez, olor, sólidos y temperatura. Los sólidos totales se pueden dividir en disueltos, suspendidos y sedimentables. Medir los sólidos totales es primordial determinar la turbidez y cantidad de lodo producido en las instalaciones de tratamiento. Los sólidos suspendidos contribuyen a la turbidez y la coloración del agua, mientras que los disueltos afectan la salinidad y conductividad (Correa, 2022).

Asimismo, la turbidez, representa la opacidad del agua causada por partículas suspendidas. Las aguas residuales suelen presentar alta turbidez, lo que dificulta su clarificación. Mide en Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU). El color residual varía desde un gris claro en las aguas recién producidas hasta un negro profundo en aquellas que han permanecido más tiempo en condiciones anaeróbicas, indicando una descomposición avanzada. El olor desagradable en residuales se debe a componentes gaseosos emitidos en degradación de orgánicas. Los sulfatos transformados en sulfitos debido a la actividad de microorganismos que operan sin oxígeno generan el típico aroma a "azufre" o "huevo en descomposición", mientras que los efluentes líquidos suelen presentar una temperatura mayor que el agua potable debido a la incorporación de aguas calientes provenientes de actividades domésticas e industriales. Esta variable resulta relevante debido a su impacto en la capacidad de disolución del oxígeno y en la velocidad de las reacciones químicas (Metclaf & Eddy, 1995).

Características Químicas

Las aguas conforman amplia diversidad de compuestos químicos, son indicativos de su grado de contaminación. Estos se dividen en materia orgánica, compuestos inorgánicos y compuestos gaseosos.

Los compuestos orgánicos, formados en su mayoría por carbohidratos y lípidos, aceites, proteínas y compuestos orgánicos volátiles, los compuestos orgánicos presentes en los líquidos contaminados es uno de los principales contaminantes. Los compuestos orgánicos provienen

de actividades fisiológicas humanas y de desechos industriales, y su presencia genera una alta demanda de oxígeno. Y finalmente los compuestos inorgánicos: Entre estos, los nitratos, fosfatos, cloruros y metales pesados, son comúnmente encontrados en las aguas residuales industriales, estos compuestos pueden ser tóxicos y representan amenaza para acuáticos y salud de individuos (Metclaf & Eddy, 1995).

Características Microbiológicas

Las aguas residuales son un medio propenso a contener una variedad de agentes microbianos infecciosos, los cuales constituyen una amenaza para el bienestar humano pública. La existencia de coliformes fecales, como *Escherichia coli*, indica contaminación humana o animal. Microorganismos sirven como indicadores de calidad bacteriológica y son importantes a evaluar eficiencia de pasos de tratados. Además de los coliformes, podrían estar en aguas residuales otros patógenos como virus y protozoos, que pueden causar enfermedades transmisibles (Metclaf & Eddy, 1995).

Es crucial examinar todos los elementos que conforman las aguas residuales a evaluar calidad y tratamientos necesarios. El control de los LMP y los ECA es determinante que no supongan un riesgo para la salud ni para el entorno natural. Con la supervisión efectiva de la condición del agua en base a estos aspectos, se asegura el cumplimiento de las funciones ecológicas de cuerpos receptores y que aguas tratadas sean aptas para el propósito al que se destinen, incluso para su reutilización.

DBO Y DQO

De acuerdo con (Inga & Laurente, 2021) indican que el nivel de agua es importante para salud humana, sostén ambiental y manejo eficaz de hídricos. De los numerosos estándares establecidos para analizar el grado de contaminación del recurso hídrico, Consumo Biológico de Oxígeno (CBO) y Requerimiento Químico de Oxígeno (RQO) se consideran dos de los

indicadores más relevantes. Ambas medidas dan una indicación del oxígeno requerido para descomponerse de materia orgánica, pero lo hacen de diferentes maneras, sirviendo, así como instrumentos complementarios en la evaluación de calidad.

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

López et al. (2017) indica que la DBO corresponde al volumen de oxígeno que organismos microscópicos como bacterias, levaduras y hasta el plancton utilizan en proceso de putrefacción de sustancia orgánica que se halla en muestra de agua. Este parámetro es clave al momento de analizar contaminación de aguas superficiales y oxígeno que seres vivos en agua pueden aprovechar.

La medida del CBO se presenta en gramos de oxígeno disuelto por cada litro de agua (mg/L) y es comúnmente medido en condiciones estándar de incubación, siendo la DBO5 la más utilizada. Esta variante de DBO cuantifica el volumen de oxígeno utilizado por los organismos microscópicos a lo largo de cinco jornadas, mantenido a una temperatura de 20°C. La DBO5 se ha establecido como un estándar global para evaluar capacidad de cuerpo de agua para soportar la vida acuática sin poner en peligro la flora y fauna acuática (López et al., 2017).

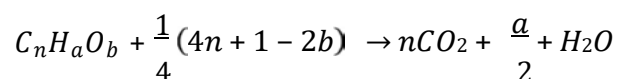
La Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) es parámetro esencial, permite medir la calidad del agua, dado que un incremento significativo en el DBO indica una mayor carga orgánica, lo que a su vez puede disminuir el oxígeno en el agua. Esto puede llevar a la mortandad de fauna acuática por asfixia a consecuencia de la hipoxia. Es por esto que DBO debe ser monitoreado rigurosamente en instalaciones de depuración de aguas usadas, con el propósito de prevenir que el agua tratada interfiera negativamente en los entornos hídricos presentes en corrientes fluviales, cuerpos lacustres o mares (López et al., 2017).

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Inga y Laurente (2021) menciona que DQO es otro parámetro crucial utilizado a analizar cantidad de contaminantes presentes en agua, específicamente aquellas sustancias orgánicas que tienen la capacidad de ser descompuestas químicamente. A diferencia de la DBO, la cual estima el consumo realizado por organismos microscópicos durante la desintegración biológica de materia orgánica, la DQO relaciona con cantidad de oxígeno requerida para la descomposición de los compuestos en el agua empleando fuerte agente, usualmente, el dicromato de potasio en entorno ácido.

De acuerdo con López et al. (2017) la DQO ofrece una evaluación más objetiva de carga orgánica en agua porque incluye compuestos que no son fácilmente biodegradables, como aceites, grasas y productos químicos industriales. La DBO mide la materia orgánica biodegradable, la DQO al medir compuestos totales en agua hace que la DQO sea más adecuada para analizar grado de contaminación en cuerpos afectados por desechos industriales, agrícolas y urbanos.

Una de las ventajas de la prueba de DQO es que se hace en un tiempo relativamente corto, a diferencia de la DBO que requiere varios días de incubación, siendo esta última obtenida en aproximadamente tres horas. Esta propiedad es útil en los casos donde se necesita determinar la calidad de forma rápida, en plantas de tratamiento, o monitorización de excelencia del agua que necesita análisis en tiempo real (López et al., 2017). La cantidad de metano producido, si se mide, debe ser expresada mediante la fórmula mostrada a continuación.



En resumen, BOD y COD son parámetros para considerar en la evaluación sobre las condiciones del líquido y la planificación de métodos para depurar fluidos contaminados residuales. BOD mide la cantidad de materia orgánica descomponible, proporcionando así

información sobre las propiedades de sustentación de la vida del agua y su capacidad para soportar la vida acuática, mientras que COD ofrece una medición más completa de los constituyentes orgánicos agregados (incluidos los compuestos no biodegradables). Ambas pruebas son complementarias y, tomadas juntas, proporcionan una determinación más precisa de la contaminación y desarrollan estrategias efectivas para el tratamiento y la restauración del agua.

Límites Máximos Permisibles (LMP)

En el marco normativo peruano, los parámetros de descarga de efluentes generados por Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales se encuentran regulados en el Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM, el cual establece los Límites Máximos Permisibles (LMP) que deben cumplirse para garantizar la protección de los cuerpos receptores y la salud pública. Según esta disposición, los valores establecidos son de 100 mg/L para la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), 200 mg/L para la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y 150 mg/L para los Sólidos Suspendidos Totales (SST). Estos valores constituyen los umbrales que las PTAR deben alcanzar en su operación regular, funcionando como referencia esencial en el diseño, evaluación y validación de sistemas de tratamiento. Los detalles completos de la norma y sus alcances específicos se presentan en los anexos correspondientes de este trabajo.

PARÁMETRO	UNIDAD	LMP DE EFLUENTES PARA VERTIDOS A CUERPOS DE AGUAS
Aceites y grasas	mg/L	20
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	10,000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	200
pH	unidad	6.5-8.5
Sólidos Totales en Suspensión	mL/L	150
Temperatura	°C	<35

Figura 1. Límites Máximos Permisibles para los Efluentes de PTAR. Fuente: tomado de Diario El Peruano.

2.2.3. Marco conceptual

- **Difusor**

Un difusor es un dispositivo que emplea gas o un líquido a presión en un proceso de tratamiento industrial para esparcirlo en forma uniforme por un medio o para liquidificar una sustancia. En el tratamiento de aguas, se encarga principalmente de inyectar aire u oxígeno en forma de burbujas, lo que mejora la oxigenación del agua. Dependiendo de la forma y el material a utilizar, un difusor se construye en diferentes diseños y estructuras. En el caso de aguas contaminadas, aireación tiene como propósito mejorar aporte en oxígeno a los organismos microscópicos que se encuentran en dichos líquidos para potenciar su actividad biológica (Omonte & Romero, 2020).

- **Burbuja fina**

Las burbujas finas son esferas más pequeñas que son capaces de contener cualquier gas, generalmente aire, que se inyectan en un líquido para aumentar su mezcla y mejorar el intercambio de oxígeno en paso de depuración o durante pasos de

fermentación. Su pequeño tamaño ofrece una mayor superficie entre gas y líquido, mejora disolución de oxígeno mientras ayuda a acción microbiana en tratado biológico de residuales. Estos sistemas son efectivos para procesos de tratamiento aeróbico ya que su efectividad durante la aireación del proceso y el gasto energético se optimizan porque incrementa la distribución del aire. (Omonte & Romero, 2020).

- **Aireación**

La aireación es un proceso donde se inyectan aire o diferentes gases en un líquido, comúnmente agua, con la finalidad de incrementar oxígeno disuelto en mismo. Este proceso es crucial en la depuración de líquidos contaminados, dado que dichos expertos en microbiología requieren de oxígeno para llevar a cabo la descomposición de sustancias contenida en agua residual. Mediante difusión de aire o agitación mecánica se puede lograr el aumento del oxígeno disuelto. Lo importante es que permite mantener los niveles adecuados que propicien el desarrollo de los microbios que realicen la depuración del agua (Rojas & Montero, 2022).

- **Carga orgánica**

El término carga orgánica se refiere al nivel de materia orgánica en líquido, agua, puede ser descompuesta por microorganismos a través de procesos metabólicos. Esto se evalúa generalmente mediante Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), que analiza cantidad de oxígeno necesario a descomposición de estos compuestos orgánicos. Durante la depuración de líquidos contaminados, una elevada concentración de compuestos biodegradables sugiere la existencia de un gran volumen de contaminantes, cuya eliminación aumentará la demanda de oxígeno y puede interrumpir el rendimiento de los procedimientos químicos y biológicos diseñados para tratar el agua (Inga & Laurente, 2021).

- **Oxigenación**

La oxigenación es el proceso en se disuelve en un líquido, como el agua, para ser utilizado por organismos o procesos químicos. Dentro de los mecanismos empleados para depurar líquidos contaminados, la oxigenación se logra principalmente mediante la aireación, que añade oxígeno al agua para mejorar aspectos de microorganismos aeróbicos y utilizan orgánicas. Este proceso es crítico para apoyar la vida acuática y la purificación, mantiene el equilibrio de oxígeno requerido a los procesos de limpieza biológica (Omonte & Romero, 2020).

- **Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)**

Es la cantidad de oxígeno que los microorganismos emplean a descomposición la materia orgánica contenida en un agua o un líquido en un periodo determinado (habitualmente 5 días: DBO5). Es de mucha relevancia en el monitoreo del tratado de residuales, toda vez expresa la carga orgánica de la muestra y la capacidad del sistema biológico para bio disolverla. Una DBO alta indica que existe una alta concentración de sustancias de origen biológico presentes en el líquido, que a su vez demandan un incremento en la concentración de oxígeno para ser descompuesta, lo que puede comprometer la efectividad del tratamiento si no se maneja adecuadamente (López et al., 2017).

- **Demanda química de oxígeno (DQO)**

Es el requerimiento que se tiene de oxígeno para oxidar de manera química las compuestos orgánicos e inorgánicos en determinada muestra de agua. En lugar de DBO, que trata de degradación biológica de materia, la DQO abarca el potencial de oxigenación total, incluyendo aquellos que son no biodegradables. Se considera que la DQO es uno de los parámetros más útiles para el procesamiento de líquidos contaminados debido a que calcula de manera aproximada el total de contaminación

que existe en una masa específica de líquido, así como el oxígeno que se gastara para llevar a cabo su tratamiento (López et al., 2017).

- **Sólidos suspendidos totales (SST)**

Se refiere a elementos diminutos en estado sólido y están inmersas en un líquido, pero no se depositan en el fondo bajo condiciones regulares. En el manejo de aguas, los SST comprenden tanto sustancias orgánicas como inorgánicas, tales como suelo, residuos biológicos, y partículas en proceso de descomposición. El cálculo de los SST resulta esencial para determinar el estado del recurso hídrico, puesto que estos tipos de sólidos tienen el potencial de dañar las estructuras de control, interfiriendo con la efectividad de los procesos biológicos y químicos, así como poniendo en riesgo la fauna acuática y la salud pública (Bolívar et al., 2021).

- **Transferencia de oxígeno**

Esto hace referencia a cómo el oxígeno es transportado desde una fase gaseosa como el aire a un líquido tal como lo es el agua, donde se disuelve y es utilizado por seres vivos o procesos químicos. En caso del tratamiento de aguas, la transferencia efectiva de oxígeno resulta ser un factor clave para mantener nivel adecuado de oxígeno, de modo que se sustente la actividad microbiana necesaria con el objetivo de descomponer los compuestos orgánicos. La eficacia se ve influenciada directamente por la amplitud de las burbujas, el tiempo de contacto y la turbulencia del agua. (Lozano, 2020).

- **Eficiencia de aireación**

Es el criterio de qué tan bien un sistema de aireación disuelve oxígeno en un líquido, agua, durante el tratamiento. Esta eficiencia depende de variables como la arquitectura del sistema, tamaño de burbujas de aire, velocidad de mezcla y totalidad

de oxígeno que se podría transferir al agua. En sistemas de depuración de aguas residuales, con una gran eficacia de aireación es críticamente importante para asegurar condiciones para acción micro encargados de descomponer materia sin incurrir en costos energéticos excesivos (Rojas & Montero, 2022).

- **Tratamiento de aguas residuales**

La depuración es paso que busca eliminación de contaminación de aguas, como materia orgánica, patógenos o compuestos químicos de manera que sea adecuada para su vertido al medio ambiente, su reutilización o su aprovechamiento con fines industriales. Para la obtención de agua tratada se requieren mecanismos físicos, químicos y biológicos, como el proceso de sedimentación, aireación, filtración, coagulación y desinfección. La depuración de residuos de agua es de suma relevancia para salud pública, salvaguarda del ambiente y uso responsable de los recursos hídricos (Lozano, 2020).

- **Microburbujas**

Las microburbujas son burbujas de gas que son extremadamente pequeñas, generalmente debajo de 100 micrómetros de diámetro, aplican en una extensa variedad de funciones, incluida el tratamiento de agua. Estas burbujas pequeñas tienen una mayor área de contacto superficial que las burbujas más grandes, lo que mejora tasa de transporte de oxígeno en agua y aumenta los procesos a tratamiento biológico. Las microburbujas tienen fuertes capacidades para la eliminación de contaminantes, el aumento de la tasa de oxígeno y la descontaminación de sustancias tóxicas, por lo tanto, se utilizan en sistemas avanzados con fines de depuración de aguas servidas (Lim et al., 2023)

- **Biodegradación**

La biodegradación es un proceso biológico donde compuestos orgánicos en desechos o contaminantes son desintegrados por microorganismos como las bacterias y los hongos. Este proceso es básico en la transformación de aguas servidas, en donde la gis envolvente, por medio de microorganismos, convierte los compuestos orgánicos en forma de vapor de agua y gas carbónico (Torres, 2024).

- **Contaminantes**

Los contaminantes son sustancias o agentes que modifican propiedades físicas, de un entorno dado. Tienen efectos perjudiciales sobre el bienestar de las personas y en equidad ecológica o ecosistemas. Dentro del ámbito del tratamiento de agua, los contaminantes pueden tener origen orgánico, como desechos alimentarios o heces, o inorgánica como metales pesados o productos químicos industriales. El enfoque principal de los sistemas de agua es eliminación o reducción de contaminantes con el fin de proteger los cuerpos de agua y hacerlos utilizables de manera segura y sostenible (Mora-Aparicio et al., 2022).

CAPÍTULO III

III. METODOLOGÍA

3.1. Ámbito de estudio

El presente estudio se enmarca en el campo de la Ingeniería Mecánica aplicada al diseño de dispositivos funcionales para sistemas de tratamiento de aguas residuales, con un enfoque en la optimización del proceso de aireación mediante el desarrollo de un difusor de burbuja fina. El objetivo es diseñar un dispositivo mecánico que contribuya a mejorar la eficiencia de transferencia de oxígeno en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) San Jerónimo, ubicada en el distrito homónimo de la ciudad del Cusco y administrada por la Empresa Prestadora de Servicios de Saneamiento SEDACUSCO S.A.

El estudio se sustenta en el método científico, lo cual permite estructurar un proceso riguroso de análisis técnico y validación computacional. Mediante la aplicación de este método, se observa el fenómeno físico de la difusión de aire en el sistema líquido, se plantea una hipótesis funcional sobre el desempeño del dispositivo, y se realiza una verificación cuantitativa a través de simulaciones en entorno controlado. Esta estrategia permite establecer conclusiones objetivas, empíricas y reproducibles, contribuyendo con soluciones técnicamente viables a problemas reales de eficiencia en la operación de PTAR.

El ámbito funcional del estudio comprende exclusivamente el diseño mecánico del difusor, sin intervención directa en el sistema completo de aireación ni en otras unidades de tratamiento de la planta. La validación del desempeño del prototipo se realizará mediante simulaciones computacionales que consideren condiciones operativas representativas de la PTAR San Jerónimo, incluyendo factores como profundidad del reactor, presión de entrada, patrón de flujo y geometría del dispositivo.

Como criterios de evaluación se considerarán indicadores ambientales fundamentales asociados a la reducción de carga orgánica, específicamente la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), demanda química de oxígeno (DQO) y los sólidos totales en suspensión (SST). Estos parámetros permitirán determinar teóricamente la eficacia del diseño en términos de mejora del rendimiento del proceso biológico.

En resumen, el ámbito de estudio corresponde al diseño mecánico de un componente específico del sistema de aireación, su análisis técnico por medio de herramientas de simulación y su validación teórica dentro de un contexto de ingeniería aplicada al saneamiento urbano.

3.2. Localización política y geográfica

La presente investigación toma como unidad de referencia a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) San Jerónimo, ubicada en el distrito de San Jerónimo, provincia y departamento del Cusco, Perú. Esta instalación forma parte del sistema de saneamiento urbano gestionado por la Empresa Prestadora de Servicios de Saneamiento SEDACUSCO S.A., y está orientada al tratamiento de aguas residuales domésticas provenientes de diversos sectores urbanos del área metropolitana de Cusco.

La planta se localiza geográficamente en la región sur andina del país, en una zona de topografía irregular y altitud media de aproximadamente 3,400 metros sobre el nivel del mar, con coordenadas referenciales cercanas a 13°33'S de latitud y 71°53'O de longitud. Esta infraestructura cumple un papel crítico en la protección de los cuerpos receptores de agua y en el cumplimiento de las normativas ambientales peruanas, especialmente en lo relacionado con los niveles de carga orgánica del efluente tratado.

Si bien el diseño propuesto no será implementado ni validado directamente en la planta, se tomará como fuente de referencia técnica y operativa para la definición de los parámetros

de diseño del difusor de burbuja fina. En tal sentido, se empleará información histórica y datos técnicos reales provenientes de registros de operación de la PTAR San Jerónimo, que servirán como condiciones de entrada para la simulación computacional del comportamiento del dispositivo propuesto.

De esta manera, la localización geográfica y el contexto operativo de la planta referencial permiten garantizar la pertinencia práctica del diseño, aunque su evaluación se limite al entorno virtual de simulación. La conexión entre los datos reales y el diseño simulado asegura la aplicabilidad técnica del dispositivo dentro del marco de operación de plantas de tipo urbano y mediana capacidad en zonas altoandinas.

3.3. Método de investigación

Se sustenta en el método científico, el cual permite desarrollar un análisis sistemático y riguroso del fenómeno estudiado. Este método se emplea para observar, plantear hipótesis, experimentar y obtener conclusiones objetivas que contribuyan al conocimiento existente (Tamayo, 2014). Se eligió este método porque ofrece un esquema lógico y coherente para comprender el comportamiento del proceso de aireación en las PTAR desde una perspectiva empírica y verificable.

3.4. Tipo y nivel de investigación

Se ubica dentro de la categoría de tipo básica o pura, cuya finalidad no es la aplicación inmediata de conocimientos, sino el enriquecimiento del acervo científico existente en torno a un fenómeno. En este caso, se busca ampliar la comprensión sobre el proceso de aireación en la depuración de efluentes líquidos, abordando sus fundamentos fisicoquímicos, la dinámica del oxígeno disuelto y su interacción con microorganismos involucrados en degradación de materia orgánica. Hernández et al. (2014) señalan que se orienta hacia el descubrimiento de

principios y leyes científicas, siendo clave para sustentar futuras investigaciones aplicadas. La elección de esta tipología responde al objetivo de generar conocimientos sólidos que expliquen el proceso de aireación desde una perspectiva integral, más allá del enfoque utilitario.

El adoptado es explicativo, el propósito central es encontrar relación de causa y efecto en diseño del difusor de burbuja fina con la calidad de agua, sobre todo en la carga orgánica del agua residual de Planta de Residuales. Esta modalidad permite organizar y sistematizar la información recopilada sin intervenir ni modificar el fenómeno en estudio, proporcionando una visión objetiva y estructurada. Como afirman Hernández et al. (2014) la investigación descriptiva permite precisar propiedades y rasgos más relevantes, sin establecer relaciones causales. Este nivel resulta pertinente, ya que se busca representar fielmente las condiciones técnicas del sistema de aireación, los parámetros operativos que lo rigen y los efectos que se producen sobre la remoción de contaminantes orgánicos. La selección se justifica por requerimiento de generar una base informativa sólida y verificable, útil para ingenieros ambientales, técnicos operativos y responsables de manejo de aguas en residuo.

Es necesario que comprender el enfoque cuantitativo, porque permite verificar empíricamente cómo el diseño del difusor influye en indicadores específicos como la DBO, DQO y SST. Esta relación va a ser evaluada mediante recolección de datos simulados, y analizada con herramientas estadísticas que comprueben la significancia del efecto, permitiendo formular y contrastar hipótesis de manera objetiva y numérica, lo cual es característico del método cuantitativo.

3.5. Unidad de análisis

Está constituida por el proceso de aireación que se lleva dentro de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. Ahora el componente representa una etapa fundamental del tratamiento

biológico, donde se introduce oxígeno al sistema a favorecer actividad de microorganismos que degradan la materia.

3.6. Población de estudio

Integrada por procesos operativos de una PTAR, particularmente aquellos vinculados a las fases de tratamiento secundario, donde se desarrolla la aireación. Esta delimitación permite observar con mayor detalle los elementos técnicos involucrados en la eficiencia del tratamiento.

3.7. Tamaño de muestra (Centrarnos en una PTAR en específico “Cusco”)

El tamaño muestral está representado exclusivamente por el proceso de aireación, dado que este constituye el objeto principal de estudio. La focalización en una sola fase permite un análisis más profundo y detallado de sus parámetros de funcionamiento.

3.8. Técnicas de selección de muestra

Se emplea por muestreo por conveniencia. Consiste a seleccionar el objeto de estudio en función de su accesibilidad, viabilidad y pertinencia con los objetivos planteados. Tal como lo (Otzen & Manterola, 2017), esta técnica es habitual en investigaciones de carácter técnico o ingenieril, donde el acceso a las instalaciones o a ciertos procesos específicos puede estar condicionado por factores logísticos, económicos o institucionales. En este caso, se elige un sistema de aireación accesible para su observación directa y modelación computacional.

3.9. Técnicas de recolección de información

Se llevará mediante la observación directa del sistema de aireación en funcionamiento. Esta técnica permite documentar el comportamiento del sistema sin alterar sus condiciones operativas, lo cual es fundamental para garantizar la objetividad de los datos obtenidos.

Además, este método facilita el registro de parámetros como el flujo de aire, el patrón de burbujeo y las condiciones del oxígeno disuelto en tiempo real. Hernández et al. (2014) señalan que la observación directa es útil cuando se pretende analizar fenómenos en su ambiente sin repercutir en ellos.

3.10. Técnicas de análisis e interpretación de la información

Para análisis, se utilizará simulación del difusor de aire mediante el software MATLAB, herramienta que permite modelar el comportamiento del diseño ante distintas condiciones de operación en el tanque de aireación. Es altamente eficaz en procesos de ingeniería, permite identificar zonas de baja eficiencia, mejorar diseños y optimizar el proceso sin necesidad de intervención directa en la planta.



Figura 2. Tratamiento secundario de la PTAR Seda Cusco. Fuente: tomado de Sedacusco.

La etapa de aireación en la PTAR San Jerónimo se lleva a cabo en el Tratamiento Secundario, específicamente dentro de los filtros biológicos percoladores y secundarios, mediante un proceso de aireación natural, que permite la degradación biológica aeróbica de la materia orgánica.

Para lograrlo, se propone la incorporación de un sistema de difusores de burbuja fina, el cual permite una mayor transferencia de oxígeno disuelto al medio líquido, favoreciendo la actividad metabólica de los microorganismos aeróbicos. Esta tecnología no solo mejora significativamente la eficiencia del proceso biológico, sino que también reduce la carga de demanda biológica de oxígeno (DBO) en el efluente. Asimismo, contribuye a un menor consumo energético en comparación con otros métodos de aireación convencional, optimizando así el rendimiento global del sistema de tratamiento.

La elección del dispositivo de aireación debe considerar no solo el diseño estructural, sino también su funcionalidad operativa y adaptabilidad al tipo de tratamiento requerido. En ese sentido, si bien ambos modelos (Figura 3 y Figura 4) cumplen con la misma función esencial de inyectar oxígeno y promover la actividad biológica aeróbica, existen diferencias clave en su aplicación. El modelo representado en la Figura 2 es ampliamente utilizado en áreas específicas del sistema de tratamiento, especialmente donde se requiere una cobertura uniforme del oxígeno disuelto. Su configuración modular permite un arreglo conjunto que favorece la reducción de patógenos en zonas determinadas, facilitando su integración en cámaras de contacto o tanques de aireación extendida. Por otro lado, el dispositivo mostrado en la Figura 3 presenta una mayor eficiencia potencial cuando se complementa con un inyector tipo Venturi, el cual genera burbujas más finas y uniformes. Esta microaireación mejora la transferencia de oxígeno y amplía la superficie de contacto, aumentando la capacidad de captura de microorganismos patógenos. Por tanto, aunque la Figura 3 requiere una configuración adicional, puede resultar más adecuada en términos de eficiencia de aireación y eliminación de patógenos, siempre que se implemente con los accesorios complementarios apropiados.



Figura 3. *Dispositivo de burbuja fina (Modelo 1). Fuente: Tomado de empresa de ventas Aguamarket.*

Para el caso específico de la PTAR San Jerónimo, se considera técnicamente apropiado implementar el diseño representado en la Figura 3, debido a que la planta ya dispone de un proceso de tratamiento previo que permite una base operativa funcional. No obstante, con el objetivo de mejorar la eficiencia del proceso de aireación y potenciar la eliminación de patógenos, se requiere la adición de un dispositivo Venturi.

La integración del sistema Venturi al diseño de la Figura 3 permite la generación de burbujas más finas y homogéneas, lo cual incrementa la superficie de transferencia de oxígeno en el agua residual. Este efecto favorece la actividad biológica aeróbica y mejora la capacidad del sistema para capturar y reducir microorganismos patógenos.



Figura 4. *Dispositivo de burbuja fina (Modelo 2). Fuente: Tomado de empresa de ventas Sumio.*

3.11. Metodología de Diseño

La metodología de diseño a utilizar en este proyecto será una metodología propia adaptada y derivada de la VDI 2221, la cual es reconocida por su enfoque sistemático y estructurado en el diseño de productos técnicos. Esta metodología permitirá establecer un proceso claro y ordenado para el diseño del sistema de aireación, centrado en la optimización del parámetro KLa, crucial para la eficiencia del proceso de aireación. De la VDI 2221, se rescatarán principalmente los pasos relacionados con la definición de requisitos del sistema, la generación de conceptos de diseño y la validación mediante simulaciones. Sin embargo, se introducirá un enfoque específico adaptado a la naturaleza de este diseño, ya que no se contempla la creación de prototipos físicos. En lugar de validar un prototipo, se incorporará un análisis de sensibilidad para evaluar cómo las variaciones en las condiciones operativas afectan el comportamiento del sistema, así como un análisis de robustez para asegurar que el diseño sea eficiente bajo diversas condiciones. Además, se añadirá una fase de validación comparativa utilizando datos históricos del sistema, lo cual permitirá validar la simulación de resultados sin necesidad de pruebas físicas. De esta forma, la metodología adaptada combinará los principios fundamentales de la VDI 2221 con la necesidad de realizar una evaluación numérica y empírica continua, garantizando la fiabilidad y eficiencia del diseño sin la necesidad de realizar prototipos físicos.

3.12. Técnicas para demostrar la verdad o falsedad de la hipótesis planteada

La verificación de la hipótesis planteada se realizará mediante un enfoque cuantitativo basado en modelación computacional del desempeño del difusor de burbuja fina diseñado. La metodología aplicada comprende el dimensionamiento técnico del dispositivo, la simulación de su comportamiento en condiciones representativas de operación, y la comparación de los

resultados teóricos obtenidos con valores históricos reales provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) San Jerónimo.

Para tal efecto, se utilizarán herramientas de simulación en dinámica de fluidos computacional (CFD), mediante las cuales se modelará la eficiencia del difusor en términos de transferencia de oxígeno al medio líquido, tomando en cuenta variables clave como: geometría del dispositivo, diámetro de orificios, distribución del flujo, caída de presión y condiciones de operación típicas de la planta.

Una vez completado el diseño y la simulación, se calculará teóricamente la reducción estimada de los indicadores de carga orgánica: demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos totales en suspensión (SST). Estos valores serán comparados con las concentraciones históricas tratadas por la PTAR San Jerónimo en su configuración actual, a fin de determinar si el diseño propuesto permitiría alcanzar mejoras sustanciales en eficiencia de aireación y remoción de contaminantes.

La hipótesis general será considerada verdadera si los resultados de simulación del diseño mecánico propuesto muestran una eficiencia superior o equivalente en la reducción de carga orgánica respecto a los niveles obtenidos por la planta con sus actuales sistemas de aireación. Dado que el estudio no contempla pruebas experimentales ni validación in situ, la validez de la hipótesis estará fundamentada exclusivamente en la evidencia técnica derivada de la simulación y el análisis comparativo con datos reales.

CAPÍTULO IV

IV. IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN.

4.1. Base de datos y formulación del modelo

4.1.1. Presentación de datos históricos de referencia

Con la finalidad de establecer una base comparativa sólida para validar el diseño del difusor de burbuja fina propuesto, se recopilaron y analizaron los registros históricos correspondientes al año 2023 de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) San Jerónimo, operada por la Empresa Prestadora de Servicios de Saneamiento SEDACUSCO S.A. Esta información representa el desempeño real de la planta bajo condiciones de operación convencionales, sin intervención en su sistema de aireación actual.

Los datos analizados comprenden los valores mensuales de caudal promedio, temperatura del afluente, y concentraciones de sólidos totales en suspensión (SST), demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) y demanda química de oxígeno (DQO), tanto en el afluente como en el efluente tratado. Esta información fue utilizada como referencia técnica base para determinar la eficiencia actual del sistema de aireación de la planta y para contrastar los resultados obtenidos en las simulaciones del nuevo diseño.

Tabla 1. *Datos históricos de operación – PTAR San Jerónimo (2023)*

Caudal Promedio (L/s)	Mes	Temperatura (°C)	Afluente			Efluente		
			SST (ML/L)	DBO (MG/L)	DQO (MG/L)	SST (ML/L)	DBO9 (MG/L)	DQO10 (MG/L)
829.965	Enero	18.7	390	456.93	707.2	44	25.5	96.0
829.965	Febrero	18.1	382.5	432.4	790.4	50	21.1	92.8
733	Marzo	18.3	267.5	563.6	787.3	41	23.5	86.1
829.965	Abril	18	367.5	467.8	666.9	34	15.8	89.8
829.965	Mayo	16.9	355	349.98	626.51	44	16.7	112.5
829.965	Junio	17.1	392.5	474.8	704.4	71	39.1	167.1
829.965	Julio	16.5	482.5	541.7	707.2	44	23.8	137.6
829.965	Agosto	16.3	425	535.7	911.6	52.5	29.9	153.0
829.965	Setiembre	19	432.5	510.57	878.24	80.5	53.4	271.5
829	Octubre	20	360	566.9	878.2	67	45.6	198.0
829.965	Noviembre	18.3	302.5	439.2	774.4	29	37.7	137.6
829.965	Diciembre	17.3	345	342.7	633.6	38	12.3	76.8

Fuente: SEDACUSCO S.A. (2023)

Se observa que el caudal promedio mensual de tratamiento oscila entre 733.0 y 829.965 L/s, con una temperatura del afluente comprendida entre 16.3 °C y 20.0 °C. En cuanto a la calidad del afluente, los valores de concentración de DBO5 superan consistentemente los 400 mg/L en la mayoría de los meses, mientras que la DQO alcanza picos de hasta 911.6 mg/L en agosto. Asimismo, los sólidos totales en suspensión presentan un rango de variación de 267.5 mg/L a 482.5 mg/L, evidenciando una carga orgánica significativa en las aguas ingresantes.

Respecto al efluente, se aprecia que los procesos actuales de aireación permiten una reducción parcial de los parámetros, con concentraciones promedio de DBO9 en efluente cercanas a 28.6 mg/L y de DQO10 alrededor de 131.7 mg/L, lo cual, si bien representa una mejora, sugiere oportunidades de optimización tecnológica. Esta línea base permitirá cuantificar de manera comparativa la eficiencia teórica alcanzada por el diseño propuesto de difusor, en función de su capacidad para reducir los niveles de carga orgánica mediante una transferencia de oxígeno más efectiva.

Con el fin de garantizar la solidez estadística de dicho análisis comparativo, se evaluó la distribución de los datos históricos empleando la prueba de normalidad de Shapiro–Wilk, con un nivel de significancia de 0,05. Los resultados arrojaron valores de $p > 0,05$, lo que indica que no se rechaza la hipótesis nula de normalidad. En consecuencia, se confirma que los datos no presentan desviaciones significativas respecto a una distribución normal, validando así el uso de la media aritmética como medida representativa del comportamiento central de las variables analizadas.

4.1.2. Modelo matemático para las condiciones de operación y diseño.

Para simular el comportamiento dinámico del sistema de aireación en una planta de tratamiento de aguas residuales, es fundamental establecer un modelo matemático que relacione las condiciones operativas del difusor de burbuja fina con la evolución de la

concentración de oxígeno disuelto en el medio líquido. Esta variable es crucial, ya que influye directamente en la eficiencia del proceso de degradación de la carga orgánica, representada por parámetros como la DBO, la DQO y los sólidos suspendidos totales (SST).

Con este objetivo, se adoptó un enfoque basado en los principios fundamentales de transferencia de masa en medios líquidos, así como en la formulación dinámica de sistemas de primer orden aplicados a procesos ambientales. El modelo propuesto permite evaluar la evolución temporal de la concentración de oxígeno disuelto en el reactor, lo que a su vez permite estimar el desempeño global del tratamiento en términos de remoción de materia orgánica biodegradable y sólidos en suspensión.

4.1.2.1. Modelo físico de transferencia de oxígeno

El modelo se basa en la ley de difusión en interfase (teoría de la película) documentada por Lewis y Whitman (1924), la cual plantea que el flujo de oxígeno desde la fase gaseosa hacia el líquido ocurre a través de una película de espesor reducido en la interfaz gas-líquido, y es proporcional al gradiente de concentración. Bajo este marco, el flujo de oxígeno se describe como proporcional a la diferencia de concentraciones entre el gas en equilibrio con el líquido y el líquido mismo:

$$N_O = K_L(C^* - C) \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

- N_O : flujo de masa de oxígeno [mg/(L·s)]
- K_L : coeficiente de transferencia de masa en la fase líquida [m/s]
- C^* : concentración de saturación (en equilibrio con la fase gaseosa) [mg/L]
- C : concentración actual en el líquido [mg/L]

Ahora, este flujo ocurre a través de un área de contacto A , por lo que el flujo total de oxígeno hacia el líquido es:

$$Transferencia\ total = N_O \cdot A = K_L A (C^* - C)$$

Para modelar el comportamiento dentro de un volumen líquido V, se plantea un balance de masa:

$$\frac{d(CV)}{dt} = \text{Tasa de transferencia de } O_2$$

Sustituyendo en transferencia obtenida del paso anterior:

$$\frac{d(CV)}{dt} = K_L A (C^* - C)$$

Asumiendo que el volumen es constante:

$$V \cdot \frac{d(C)}{dt} = K_L A (C^* - C) \Rightarrow \frac{d(C)}{dt} = \frac{K_L A}{V} (C^* - C)$$

Se introduce el parámetro volumétrico $a = \frac{A}{V}$, que representa el área interfacial de contacto gas-líquido por unidad de volumen. Así se define el coeficiente volumétrico global de transferencia de oxígeno:

$$K_L a = K_L \cdot a$$

Sustituyendo, resulta la siguiente ecuación:

$$\frac{dC(t)}{dt} = K_L a (C^* - C(t)) \quad (\text{Ec. 2})$$

Esta es la ecuación diferencial que describe la dinámica del oxígeno disuelto en función del tiempo y es la base del modelo.

4.1.2.2. Representación como función de transferencia

Para analizar el sistema se hará uso de un enfoque de la ingeniería de control que permite realizar la simulación computacional del modelo, para ello se recurre a la transformada de Laplace de la ecuación 2, considerando condiciones iniciales nulas:

$$\mathcal{L} \left[\frac{dC(t)}{dt} \right] = \mathcal{L} [K_L a (C^* - C(t))]$$

$$sC(s) = K_L a (C^*(s) - C(s)) \Rightarrow C(s) (s + K_L a) = K_L a \cdot C^*(s)$$

Por tanto, la función de transferencia del sistema, que relaciona la entrada $C^*(s)$ con la salida $C(s)$, se expresa como:

$$G(s) = \frac{C(s)}{C^*(s)} = \frac{K_L a}{s + K_L a} \quad (\text{Ec. 3})$$

Esta es la forma canónica de un sistema lineal de primer orden, en el cual la constante $K_L a$ determina tanto la rapidez con la que el sistema alcanza el equilibrio como la ganancia total del mismo.

4.1.2.3. Justificación del uso de un sistema de primer orden

La elección de este tipo de modelo se justifica en función de las características físicas del proceso de aireación:

- Existe una única entrada dominante (oxígeno del aire) y una única variable de salida (concentración de oxígeno disuelto).
- No se presentan efectos retardados, múltiples acumulaciones o dinámicas de retroalimentación.
- El comportamiento del sistema es progresivo y asintótico hacia un equilibrio definido por C^* .

La solución analítica en el dominio del tiempo se obtiene a partir de la ecuación diferencial que describe el sistema. Dado que la ecuación 2 es de tipo lineal no homogénea de primer orden, su resolución se aborda mediante el método de separación de variables, siguiendo el procedimiento que se detalla a continuación:

$$\frac{dC(t)}{(C^* - C)} = K_L a dt$$

Integramos ambos lados:

$$\int \frac{1}{(C^* - C)} d(C) = \int K_L a dt$$

$$-\ln |C^* - C| = K_L a \cdot t + C_1$$

Despejamos:

$$|C^* - C| = e^{-K_L a t + C_2} = C_3 \cdot e^{-K_L a t}$$

Ahora se consideran las siguientes condiciones iniciales:

Cuando $t = 0$, se asume $C(0) = 0$ pues el líquido está inicialmente sin oxígeno suministrado.

$$C^* - C(0) = C^* = C_3 \cdot e^0 \Rightarrow C_3 = C^*$$

Finalmente:

$$C(t) = C^*(1 - e^{-K_L a t}) \quad (\text{Ec. 4})$$

Esta solución muestra que $C(t)$ tiende asintóticamente a C^* cuando $t \rightarrow \infty$, y que la velocidad del proceso depende directamente de $K_L a$.

Asimismo, la eficiencia de remoción teórica de contaminantes biodegradables como la DBO5 puede expresarse como:

$$\eta(t) = (1 - e^{-K_L a t}) \cdot 100 \quad (\text{Ec. 5})$$

4.1.2.4. Formulación empírica del coeficiente $K_L a$.

Para integrar las condiciones operativas y geométricas del difusor en el modelo, se adopta una expresión empírica utilizada en ingeniería, que relaciona el coeficiente $K_L a$ (en unidades de h^{-1}) con las principales variables de diseño (Metcalf & Eddy Inc, 2014).

$$K_L a = \alpha \cdot O^\beta \cdot P^\gamma \cdot d^{-\delta} \cdot e^{\epsilon T} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

- O : caudal de aire [L/s]
- P : presión de entrada [kPa]

- d : diámetro de orificio del difusor [mm]
- T : temperatura del líquido [°C]
- $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$: constantes empíricas determinadas a partir de la literatura técnica o por ajuste de datos

Para esta investigación, se adopta la siguiente formulación empírica con el fin de estimar el coeficiente global de transferencia de oxígeno K_La la cual está basada en modelos ampliamente difundidos en la literatura técnica, directrices reconocidas y estudios experimentales (ASCE, 1997) (Vanags & Suleiko, 2020). Estas referencias sustentan la relación funcional de K_La con el caudal de aire, la presión de entrada, el diámetro del orificio del difusor y la temperatura del líquido, utilizando exponentes empíricos validados en sistemas de aireación por burbuja fina.

$$K_La = 0.03 \cdot Q^{0.7} \cdot P^{0.2} \cdot d^{-0.5} \cdot e^{0.03T} \quad (\text{Ec. 7})$$

Esta expresión resume el efecto combinado de los parámetros mecánicos del sistema y las condiciones físicas del fluido, permitiendo calcular K_La para cada escenario de simulación planteado. De esta manera, se establece un puente cuantitativo entre las variables controlables del diseño y la eficiencia teórica del proceso biológico.

4.1.2.5. Definición de condiciones de diseño y operación para simulación

Se consideraron las variables de diseño establecidas por el modelo matemático (Q , P , d , T), para realizar la revisión de los datos históricos de la PTAR San Jerónimo con el fin de establecer los valores de dichos parámetros operacionales y de diseño que influyen directamente en el comportamiento del sistema de aireación, específicamente en el proceso de transferencia de oxígeno desde el gas al líquido. Estos parámetros constituyen las variables de entrada del modelo matemático y serán evaluados mediante simulaciones computacionales

para determinar su efecto sobre la respuesta del sistema, particularmente en la reducción de la carga orgánica (DBO5, DQO y SST).

Adicionalmente, para el diseño de sistemas de aireación se trabajará con valores de presión relativa debido a su impacto directo en el flujo de aire dentro del sistema. Este enfoque es ampliamente utilizado en el campo de la hidráulica y neumática, ya que la presión atmosférica suele considerarse constante y no influye significativamente en el comportamiento del sistema cerrado. De acuerdo con Fox y McDonald (2020), en sistemas como los de bombeo y aireación, es la presión relativa la que afecta directamente el rendimiento de las bombas y los difusores, ya que determina la capacidad de estos elementos para mover el fluido. Asimismo Chadwick, Morfett y Borthwick, (2021) afirman que la presión relativa es esencial para calcular el rendimiento del sistema, dado que se refiere a la diferencia de presión necesaria para superar las resistencias internas. Por tanto, en la etapa de diseño resulta suficiente y práctico trabajar con presión relativa, pues simplifica los cálculos y optimiza el dimensionamiento del sistema.

Por tanto, los factores seleccionados corresponden tanto a variables físicas controlables del proceso como a características geométricas del diseño del difusor. A continuación, se detalla la asignación de valores iniciales para las cuatro principales variables independientes consideradas:

Presión de operación ()

Para garantizar la correcta liberación del aire a través del difusor de burbuja fina, es necesario determinar la presión total que el sistema neumático debe vencer. Esta presión, denominada presión de operación P , está compuesta por la suma de tres componentes fundamentales: la presión hidrostática ejercida por la columna de lodo ligero, la presión mínima de apertura de la membrana del difusor y, opcionalmente, la presión atmosférica si se trabaja

en condiciones absolutas. En esta investigación, dado que se realiza el análisis en términos de presión relativa, se omite el componente atmosférico. Por tanto, la expresión general es:

$$P = P_{hidrostatica} + P_{membrana} = (\rho \cdot g \cdot h) + P_{membrana} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

- P : presión total requerida en el punto de salida del difusor (Pa)
- ρ : densidad del lodo tratado en el reactor (kg/m^3)
- g : aceleración de la gravedad, 9.81m/s^2
- h : profundidad de instalación del difusor (m)
- $P_{membrana}$: presión de apertura mínima del difusor (Pa)

La estimación de la altura de la columna líquida en el reactor se realiza a partir de la relación entre el volumen efectivo y el área superficial del tanque. El volumen se determina en función al área y altura del reactor los cuales se obtuvieron mediante medición satelital a través de la plataforma Google Earth, resultando en un valor estimado de 29.5m y 5m para el diámetro y altura (h) del reactor respectivamente.

Con estos datos, el volumen del reactor se obtiene aplicando la ecuación:

$$V = h \cdot Area = 5 \cdot \frac{\pi \cdot 29.5^2}{4} = 3417.46\text{m}^3$$

Para efectos de este estudio, se considera que el reactor biológico opera con un lodo ligero de densidad promedio $\rho = 1040\text{kg/m}^3$, lo cual representa una mezcla de agua residual con concentración moderada de sólidos suspendidos. Asimismo, respecto al tipo de difusor, se emplean dispositivos de burbuja fina con membrana de elastómero, cuya presión típica de apertura oscila entre 0.05 y 0.1 bar. En este análisis se adopta un valor representativo igual a 0.07bar (equivalente a 7000 Pa)

Sustituyendo todos los valores en la ecuación:

$$P = (\rho \cdot g \cdot h) + P_{membrana}$$

$$P = (1040 \cdot 9.81 \cdot 5) + 7000$$

$$P = 58012 \text{ Pa} = 58.012 \text{ KPa}$$

Por lo tanto, se considera un valor de presiones igual a 60 KPa.

Caudal de aire inyectado (O)

Para estimar un rango medio de caudal de operación del sistema de aireación es necesario comprender la relación entre el oxígeno requerido por el proceso biológico para degradar la materia orgánica y el flujo de aire suministrado para mantener dicho nivel de oxigenación. La estimación del consumo de oxígeno se realizó aplicando la ecuación recomendada en manuales de diseño de aireación, específicamente en Metcalf & Eddy (2014) y en el EPA – Fine Bubble Aeration Design Manual, utilizada como paso previo para dimensionar el suministro de aire que garantice concentraciones de oxígeno disuelto dentro del rango operativo del proceso.

$$DemandaO_2 \left[\frac{KgO_2}{dia} \right] = \frac{\alpha \cdot O \cdot (S_0 - S)}{1000} \quad (Ec. 9)$$

Donde

- *DemandaO₂*: Requerimiento de oxígeno, también conocida como AOR (Actual Oxygen Requirement)
- α : valor en el rango de 2.5 – 5 que representa $\left[\frac{KgO_2}{Kg \text{ DBO eliminada}} \right]$
- O: Caudal de agua ($830 \text{ L/s} = 0.83 \text{ m}^3/\text{s} = 71712 \text{ m}^3/\text{dia}$)
- S_0 : Concentración DBO de ingreso (473.5 mg/L)
- S: Concentración DBO de salida (28.7 mg/L)

De esta manera, incorporando valores se tiene:

$$DemandaO_2 = \frac{5 \cdot 71712 \cdot (473.5 - 28.7)}{1000}$$

$$DemandaO_2 = 159487.488 \left[\frac{KgO_2}{día} \right] = 6645.312 \left[\frac{KgO_2}{hora} \right]$$

Posteriormente, se aplicó la ecuación propuesta por Tchobanoglous, Burton y Stensel (2014), también recogida en manuales de la Water Environment Federation (WEF), para estimar el caudal medio de aire requerido a partir del requerimiento total de oxígeno calculado.

$$O_T = \frac{AOR}{\delta_{aire} \cdot \%O_2 \cdot SOTE} \quad (Ec. 10)$$

Donde

- O_T : Caudal de aire teórico (m^3/h)
- AOR: Requerimiento de oxígeno $\left[\frac{KgO_2}{hora} \right]$
- δ_{aire} : densidad del aire ($1.201 \text{ kg}/m^3$)
- $\%O_2$: Porcentaje de oxígeno en el aire (20.3%)
- $SOTE$: Tasa de transferencia del oxígeno, puede estimarse como 6.0 - 9.0% x mca (metros de columna de agua)

Reemplazando el requerimiento calculado previamente se tiene que:

$$O_T = \frac{6645.312}{1.201 \cdot 20.3 \cdot 0.06 \cdot 5}$$

$$O_T = 908.5630 \text{ m}^3/h$$

Para conocer la cantidad de difusores que debe haber en el sistema usamos la siguiente ecuación:

$$N_D = \frac{DD \cdot A_T}{100 \cdot A_d} \quad (Ec. 11)$$

Donde

- N_D : Numero de difusores
- DD : Densidad de difusores (entre 5-20%)
- A_T : Área del reactor (m^2)
- A_d : Área del difusor (m^2)

$$N_D = \frac{5 \cdot 683.49}{100 \cdot 0.1 \cdot 1} = 341.7$$

Conociendo la cantidad aproximada de difusores que debe haber en el sistema, se puede calcular el valor de caudal con el que trabajara cada uno de la siguiente manera:

$$O_D = \frac{O_T}{N_D} \quad (\text{Ec. 12})$$

Por tanto, el caudal mínimo de cada difusor será igual a:

$$O_D = \frac{908.563}{341} = 2.66 \text{ m}^3/\text{h} = 0.73 \text{ L/s}$$

Adicionalmente, según datasheet de fabricantes como SSI y SAE, el flujo en un difusor tubular puede llegar hasta rangos operativos $\sim 2.8 \text{ L/s}$. De esta forma, se establece el valor de caudal en un rango desde los 1 – 3 L/s.

Las ecuaciones de este apartado han sido validadas en la práctica por empresas especializadas, como Flowen, que brindan consultorías y ejecutan proyectos de tratamiento de aguas residuales, lo que respalda su pertinencia para el presente diseño.

Diámetro del orificio del difusor ()

El diámetro que tendría la burbuja en el medio líquido puede estimarse a partir del tamaño del orificio haciendo uso de la siguiente fórmula (Kister et al., 2008)

$$d_o = \frac{d_b^3 \cdot g \cdot (\rho_l - \rho_g)}{6 \cdot \sigma} \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde

- d_o : Diámetro del orificio (m)
- d_b : Diámetro de la burbuja (m)
- ρ_l : Densidad del líquido (Kg/m^3)

- ρ_g : Densidad del gas (Kg/m^3)
- σ : Tensión superficial de la película gas-líquido (N/m)

Considerando que, para burbuja fina los valores establecidos están en el rango de 2 – 5 mm según los fabricantes Xylem, Sanitaire y SSI Aeration, quienes recomiendan orificios en este intervalo para maximizar la transferencia de oxígeno y minimizar el consumo energético.

$$d_{o,min} = \frac{0.002^3 \cdot 9.81 \cdot (1040 - 0.87)}{6 \cdot 0.087} = 0.0001562 \text{ m} = 0.15 \text{ mm}$$

$$d_{o,max} = \frac{0.005^3 \cdot 9.81 \cdot (1040 - 0.87)}{6 \cdot 0.087} = 0.00244 \text{ m} = 2.44 \text{ mm}$$

Por ello, se calcula el tamaño del orificio óptimo para la generación de microburbujas, con un rango entre 0.5 y 2mm

Temperatura del líquido ()

La temperatura del agua se fijó en 18 °C, valor que corresponde al promedio real registrado en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) durante el año 2023. Este valor fue obtenido a partir de los datos operativos recopilados mensualmente, y se considera representativo de las condiciones térmicas habituales del afluente, por lo que resulta adecuado para emplearlo como referencia en las simulaciones y análisis del desempeño del difusor.

Bajo estas condiciones, se establecieron diversos escenarios iniciales de simulación, cada uno con una configuración específica del diseño del difusor y de las condiciones de operación. En todos los casos, la presión y la temperatura se mantuvieron constantes: la presión se fijó en el valor mínimo necesario para superar las cargas a las que estará sometido el difusor, mientras que la temperatura se mantuvo en el valor promedio previamente determinado, con el fin de realizar en esta etapa un análisis bajo condiciones térmicas de referencia. La influencia de su variación será considerada en etapas posteriores del estudio. Por su parte, el resto de

parámetros se modificó para representar distintas combinaciones posibles de características geométricas y operativas.

Tabla 2. *Resumen de los escenarios de simulación iniciales.*

Escenario	Caudal de aire Q (L/s)	Presión PP (kPa)	Diámetro del orificio (mm)	Temperatura T (°C)
Diseño A	1	60	0.5	18
Diseño B	1.5		0.9	18
Diseño C	2		1.3	18
Diseño D	2.5		1.7	18
Diseño E	3		2	18

Fuente: Elaboración propia.

Estos escenarios permiten analizar la respuesta del sistema frente a distintas configuraciones y establecer el comportamiento dinámico de la concentración de oxígeno disuelto en el reactor. Posteriormente, estos valores se integrarán en el modelo de transferencia para calcular el coeficiente de transferencia global (KLa) y obtener la eficiencia de respuesta en términos de rapidez de estabilización de cada configuración y determinar así el diseño óptimo, con las condiciones de operación ideales para maximizar la remoción de carga orgánica.

4.2. Simulación, evaluación, y diseño final

| 4.2.1. Simulación de condiciones de operación y diseño.

Para la realización de las simulaciones, se utilizó el software MATLAB, en el cual se ingresó la función de transferencia considerando, para garantizar su estabilidad, un error absoluto del 4% ($\pm 2\%$). Para ello, se determinaron los valores de KLa a partir de los parámetros de operación iniciales establecidos en la tabla 3.

Tabla 3. *Primer cálculo de KLa para primera simulación.*

Escenario	KL_a	τ (constante de tiempo)	Tiempo de respuesta (T_r)	Tiempo de establecimiento 2% (T_s)
Diseño A	0.1651	6.0564	13.3241	24.2256
Diseño B	0.1635	6.1177	13.4589	24.4707
Diseño C	0.1663	6.0115	13.2252	24.0459
Diseño D	0.1701	5.8803	12.9366	23.5210
Diseño E	0.1781	5.6138	12.3504	22.4553

Fuente: Elaboración propia

Se ingresan los valores de KL_a a la simulación con el fin de evaluar su estabilización ante un estímulo de escalón unitario, que correspondería al encendido de los aireadores.

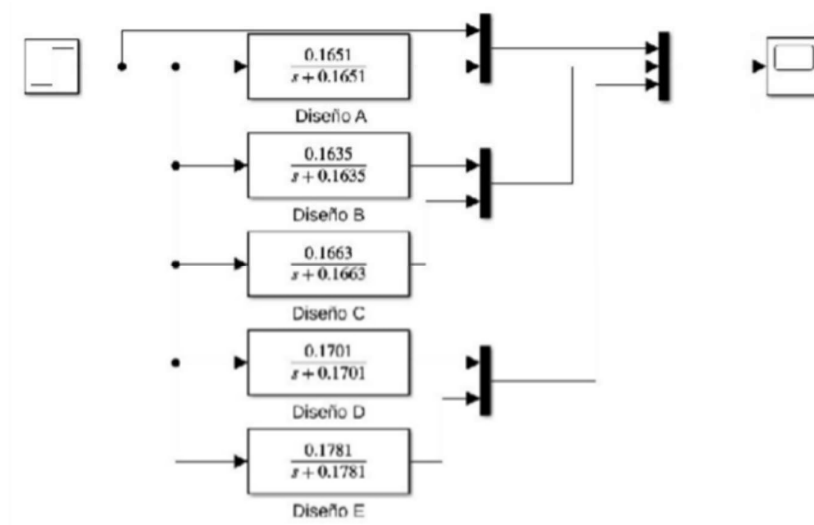


Figura 5. Primera simulación de parámetros de diseño y operación en Matlab. *Fuente: elaboración propia*

Al correr la simulación, se obtienen las gráficas de respuesta de cada uno de los diseños ingresados.

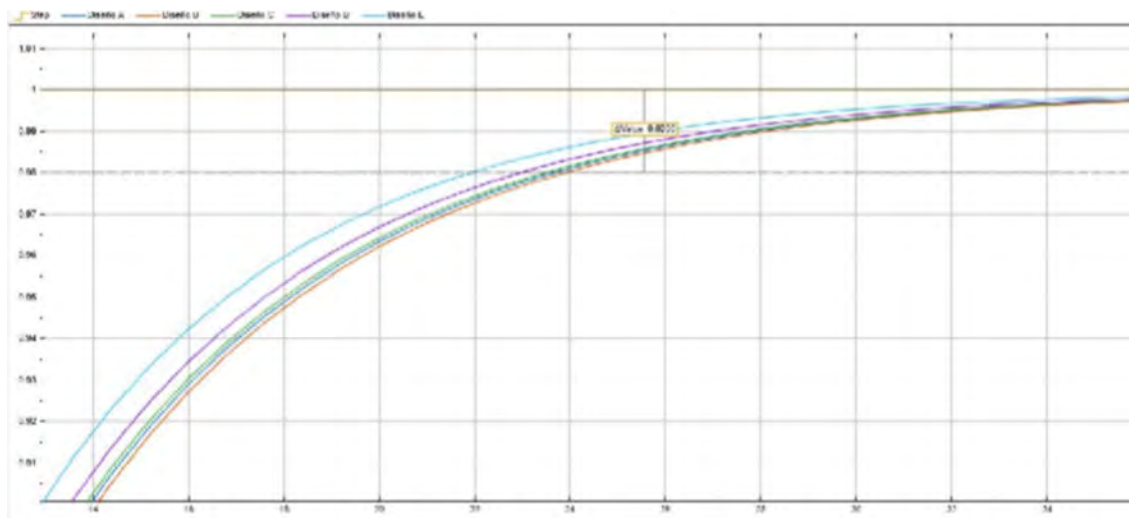


Figura 6. Primera simulación de parámetros de diseño y operación en Matlab. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 5 se observa que el diseño E alcanza la zona de estabilidad en el menor tiempo y presenta el valor más alto de K_{La} . Por ello, a fin de ver el comportamiento con distintos tamaños de orificios, se mantuvo dicho caudal y se variaron los diámetros para realizar nuevas pruebas, como se muestra a continuación.

Tabla 4. Establecimiento de parámetros de operación a partir de la primera simulación.

Escenario	Caudal de aire Q (L/s)	Presión PP (kPa)	Diámetro del orificio (mm)	Temperatura T (°C)
Diseño E1	3	60	0.5	18
Diseño E2			0.9	18
Diseño E3			1.3	18
Diseño E4			1.7	18
Diseño E5			2	18

Fuente: elaboración propia

Tabla 5. Segundo cálculo de K_{La} para la segunda simulación.

Escenario	K_{La}	τ (constante de tiempo)	Tiempo de respuesta (T_r)	Tiempo de establecimiento 2% (T_s)
Diseño E1	0.3563	2.8069	6.1752	11.2277
Diseño E2	0.2655	3.7659	8.2849	15.0635
Diseño E3	0.2209	4.5260	9.9572	18.1041
Diseño E4	0.1932	5.1757	11.3865	20.7028

Diseño E5	0.1781	5.6138	12.3504	22.4553
------------------	--------	--------	---------	---------

Fuente: Elaboración propia

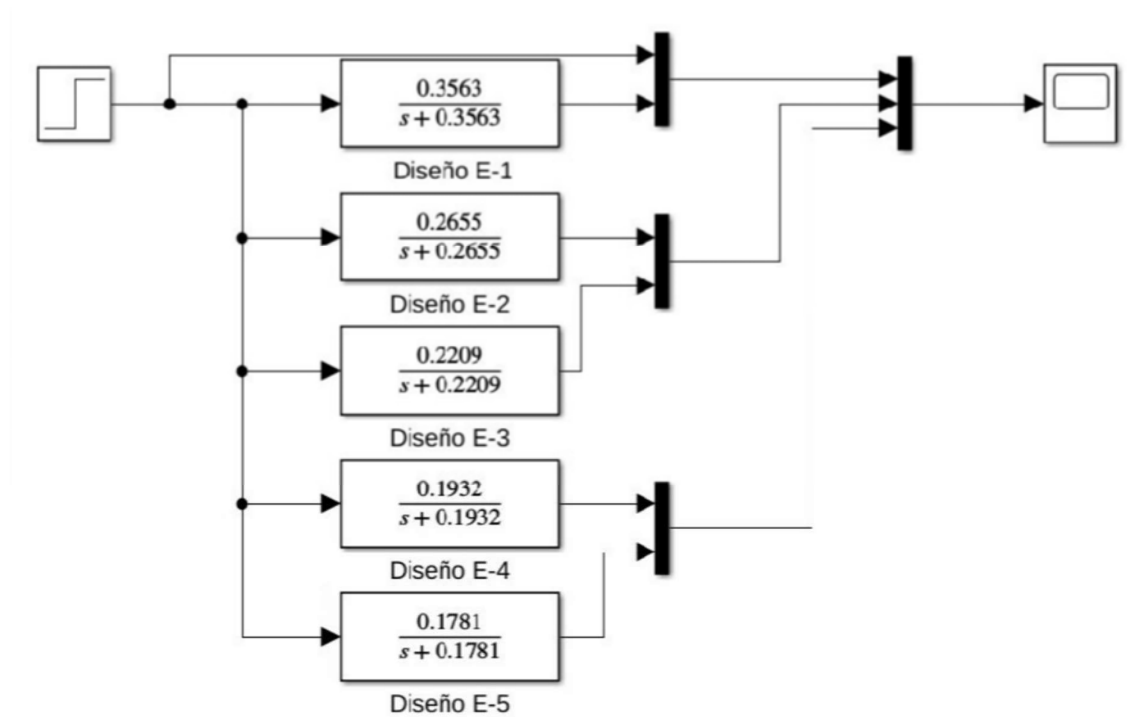


Figura 7. Segunda simulación de parámetros de diseño y operación en Matlab. Fuente: elaboración propia.

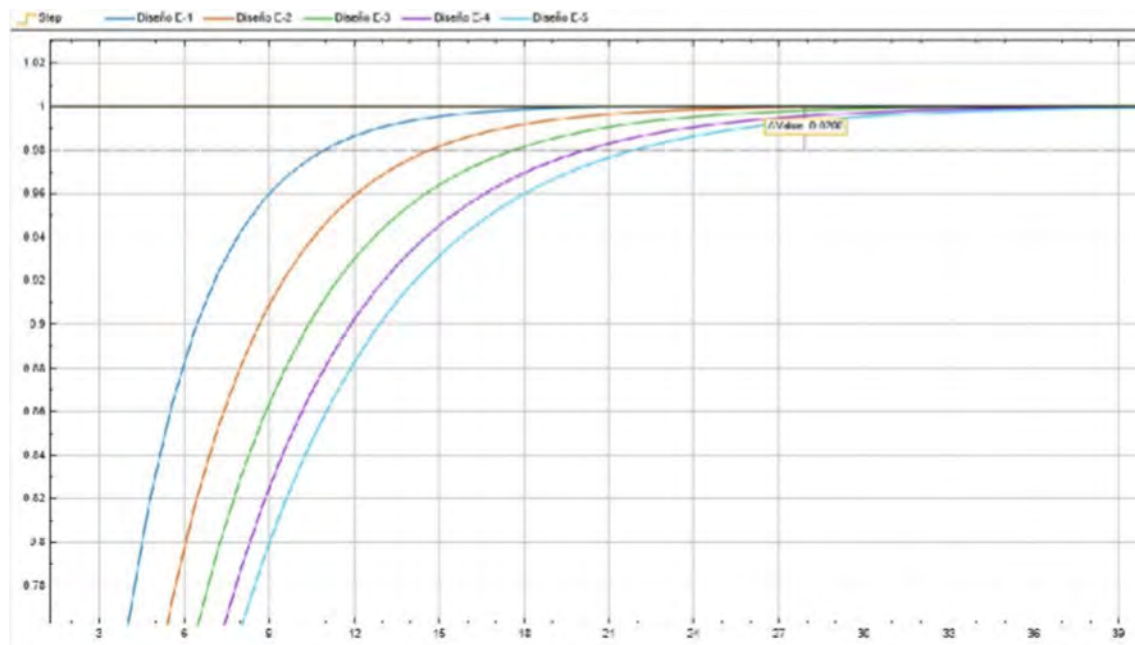


Figura 8. Respuesta de segunda simulación de diseños ante estímulo de escalón unitario. Fuente: elaboración propia.

Se evidencia que el diseño E-1 presenta un tiempo de estabilización más favorable en comparación con las demás configuraciones evaluadas. Por esta razón, se analizaron en detalle sus parámetros de tiempo de establecimiento (T_s) y tiempo de respuesta (T_r), con el fin de conocer si están dentro del rango de aceptabilidad esperado.

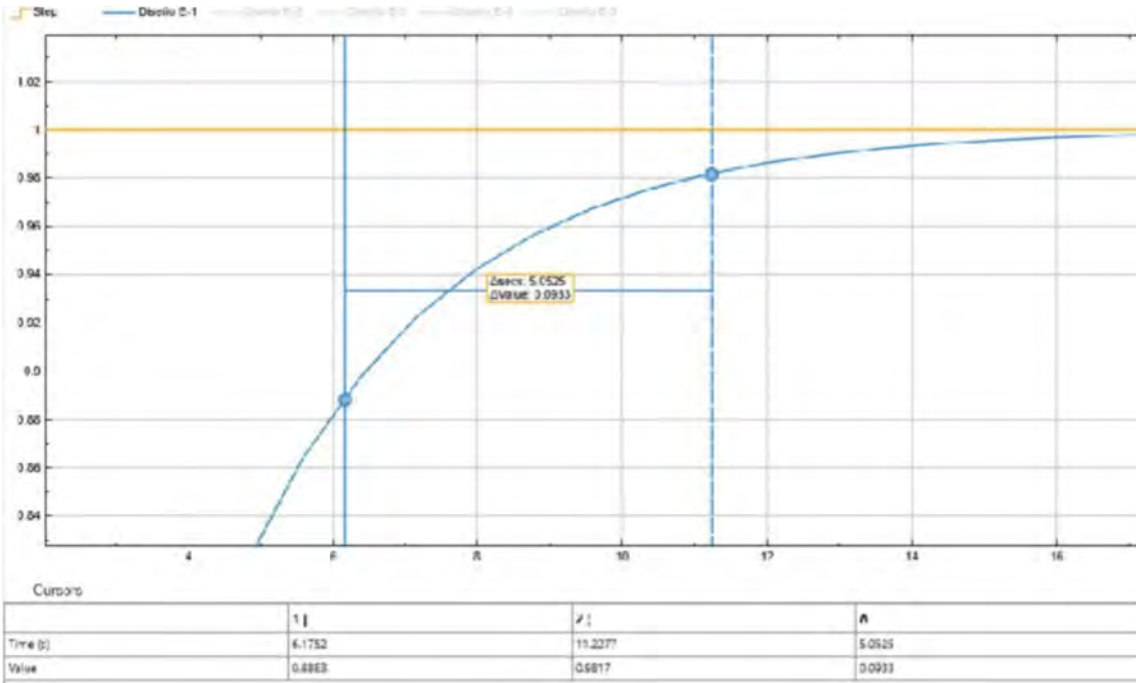


Figura 9. Revisión de T_s y T_r de diseño E-1. Fuente: elaboración propia.

Se verificó que, con un tiempo de respuesta (T_r) de 6.1752 el diseño alcanza un crecimiento del 88% (mayor al 67%). Asimismo, con un tiempo de establecimiento (T_s) de 11.2277 el error registrado es de 1.85%. Estos resultados permiten definir esta configuración como el modelo referencial para el diseño del difusor.

Finalmente, se llevaron a cabo pruebas adicionales considerando la variación de la temperatura del agua, con el propósito de evaluar su influencia en el desempeño y la estabilidad del sistema.

Tabla 6. Establecimiento de parámetros de operación a partir de la segunda simulación.

Escenario	Caudal de aire Q (L/s)	Presión PP (kPa)	Diámetro del orificio (mm)	Temperatura T (°C)
Diseño E1 - 16°	3	60	0.5	16
Diseño E1 - 17°				17
Diseño E1 - 18°				18
Diseño E1 - 19°				19
Diseño E1 - 20°				20

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Tercer cálculo de K_{La} para la tercera simulación.

Escenario	K_{La}	τ (constante de tiempo)	Tiempo de subida (T_r)	Tiempo de establecimiento 2% (T_s)
Diseño E1 - 16°	0.3355	2.9805	6.5571	11.9219
Diseño E1 - 17°	0.3457	2.8924	6.3633	11.5696
Diseño E1 - 18°	0.3563	2.8069	6.1752	11.2277
Diseño E1 - 19°	0.3671	2.7240	5.9927	10.8958
Diseño E1 - 20°	0.3783	2.6435	5.8156	10.5738

Fuente: Elaboración propia

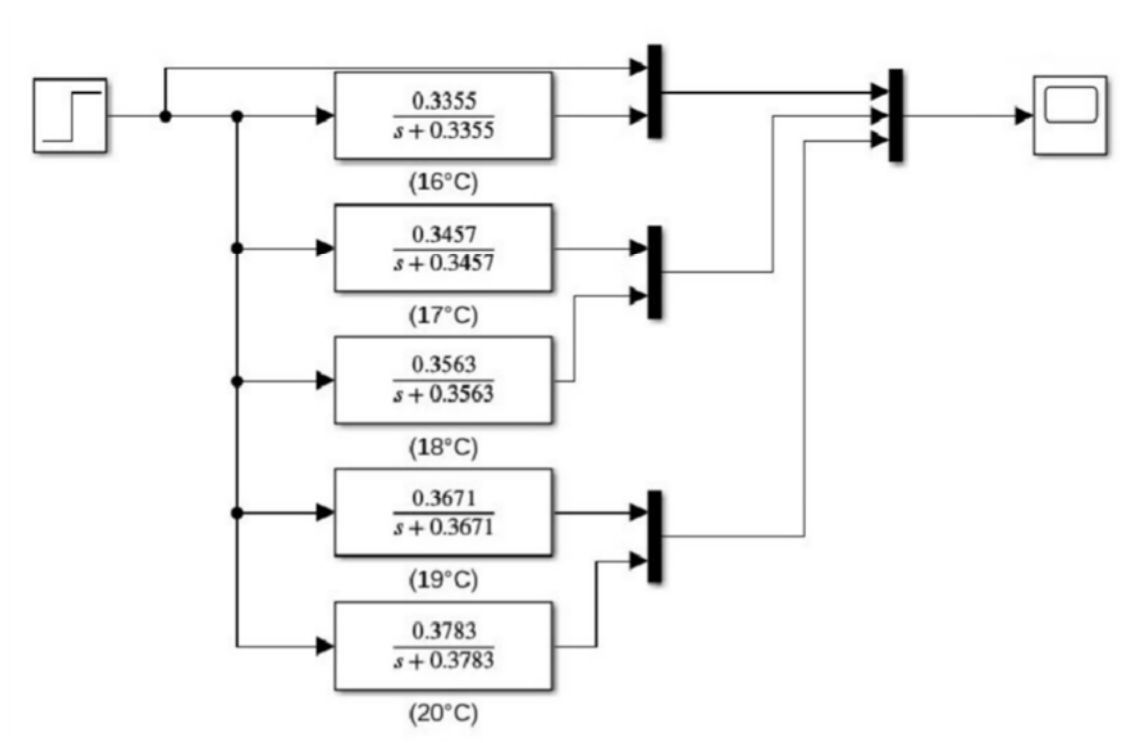


Figura 10. Tercera simulación de parámetros de diseño y operación en Matlab. Fuente: elaboración propia.

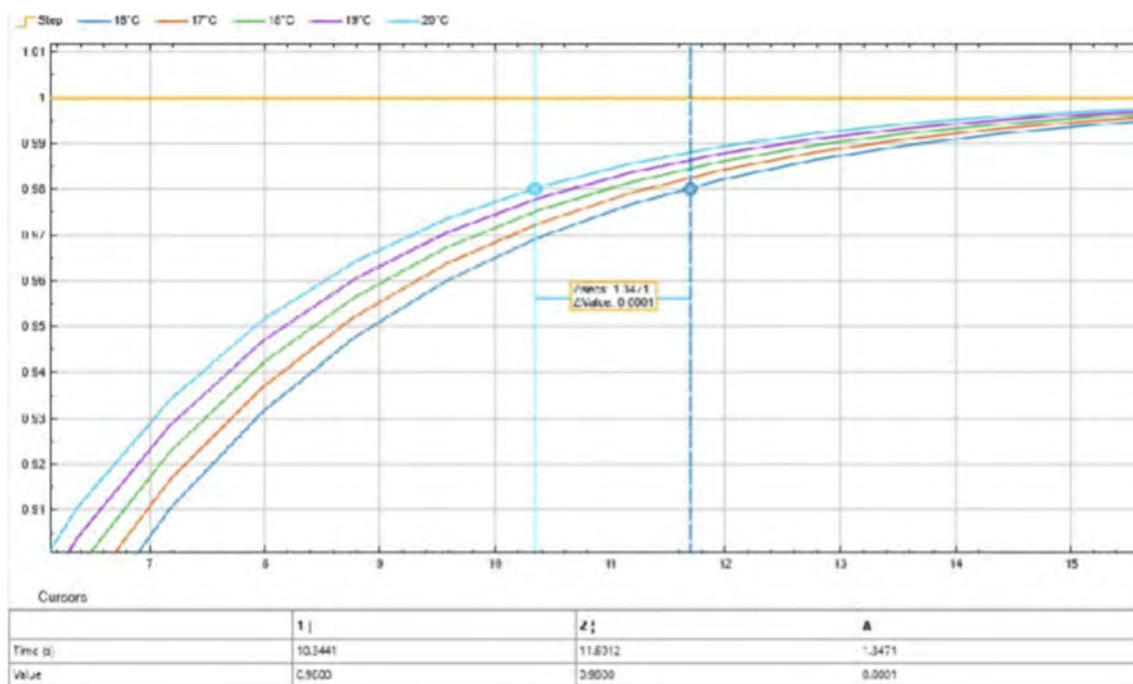


Figura 11. Tercera simulación de parámetros de diseño y operación en Matlab. Fuente: elaboración propia.

En la simulación se verificó que el tiempo de establecimiento difiere entre las temperaturas extremas evaluadas siendo 10.34 para 20 °C y 11,69 para 16°C, lo que representa una diferencia de 1.35. Esta variación reducida indica que la temperatura del agua, dentro del rango analizado, ejerce una influencia limitada sobre el tiempo de estabilización del sistema, lo que sugiere que el diseño del difusor mantiene un desempeño consistente frente a cambios moderados en las condiciones térmicas.

De tal manera, las condiciones de diseño quedan definidas de la siguiente manera:

Tabla 8. Condiciones de operación y diseño del difusor.

	Diseño E1
Caudal de aire Q (L/s)	3
Presión P (kPa)	60
Diámetro del orificio (mm)	0.5
Temperatura T (°C)	18
KLa	0.3563
τ (constante de tiempo)	2.8069
Tiempo de respuesta (Tr)	6.1752

Tiempo de establecimiento 2% (Ts)	11.2277
--	---------

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO V

V. INFLUENCIA DE CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS.

5.1. Diseño geométrico del difusor

En un sistema de aireación por burbuja fina, el aire suministrado debe ingresar al medio líquido de forma controlada y uniforme, evitando en todo momento el retroceso o infiltración de agua residual hacia la red de tuberías de aire. Este aspecto es crítico, ya que la entrada de líquido al sistema neumático puede ocasionar daños en los sopladores, obstrucción de conductos y pérdida de eficiencia operativa. Por ello, el diseño debe garantizar que la presión mínima en la entrada de membrana supere las presiones generadas por la columna líquida y las pérdidas internas, asegurando flujo unidireccional.

En la práctica existen diversos tipos de difusores empleados en plantas de tratamiento de aguas residuales, tales como los de disco, plato y tubo, cada uno con características específicas en cuanto a patrón de burbujeo, cobertura y mantenimiento. No obstante, para las condiciones particulares de esta investigación ($Q=30$ L/s, presión mínima de operación $P=25$ kPa, diámetro de orificios $d=0.5$ mm, temperatura de operación $T=18^{\circ}\text{C}$ y necesidad de cobertura longitudinal uniforme), el difusor de tipo tubular ofrece ventajas técnicas relevantes. Entre ellas destacan la facilidad de distribuir el aire a lo largo de su extensión, su mayor tolerancia a caudales variables y la posibilidad de incorporar mecanismos de optimización interna del flujo.

Con el fin de maximizar el aprovechamiento del aire suministrado y optimizar el coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno (K_La), se propone la integración del principio Venturi dentro del diseño tubular. Este principio se basa en que, al hacer pasar el aire

a través de una sección convergente, se incrementa su velocidad y disminuye su presión estática, para luego recuperar presión en la sección divergente.

En síntesis, aunque existen múltiples configuraciones posibles de difusores, el difusor tubular con integración de secciones Venturi resulta la opción más adecuada para las condiciones técnicas y operativas de la PTAR San Jerónimo. Su implementación permite mantener un flujo de aire eficiente y seguro, optimizando el uso energético y maximizando la eficiencia de oxigenación sin comprometer la integridad del sistema neumático.

5.1.1. Materiales

La selección de materiales para el difusor de burbuja fina tubular se fundamenta en su resistencia química, durabilidad mecánica y comportamiento frente a la abrasión e incrustaciones propias del licor mezcla. El medio de operación corresponde a aguas residuales en proceso de aireación con un pH promedio de 8.01 y una desviación estándar de 0.38, lo que indica condiciones ligeramente alcalinas. Este entorno requiere materiales que no se degraden por ataque químico, mantengan estabilidad dimensional y soporten la acción mecánica de los sólidos totales en suspensión (SST).

En este diseño, el cuerpo principal se propone en polipropileno reforzado (PP-R) debido a su alta resistencia química frente a medios alcalinos, bajo peso, facilidad de fabricación y adecuada resistencia a la abrasión. La membrana difusora, encargada de generar las burbujas finas, se propone en EPDM microperforado con tratamiento antiendurecimiento, por su elasticidad, estabilidad bajo ciclos repetitivos de apertura y cierre de microorificios y buen desempeño frente a aguas residuales con sólidos.

Tabla 9. *Comparación de propiedades de materiales.*

Uso en difusor	Material	Resistencia química (pH 6–9)	Durabilidad (años)	Resistencia a abrasión	Costo relativo
----------------	----------	------------------------------	--------------------	------------------------	----------------

Cuerpo	PVC-U	Alta	8–10	Media	Bajo
Cuerpo	PP-R	Muy alta	10–12	Alta	Medio
Cuerpo	Acero inoxidable 316	Muy alta	15–20	Muy alta	Alto
Membrana	EPDM	Alta	5–7	Alta	Medio
Membrana	Silicona	Alta	5–7	Media	Alto

Fuente: Elaboración propia

5.1.2. Geometría del cuerpo

Se adopta un difusor tubular con sección Venturi (convergente–garganta–difusor) para acelerar el flujo mejorando la distribución interna del aire hacia los orificios, controlar la caída de presión de modo que la presión estática local en la zona de orificios se mantenga ≥ 25 kPa y evitar el retroceso de líquido a la red de aire (presión interna siempre positiva respecto a la columna líquida).

Base matemática y supuestos

Para calcular las dimensiones del difusor considerando el principio de Venturi es necesario considerar la ecuación de continuidad del caudal y el principio de Bernoulli tal como se plantea a continuación:

$$Q = A \cdot v = \frac{\pi D^2}{4} \cdot v \quad (\text{Ec. 14})$$

En cuanto al principio de Bernoulli, se consideran los puntos en el centro de la sección transversal del tubo 01 (que es del sistema), quedando de la siguiente manera:

$$P_1 = P_2 + \frac{\rho}{2} (v_2^2 - v_1^2) + K_{tot} \frac{\rho v_2^2}{2} \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde

- $D(D_1, D_2)$: diámetros en tubo de línea y garganta (g); $\beta = D_2/D_1$
- v_1, v_2 : velocidades en 1 y 2
- $\rho \approx 1.07 \text{ Kg/m}^3$: densidad del aire en la línea (Cusco, $P_{abs} \approx 90 \text{ KPa}$)

- K_{tot} : pérdidas adimensionales (convergente + garganta + difusor) dependientes de longitudes y ángulos.

Para la simulación se consideran las siguientes dimensiones:

- Tubo principal fijo (D_1): 4" $\approx$ 101.6 mm (0.1016 m).
- Gargantas (D_2): se consideran los siguientes diámetros comerciales de referencia:
 - 1" $\rightarrow$ 25.4 mm
 - 2" $\rightarrow$ 50.8 mm
 - 3" $\rightarrow$ 76.2 mm
- Pérdidas: alta
 - Alta: $K_{tot} = 0.60$

Del establecimiento de dichos parámetros se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 10. *Perdidas de presión ante distintos diseños de garganta Venturi.*

Prueba	D1 (m)	D2 (m)	Nivel de Pérdida	K_{tot}	v1 (m/s)	v2 (m/s)	P2 (KPa)	P1 (KPa)
1"	0.1016	0.0254	Alto	0.6	0.3700	5.9206	60	60.0299
2"	0.1016	0.0508	Alto	0.6	0.3700	1.4801	60	60.0018
3"	0.1016	0.0762	Alto	0.6	0.3700	0.6578	60	60.0003

Fuente: Elaboración propia

5.1.3. Configuración de orificios

Haciendo uso de la ecuación de flujo a través de un orificio, que a su vez es una aplicación directa del principio de Bernoulli combinado con el teorema de continuidad y un factor de corrección para pérdidas locales se estima la siguiente ecuación:

$$Q_0 = C_d \cdot A_0 \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde:

- Q_0 : caudal por orificio (m^3/s)
- C_d : coeficiente adimensional de descarga (0.6 a 0.65 para micro perforaciones)
- A_0 : área del orificio ($\pi d^2/4$) con $d = 0.5\text{mm} = 0.0005\text{m}$

- ΔP : presión diferencial entre el interior del difusor y el medio líquido ($Pa = \frac{Kg}{m \cdot s^2}$; $P_{EDPM} = 3Kpa$)
- ρ : densidad del aire en la línea ($1.07 Kg/m^3$)

$$A_0 = \frac{\pi \cdot 0.0005^2}{4} = 1.9634 \times 10^{-7} m^2$$

$$\Delta P = (60Kpa - P_{hidrostatica} - P_{EDPM}) \cdot 1000 = (60 - 51.012 - 3) \cdot 1000 = 5070 \text{ } 5988Pa$$

$$O_0 = 0.6 \cdot 1.9634 \times 10^{-7} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 5988}{1.07}}$$

$$O_0 = 1.2463 \times 10^{-5} m^3/s = 0.012463 l/s$$

Esto permite estimar el número de orificios necesarios para manejar $O_T = 3 L/s$

$$N = \frac{O_T}{O_0} = \frac{3}{0.012463} = 240$$

5.1.4. Requerimientos mecánicos

El diseño mecánico del cuerpo tubular del difusor debe garantizar su integridad estructural bajo las condiciones de operación establecidas, evitando deformaciones permanentes, pandeo o ruptura por esfuerzos generados por la presión interna y externa. Para ello, se considera la presión diferencial real que actúa sobre la pared del tubo, dado que este se encuentra sumergido en el licor mezcla y, simultáneamente, es presurizado con aire suministrado por el sistema de aireación.

La presión interna (P_i) corresponde a la presión del aire justo antes de la membrana del difusor, que para este diseño es como mínimo 60 kPa.

La presión externa (P_e) corresponde a la presión hidrostática generada por la columna de mezcla a la profundidad de instalación (h), que para este diseño es 51.012 kPa.

Por ende, la presión diferencial real que somete la pared del difusor es:

$$\Delta P = P_i - P_e \quad (\text{Ec. 17})$$

Si $P_i > P_e$ el tubo trabajaría como recipiente a presión interna (caso más común para aireación).

Si $P_e > P_i$ el tubo trabajaría bajo presión externa, lo que implicaría riesgo de colapso por pandeo (raro en difusores, pero posible si hay falla de suministro de aire y profundidad grande).

Teniendo en cuenta ello, el cálculo de espesor se basa en la teoría de recipientes delgados a presión interna, válida cuando la relación entre el diámetro exterior y el espesor es mayor a 20, condición que se cumple en este diseño, de esta manera, la ecuación para el espesor mínimo requerido es:

$$t = t_{res} + c_a = \frac{\Delta P \cdot D}{2 \cdot S \cdot E_f} + C_a \quad (\text{Ec. 18})$$

Donde

- t_{res} : espesor resistente (m)
- ΔP : presión diferencial real (Pa) entre el interior del difusor y el exterior.
- D : diámetro exterior del tubo (m)
- S : tensión admisible del material (Pa), Se adopta el valor de 27.5 Mpa (material PVC-U, similar al PP-R)
- E_f : eficiencia de junta/fabricación (adimensional; valor entre 0.85 y 1.0 según calidad de manufactura)
- C_a : factor por corrosion/erosion (m). Para PP-R / PVC-U, materiales estables en $Ph \sim 8$ la degradación no es corrosiva sino mecánica, por lo tanto, $C_a = 0.0005$ a $0.0015m$

$$t_{res} = \frac{8988 \cdot 0.0508}{2 \cdot 27.5 \times 10^6 \cdot 0.85} = 9.6643 \times 10^{-6}m = 0.0000096mm$$

$$t = (9.6643 \times 10^{-6}) + 0.0015 = 0.001509m = 1.509mm$$

En la práctica industrial y catálogos de fabricantes, para asegurar rigidez mecánica y durabilidad en servicio, se recomienda un espesor de 3 a 5mm, incluso cuando el cálculo por presión diferencial da espesores mucho menores.

De esta manera, el diseño del difusor quedaría representado tal como lo muestra la figura 11.



Figura 12. Boceto del diseño geométrico del difusor de burbuja fina. Fuente: elaboración propia.

Y las dimensiones como se indica en la tabla 11.

Tabla 11. Dimensionado del difusor de burbuja fina.

Garganta Venturi			Difusor			
Diámetro Principal	Angulo de reducción	Longitud de garganta	Diámetro Secundario	Longitud de difusor	Espesor de pared	Agujeros
101.6mm	22°	70,78mm	50,8mm	629,22mm	3mm	240

Fuente: Elaboración propia, mayor detalle en Anexos.

5.1.5. Perdida de carga en la línea

Haciendo uso de la ecuación de Darcy–Weisbach es posible estimar la perdida de carga por fricción en el sistema.

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$

Donde:

- ΔP : pérdida de presión por fricción [Pa]
- f : coeficiente de fricción de Darcy (adimensional), depende del régimen de flujo y rugosidad de la tubería
- L : longitud de la tubería [m]
- D : diámetro interno de la tubería [m]
- ρ : densidad del fluido [1,2041 kg/m³]
- v : velocidad media del fluido [m/s]

Se calcula el número de Reynolds para poder obtener el coeficiente de fricción.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

$$Re = \frac{1.2041 \cdot 0.37 \cdot 0.1016}{1.825 \cdot 10^{-5}} = 2480.25$$

Dado que el valor se encuentra ligeramente por encima del valor característico de fluidos laminares, se calcula el valor del coeficiente para flujos turbulentos haciendo uso del diagrama de Moody. Para ello, se toma en cuenta dos valores de rugosidad absoluta para los materiales “Tubo liso de plástico (PE, PVC)” y “Tubos estirados de acero” de la tabla del departamento de ingeniería civil y geomática de la UNAM, cuyo detalle se presenta en los anexos.

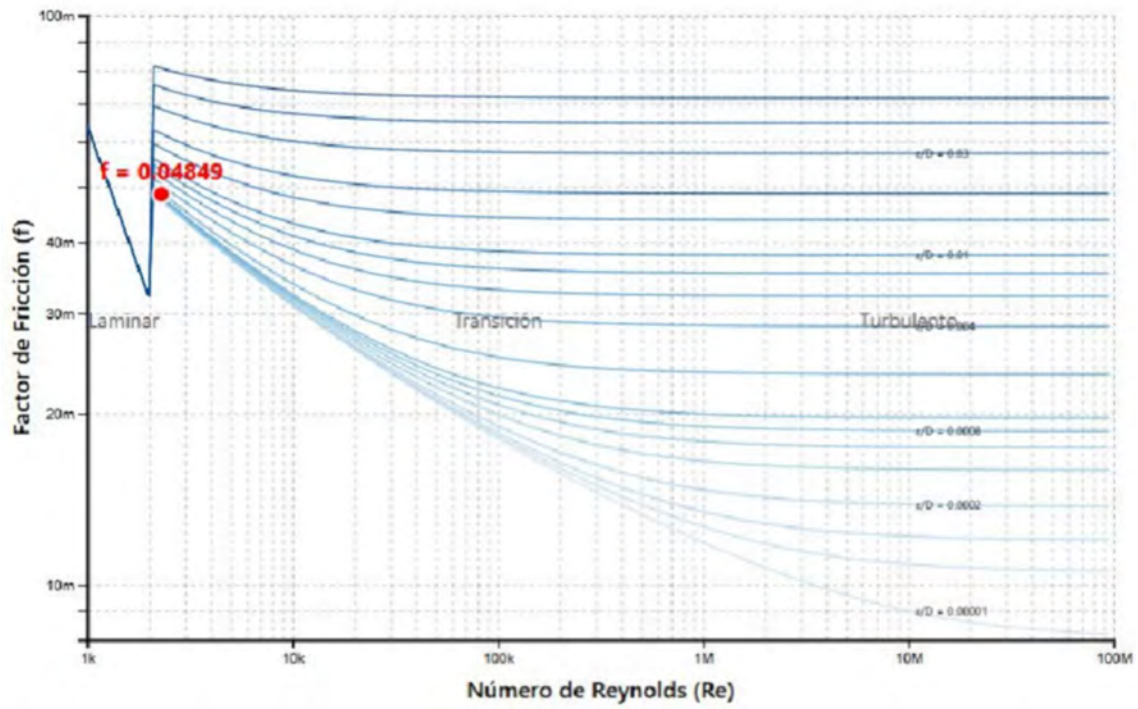


Figura 13. Estimación de coeficiente de fricción para tubo liso de Plástico (PE, PVC) con $\epsilon=0.0015$. Fuente: elaboración propia.

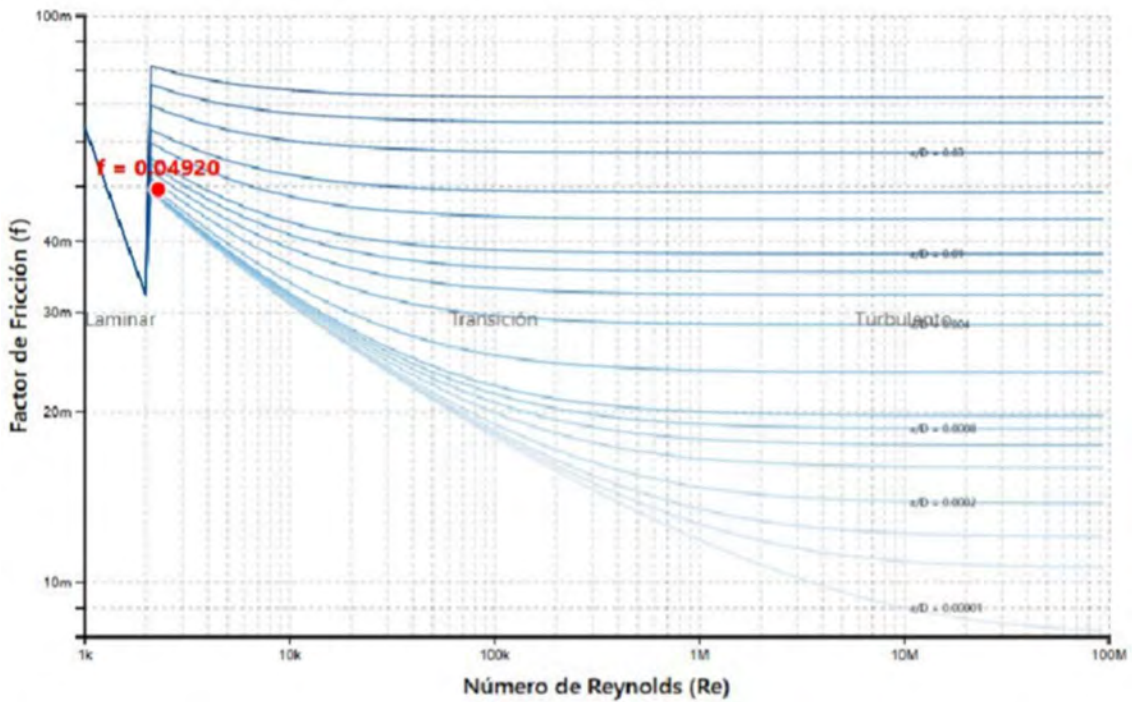


Figura 14. Estimación de coeficiente de fricción para tubos estirados de acero con $\epsilon=0.0024$. Fuente: elaboración propia.

De esa manera, la pérdida de carga se calcula de la siguiente manera:

$$\Delta P_{PE} = 0.04849 \cdot \frac{29}{0.1016} \cdot \frac{1.2041 \cdot 0.37^2}{2} = 1.14 \text{ Pa}$$
$$\Delta P_{Acero} = 0.04920 \cdot \frac{29}{0.1016} \cdot \frac{1.2041 \cdot 0.37^2}{2} = 1.15 \text{ Pa}$$

5.1.6. Opciones de soporte del sistema.

Como primera opción, se puede contemplar instalar una parrilla rígida que sirva de plataforma para el colector principal y las barras transversales donde se montan los difusores tubulares, tal como se aprecia en la primera imagen. La parrilla, construida en acero inoxidable o en perfiles plásticos industriales, se apoya sobre patas ajustables o anclajes de hormigón para permitir su nivelación sobre el fondo del reactor; el colector longitudinal atraviesa la parrilla y las salidas a cada difusor se fijan con saddles o abrazaderas recomendadas. Además, se prevén válvulas de aislamiento y uniones rápidas en puntos accesibles para facilitar la extracción de tramos sin vaciar el tanque, así como puntos de izado que agilicen las labores de mantenimiento y revisión de membranas.



Figura 15. Soporte de tipo parrilla. Fuente: elaboración propia.

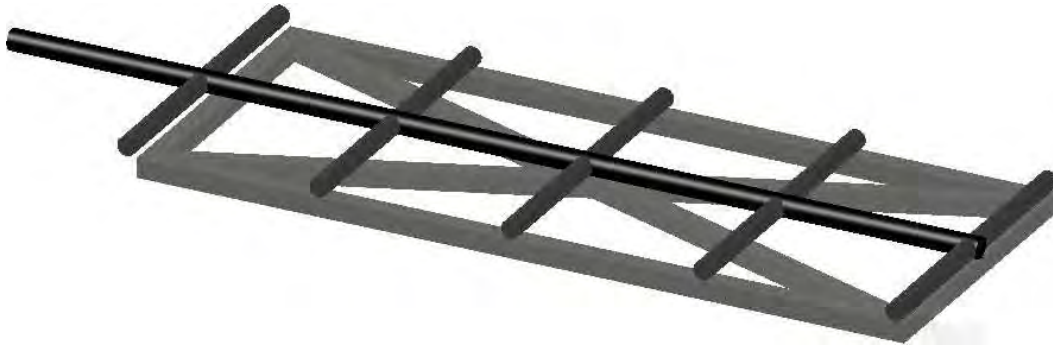


Figura 16. *Implementación de sistema en soporte de tipo parrilla. Fuente: elaboración propia.*

Así mismo y como alternativa, un sistema modular formado por varillas o brazos transversales individuales sujetos al colector principal mediante abrazaderas deslizantes, conforme muestra la segunda imagen. Cada varilla sostiene un difusor y su ramal corto, lo que facilita el reemplazo puntual y reduce la necesidad de manipular grandes conjuntos durante el mantenimiento. Esta disposición permite ajustar la separación entre difusores según las necesidades de aireación y emplear lastres o soportes puntuales donde no sea posible anclar la estructura; igualmente, es recomendable incorporar dispositivos de balanceo en cada toma para asegurar una distribución uniforme del caudal.



Figura 17. *Soporte de tipo varilla con abrazaderas. Fuente: elaboración propia.*



Figura 18. *Implementación de sistema en soporte de tipo varilla con abrazaderas. Fuente: elaboración propia.*

En ambos casos se sugiere especificar materiales y fijaciones compatibles con el ambiente de aguas residuales.

CAPÍTULO VI

VI. VALIDACION DEL DISEÑO

6.1. Modelo matemático para estimar la eficiencia teórica de remoción de contaminantes

El proceso de remoción de contaminantes orgánicos en los sistemas de tratamiento biológico está estrechamente relacionado con la disponibilidad de oxígeno disuelto en el medio, el cual es suministrado mediante sistemas de aireación. La literatura técnica especializada ha demostrado que la eficiencia de remoción puede modelarse como una función exponencial dependiente del oxígeno disponible y del tiempo de contacto, en concordancia con el comportamiento de sistemas de primer orden (Metcalf & Eddy, 1995). Bajo este enfoque, la transferencia efectiva de oxígeno a la biomasa activa sigue una cinética de tipo exponencial, cuya tasa está modulada por un coeficiente de remoción que resume el efecto combinado de las condiciones hidráulicas, físicas y biológicas del sistema.

Para cuantificar la eficiencia teórica de remoción en función de los niveles de oxígeno disponibles, se utilizará la siguiente expresión:

$$S_f = S_o \cdot e^{-k_e \cdot C(t_R)} \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde:

- S_o : concentración de contaminante en el afluente [mg/L]
- S_f : concentración de contaminante en el efluente [mg/L]
- k_e : coeficiente efectivo de remoción [L/(mg·h)]
- $C(t_R)$: concentración promedio de oxígeno disuelto durante el tiempo de residencia hidráulica [mg/L]

Esta ecuación refleja la proporción de carga que permanece en el sistema tras el proceso de aireación, en función del oxígeno suministrado y la capacidad del sistema para convertirlo en remoción efectiva. La forma exponencial responde a la naturaleza no lineal del proceso, en

la que el rendimiento marginal de la remoción decrece conforme se reduce la carga residual. Se trata de un modelo simplificado pero representativo, útil para estimaciones teóricas y comparativas, especialmente en estudios de diseño como el presente.

6.1.1. Justificación de la estimación del parámetro $C(t_R)$

El parámetro $C(t_R)$ representa la concentración media de oxígeno disuelto disponible en el reactor biológico durante el tiempo de residencia hidráulica. Dado que la presente investigación no contempla validación en campo, se optó por estimar este valor con base en criterios técnicos reconocidos. Según estipula la norma OS.090 los niveles mínimos de oxígeno disuelto en reactores de lodos activados con difusores convencionales se sitúan generalmente entre 1.0 y 2.0 mg/L, dependiendo del tipo de difusor, carga orgánica y condiciones de operación (Municipalidad Distrital de Santa María del Mar, 2016).

Para este estudio, se adopta el valor de $C(t_R) = 3.5 \text{ mg/L}$, por considerarse representativo de una planta que opera de forma estable, con aireación continua y dotada de difusores de burbuja fina en estado funcional. Este valor fue además validado retroactivamente a partir de los niveles históricos de remoción de contaminantes registrados en la PTAR San Jerónimo.

6.1.2. Estimación del coeficiente k_e a partir de la data real

Con base en la ecuación presentada y los datos históricos del año 2023 registrados por la PTAR San Jerónimo, se estimaron los valores del coeficiente efectivo de remoción k_e para cada indicador: DBO5, DQO y SST. Para ello, se reorganizó la ecuación 10 a fin de despejar k_e :

$$k_e = \frac{1}{C(t_R)} \cdot \ln\left(\frac{S_o}{S_f}\right) \quad (5.20)$$

Los valores históricos promedio que corresponden al afluente (entrada) y efluente (salida) calculados en base al reporte de SEDACUSCO SA fueron:

Tabla 12. *Indicadores promedio del afluente y efluente*

Parámetro	So (afluente) mg/L	Sf (efluente)
DBO9	473.5 mg/L	28.6 mg/L
DQO10	773.3 mg/L	143.3 mg/L
SST	442.6 ml/L	49.6 ml/L

Fuente: Elaboración propia

Con estos valores, y considerando que diversos autores establecen que una concentración de oxígeno de al menos 2 mg/L es suficiente para no afectar el crecimiento de los microorganismos responsables de degradar la materia orgánica (Henze et al., 2002) (Fluidesa, 2021). Se toma un valor referencial de concentración de oxígeno $C(t_R) = 3.5 \text{ mg/L}$, obteniéndose los siguientes coeficientes:

- Para DBO9:

$$k_{e, DBO} = \frac{1}{3.5} \cdot \ln \left(\frac{473.5}{28.6} \right) = 0.8019$$

- Para DQO10:

$$k_{e, DQO} = \frac{1}{3.5} \cdot \ln \left(\frac{773.3}{143.3} \right) = 0.4816$$

- Para SST:

$$k_{e, SST} = \frac{1}{3.5} \cdot \ln \left(\frac{442.6}{49.6} \right) = 0.6253$$

Estos valores serán empleados como referencia base en la simulación del comportamiento de los contaminantes frente a los nuevos escenarios de diseño propuestos para el difusor de burbuja fina. El propósito es determinar si el incremento en la concentración de oxígeno disuelto generado por el nuevo diseño permite alcanzar mejoras significativas en la eficiencia de remoción.

6.2. Evaluación teórica de Oxígeno disuelto

Para calcular la saturación teórica máxima de concentración de oxígeno que puede disolverse en la mezcla (C^*) se requiere una medida base que luego se ajustara con las condiciones de presión del sistema.

Por ello, se usará como valor referencial la solubilidad base de oxígeno en agua dulce, haciendo uso de la ecuación de saturación de oxígeno disuelto en agua pura en función de la temperatura (en °C) que permite estimar la concentración de saturación de oxígeno disuelto en agua dulce a presión atmosférica estándar, usando únicamente la temperatura.

$$C^*_{1atm}(T)[mg/L] = 14.652 - 0.41022T + 0.007991T^2 - 7.774 \times 10^{-5}T^3 \quad (5.16)$$

Obteniendo que, para una $T=18^\circ\text{C}$

$$C^*_{1atm}(18) = 9.4037mg/L$$

Para ajustar el valor base considerando a la presión y condiciones del entorno, se hace uso de la ecuación ajustada de C^* con corrección barométrica (Ley de Henry y Dalton) que permite ajustar el valor de $C^*(T)$ obtenido a nivel del mar para reflejar las condiciones reales de presión atmosférica y presión hidrostática a la profundidad h , descontando la presión parcial del vapor de agua:

$$C^*(T,h) = C^*_{1atm}(T) \left(\frac{P_{atm} + P_{hidrostatica} + P_{H2O}(T)}{101.325 - P_{H2O}(T)} \right) \quad (\text{Ec. 21})$$

Donde, para los fines de la presente investigación:

- $T = 18^\circ\text{C}$; $h = 5\text{mt}$
- $C^*_{1atm}(T) = C^*_{1atm}(18) = 9.40mg/L$
- $P_{atm} = 65KPa$ (Cuzco, $\sim 3400\text{msnm}$)
- $P_{H2O}(T) = P_{H2O}(18) \approx 2.1Kpa$
- $P_{hidrostatica} = \rho \cdot g \cdot h = 58.012 Kpa$

De esta manera se obtiene que:

$$C^*(18^\circ\text{C}, 5\text{mt}) = 9.4 \left(\frac{65 + 51.012 + 2.1}{101.325 - 2.1} \right) = 11.18 \text{mg/L}$$

Teniendo ello, es posible calcular la transferencia de oxígeno en dos escenarios, el primero que describe la evolución de la concentración de oxígeno disuelto en un líquido en función del tiempo, partiendo de una concentración inicial C_0 , hacia la concentración de saturación C^* , y el segundo que incorpora el término de consumo según trabajos de Downing y Truesdale (1955) para representar el balance real en un reactor biológico donde coexisten transferencia de oxígeno y consumo por parte de microorganismos.

a) Sin consumo biológico (capacidad de aireación)

$$C(t) = C_0 + (C^* - C_0) (1 - e^{-K_L a \cdot t}) \quad (\text{Ec. 22})$$

b) Con consumo biológico constante r (OUR)

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C^* - C) - r \Rightarrow C(t) = C^* - \left(C^* - C_0 - \frac{r}{K_L a} \right) e^{-K_L a \cdot t} - \frac{r}{K_L a} \quad (\text{Ec. 23})$$

Considerando el estado estacionario $C_{ss} = C^* - \frac{r}{K_L a}$, que se alcanza cuando la tasa de transferencia de oxígeno hacia el líquido es igual a la tasa de consumo biológico, valor clave para verificar si el sistema de aireación mantiene un OD suficiente para el proceso biológico bajo carga estable.

6.2.1. Sin consumo biológico

Considerando la ecuación 12 del primer escenario, donde no existe consumo biológico (es decir $r=0$), un TRH=6h y un $C_0 = 2\text{mg/L}$ (valores operativo típicos entre 1.5–2.5 mg/L), se obtiene el siguiente valor de transferencia de oxígeno:

$$C(2h) = 2 + (11.18 - 2) (1 - e^{-0.3563 \cdot 6})$$

$$C(2h) = 10.09 \text{mg/L}$$

6.2.2. Con consumo biológico

Usando la ecuación 5.13 del segundo escenario y $TRH=2h$, se calculan diferentes consumos para obtener el punto crítico considerado aquel en que la demanda de oxígeno hace que la concentración que aporta el sistema no supere la concentración inicial del sistema:

Tabla 13. *Primer cálculo de concentración de oxígeno con consumo biológico.*

Consumo r [mg/L.h]	C(t) [mg/L]
1	7.6219
2	5.1462
3	2.6705
4	0.1948
5	-2.2809

Fuente: Elaboración propia

Se valida que con un $TRH = 2h$ y a partir de un consumo de $4mg/L$ el sistema de aireación resulta insuficiente para atender la demanda de oxígeno requerida del sistema.

Eficiencia de remoción estimada

Haciendo uso de la ecuación 4 se obtiene la siguiente eficiencia de remoción teórica:

$$\eta(t) = (1 - e^{-KL^{at}}) \cdot 100$$

$$\eta(2) = (1 - e^{-0.3563 \cdot 2}) \cdot 100$$

$$\eta(2) = 88.2\%$$

6.3. Validación matemática de diseño

6.3.1. Demanda Química de Oxígeno

Tabla 14. *Validación de Remoción de indicador DQO*

Periodo	Afluente	Efluente	
	Ingreso	Actual [mg/L]	Simulado (Ec. 19) [mg/L]
Enero	707,2	96	96,82
Febrero	790,4	92,8	108,13
Marzo	787,3	86,1	107,74
Abril	666,9	89,8	91,30
Mayo	626,51	112,5	85,67

Junio	704,4	167,1	96,43
Julio	707,2	137,6	96,82
Agosto	911,6	153	124,74
Setiembre	878,24	271,5	120,23
Octubre	878,2	198	120,22
Noviembre	774,4	137,6	106,02
Diciembre	633,6	76,8	86,67
LMP 200			

Fuente: Elaboración propia

6.3.2. Demanda Bioquímica de Oxígeno

Tabla 15. Validación de remoción de indicador DBO

Periodo	Afluente	Efluente	
	Ingreso	Actual [mg/L]	Simulado (Ec. 19) [mg/L]
Enero	456,93	25,5	19,90
Febrero	432,4	21,1	18,83
Marzo	563,6	23,5	24,55
Abril	467,8	15,8	20,37
Mayo	349,98	16,7	15,24
Junio	474,8	39,1	20,68
Julio	541,7	23,8	23,59
Agosto	535,7	29,9	23,33
Setiembre	510,57	53,4	22,24
Octubre	566,9	45,6	24,69
Noviembre	439,2	37,7	19,13
Diciembre	342,7	12,3	14,92
LMP 100			

Fuente: Elaboración propia

6.3.3. Solidos Totales en Suspensión

Tabla 16. Validación de remoción de indicador SST

Periodo	Afluente	Efluente	
	Ingreso	Actual [ml/L]	Simulado (Ec. 19) [ml/L]
Enero	390	44	33,87
Febrero	382,5	50	33,22
Marzo	267,5	41	23,23
Abril	367,5	34	31,91
Mayo	355	44	30,83
Junio	392,5	71	34,09
Julio	482,5	44	41,90

Agosto	425	52,5	36,91
Setiembre	432,5	80,5	37,56
Octubre	360	67	31,26
Noviembre	302,5	29	26,27
Diciembre	345	38	29,96
LMP 150			

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO VII

VII. RENTABILIDAD DE FABRICACIÓN DEL DISEÑO

7.1. Evaluación financiera y análisis del flujo económico

La evaluación económica constituye un componente fundamental en la validación de la viabilidad del proyecto, ya que permite cuantificar los costos asociados a la implementación del sistema de aireación mediante difusores de burbuja fina y contrastarlos con los beneficios esperados. Este análisis considera tanto las inversiones iniciales (tangibles e intangibles) como los costos operativos y de mantenimiento durante el horizonte de evaluación. Asimismo, se proyectan los ingresos generados y se calculan indicadores financieros que determinan la rentabilidad del diseño propuesto. De este modo, se establece una base objetiva para justificar la factibilidad económica del sistema, garantizando que la propuesta no solo cumpla con criterios técnicos de eficiencia en la reducción de contaminantes, sino que también resulte sostenible desde el punto de vista financiero. La estimación de las materias primas directas necesarias para la fabricación del difusor de burbuja fina contempla los componentes principales que lo conforman, entre ellos la membrana difusora, el cuerpo principal, la válvula antirretorno, la base de soporte, la tapa protectora y la malla o filtro interno. La finalidad de este cálculo es establecer el costo unitario de los materiales indispensables para la producción,

proporcionando una base de referencia clara que permitirá dimensionar de manera precisa los costos de fabricación y su incidencia en la estructura económica del proyecto.

Tabla 17. *Presupuesto de Materias Primas Directas*

Ítem	Unidad	Cantidad	Precio		Precio Total	
Membrana difusora	Unidad	1	S/	25,00	S/	25,00
Cuerpo principal	Unidad	1	S/	12,00	S/	12,00
válvula antirretorno	Unidad	1	S/	8,00	S/	8,00
Base o soporte	Unidad	1	S/	10,00	S/	10,00
Tapa protectora	Unidad	1	S/	5,00	S/	5,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Costo unitario MPD

Concepto	Cantidad	
Costo Total de MPD	S/	64,00
Número total de envases por lote		1
Total de costo unitario de MPD	S/	64,00

Fuente: Elaboración propia

La estimación de las inversiones tangibles considera la adquisición de equipos y herramientas necesarias para la producción y ensamblaje del difusor de burbuja fina. Dentro de este presupuesto se incluyen maquinarias como extrusoras de tubos, prensas de vulcanizado, troqueladoras, moldes metálicos, prensas de ensamblaje y equipos de seguridad, así como dispositivos auxiliares para control de calidad y empaque. Estos elementos representan la base física que permitirá llevar a cabo el proceso productivo bajo condiciones adecuadas de eficiencia y seguridad, constituyendo un componente esencial de la inversión inicial del proyecto.

Tabla 19. Presupuesto de Inversiones Tangibles

Ítem	Unidad	Cantidad	Vida útil	Precio por Unidad (S/.)	Inversión (S/.)
Extrusora de tubos/membranas	unidad	1	5 años	S/ 25,000,00	S/ 25,000,00
Prensa de vulcanizado/calor	unidad	1	5 años	S/ 3,000,00	S/ 600,00
Troqueladora/corte láser	unidad	1	5 años	S/ 15,000,00	S/ 10,000,00
Moldes metálicos	unidad	5	5 años	S/ 2,500,00	S/ 10,000,00
Prensa de ensamblaje	unidad	1	5 años	S/ 1,500,00	S/ 6,000,00
Selladora automática tipo banda	conjunto	1	4 años	S/ 800,00	S/ 3,000,00
Empacadora termoencogible	unidad	2	5 años	S/ 2,000,00	S/ 5,000,00
Equipos de seguridad (extintores, etc.)	conjunto	1	4 años	S/ 2,000,00	S/ 2,000,00
Impresora de etiquetas	unidad	7	4 años	S/ 1,500,00	S/ 7,700,00
Balanza de precisión digital	unidad	1	5 años	S/ 800,00	S/ 800,00
Mesa de inspección/embalaje	unidad	2	5 años	S/ 1,100,00	S/ 100,000,00
Total de inversión en activos tangibles					S/ 170,100,00

Fuente: Elaboración propia

El análisis de la mano de obra directa comprende la valoración del personal operativo que interviene de manera inmediata en la fabricación y ensamblaje del difusor de burbuja fina. En este cálculo se consideran los salarios correspondientes a operarios, técnicos y asistentes de línea, quienes participan directamente en las actividades de corte, moldeado, ensamblaje y control de calidad del producto. La estimación de estos costos permite determinar el requerimiento económico asociado al recurso humano indispensable para mantener la producción, así como su impacto en la estructura de costos del proyecto.

Tabla 20. *Costos de personal*

Cargos	Cantidad	Sueldo mensual	Asignación Familiar	Salario Bruto	Vacaciones	Gratificaciones	CTS	Beneficios Mensualizados	Salario Bruto + Beneficios	ESS ALU D / SIS	Costo Anual del empleador en S/.
Operarios de Producción	2	S/ 2,800,00	0	S/ 2,800,00	S/ 116,67	S/ 233,33	S/ 116,67	S/ 466,67	S/ 3,266,67	S/ 252,00	S/ 42,224,00
Técnico de producción	1	S/ 1,500,00	0	S/ 1,500,00	S/ 62,50	S/ 125,00	S/ 62,50	S/ 250,00	S/ 1,750,00	S/ 135,00	S/ 22,620,00
Total											S/ 64,844,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21. *Resumen de costos de MOD*

Concepto	Cantidad
Total de MOD	S/ 64,844,00
Demanda estimada anual al año 1	7,954
Total de costo unitario de MOD	S/ 8,15

Fuente: Elaboración propia

La mano de obra indirecta comprende al personal que, sin intervenir de manera directa en el proceso de producción del difusor de burbuja fina, cumple funciones de apoyo indispensables para el adecuado desarrollo de las operaciones. Dentro de este grupo se incluyen supervisores, encargados de mantenimiento, personal de logística y auxiliares administrativos vinculados al área productiva. La valoración de estos costos permite establecer el gasto asociado a la gestión y supervisión de las actividades fabriles, reflejando su importancia en la continuidad y eficiencia del proceso.

Tabla 22. Mano de Obra Indirecta

Cargos	Cantidad	Sueldo mensual	Asignación Familiar	Salario Bruto	Vacaciones	Gratificaciones	C TS	Beneficios Mensualizados	Salario Bruto + Beneficios	ESSA LUD	Costo Anual del empleador en S/.
Personal de limpieza	1	S/ 1,025,00	0	S/ 1,025,00	S/ 42,71	S/ 85,42	S/ 42,71	S/ 170,83	S/ 1,195,83	S/ 92,25	S/ 15,457,00
Almacanista	1	S/ 1,300,00	0	S/ 1,300,00	S/ 54,17	S/ 108,33	S/ 54,17	S/ 216,67	S/ 1,516,67	S/ 117,00	S/ 19,604,00
Personal de seguridad	1	S/ 1,025,00	0	S/ 1,025,00	S/ 42,71	S/ 85,42	S/ 42,71	S/ 170,83	S/ 1,195,83	S/ 92,25	S/ 15,457,00
Supervisor de producción	1	S/ 1,500,00	0	S/ 1,500,00	S/ 62,50	S/ 125,00	S/ 62,50	S/ 250,00	S/ 1,750,00	S/ 135,00	S/ 22,620,00
Total											S/ 73,138,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23. Mano de Obra Indirecta unitaria

Concepto	Cantidad
Total de MOI	S/ 73,138,00
Demanda estimada anual al año 1	7,954
Total de costo unitario de MOI	S/ 9,20

Fuente: Elaboración propia

El cálculo de los suministros contempla los insumos de carácter complementario necesarios para el funcionamiento continuo del proceso productivo, tales como herramientas menores, materiales de limpieza, elementos de protección personal, lubricantes y accesorios de mantenimiento. Estos recursos, aunque no forman parte directa del difusor de burbuja fina, resultan imprescindibles para garantizar la operatividad de la planta y la seguridad de los trabajadores. La estimación de su costo asegura una proyección realista de los requerimientos periódicos que acompañan a la actividad de fabricación.

Tabla 24. Mano de Obra Indirecta unitaria

Ítem	Unidad	Cantidad	Precio	Costo Total mensual	Costo Total Anual
Papel higiénico	Rollo	1	S/ 2,00	S/ 2,00	S/ 24,00
Jabón líquido	Galón	1	S/ 25,00	S/ 25,00	S/ 300,00
Alcohol desinfectante	Litro	1	S/ 7,00	S/ 7,00	S/ 84,00
Mascarillas desechables	Caja	1	S/ 25,00	S/ 25,00	S/ 300,00
Guantes de seguridad	Par	50	S/ 3,00	S/ 150,00	S/ 1,800,00
Detergente industrial	Kg	15	S/ 50,00	S/ 750,00	S/ 9,000,00
Lubricante para maquinaria	Litro	20	S/ 250,00	S/ 5,000,00	S/ 60,000,00
Luz	Kwh	1000	S/ 0,84	S/ 840,00	S/ 10,080,00
Teléfono e internet	Dbm	100	S/ 1,50	S/ 150,00	S/ 1,800,00
Agua	m ³	150	S/ 3,18	S/ 477,00	S/ 5,724,00
Total de suministros en S/				S/ 89,112,00	

Fuente: Elaboración propia

La determinación del costo unitario de las materias primas directas permite establecer el valor económico que corresponde a la fabricación de cada difusor de burbuja fina. Este cálculo resulta de dividir el total de insumos requeridos entre la cantidad proyectada de unidades a producir, lo que ofrece una medida precisa del impacto de los materiales en el costo final del producto. De esta manera, se obtiene un indicador fundamental para la estructuración de precios y para la evaluación de la rentabilidad del proyecto.

Tabla 25. Costo unitario de MPD

Concepto	Cantidad
Costo Total de Suministros	S/ 89,112,00
Número total de envases por lote	7,954
Total de costo unitario de MPD	S/ 11,20

Fuente: Elaboración propia

El presupuesto de los costos indirectos de fabricación incluye todos aquellos gastos que, sin estar asociados de manera directa a la producción de cada difusor de burbuja fina, resultan necesarios para el funcionamiento global del proceso. En este grupo se consideran conceptos como energía eléctrica, agua, mantenimiento de equipos, depreciación de maquinarias y servicios de apoyo logístico. La incorporación de estos costos en la evaluación

permite reflejar con mayor exactitud el verdadero gasto operativo de la planta y proyectar un escenario financiero más realista.

Tabla 26. *Costo unitario de MPD*

ÍTEMS	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Materia Prima Indirecta	S/ 3,976,92	S/ 4,040,55	S/ 4,105,20	S/ 4,170,89	S/ 4,237,62
Mano de Obra Indirecta	S/ 73,138,00	S/ 74,308,21	S/ 75,497,14	S/ 76,705,09	S/ 77,932,38
Suministros	S/ 89,112,00	S/ 90,537,79	S/ 91,986,40	S/ 93,458,18	S/ 94,953,51
Total	S/ 166,226,92	S/ 168,886,55	S/ 171,588,74	S/ 174,334,16	S/ 177,123,51

Fuente: Elaboración propia

El costo de ventas corresponde al valor total de los recursos empleados en la producción de los difusores de burbuja fina, integrando materias primas directas, mano de obra y costos indirectos de fabricación. Este cálculo permite determinar el costo de producción unitario y global, constituyéndose en un elemento clave para la fijación de precios y la estimación de márgenes de utilidad. Su proyección anual ofrece una visión clara del nivel de gasto requerido para sostener la operación y atender la demanda prevista.

Tabla 27. *Presupuesto de Costo de Ventas (costo de producción)*

ÍTEMS	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Materia Prima Directa	S/ 509,046,25	S/ 517,190,99	S/ 525,466,05	S/ 533,873,50	S/ 542,415,48
Mano de Obra Directa	S/ 64,844,00	S/ 65,881,50	S/ 66,935,61	S/ 68,006,58	S/ 69,094,68
Suministros	S/ 89,112,00	S/ 90,537,79	S/ 91,986,40	S/ 93,458,18	S/ 94,953,51
Total	S/ 663,002,25	S/ 673,610,29	S/ 684,388,05	S/ 695,338,26	S/ 706,463,67

Fuente: Elaboración propia

El presupuesto de personal administrativo contempla la remuneración del recurso humano encargado de las funciones de gestión, coordinación y control dentro de la organización. Este grupo incluye al personal responsable de la administración general, contabilidad, gestión de recursos humanos y apoyo en procesos logísticos y financieros. La estimación de estos costos permite dimensionar el gasto necesario para mantener una estructura

administrativa que respalde de manera eficiente el desarrollo de las actividades productivas y comerciales del proyecto.

Tabla 28. *Presupuesto de Personal Administrativo*

Personal Administrativo											
Cargos	Cantidad	Sueldo mensual	Asignación Familiar	Salario Bruto	Vacaciones	Gratificaciones	CTS	Beneficios Mensualizados	Salario Bruto + Beneficios	ESSALUD	Costo Anual del empleador en S/.
Gerente General	1	S/ 2,500,00	0	S/ 2,500,00	S/ 104,17	S/ 208,33	S/ 104,17	S/ 416,67	S/ 2,916,67	S/ 225,00	S/ 37,700,00
Contador	1	S/ 1,500,00	0	S/ 1,500,00	S/ 62,50	S/ 125,00	S/ 62,50	S/ 250,00	S/ 1,750,00	S/ 135,00	S/ 22,620,00
Jefe de recursos humanos	1	S/ 1,750,00	0	S/ 1,750,00	S/ 72,92	S/ 145,83	S/ 72,92	S/ 291,67	S/ 2,041,67	S/ 157,50	S/ 26,390,00
Asistente administrativo	1	S/ 1,025,00	0	S/ 1,025,00	S/ 42,71	S/ 85,42	S/ 42,71	S/ 170,83	S/ 1,195,83	S/ 92,25	S/ 15,457,00
Total personal administrativo											S/ 102,167,00

Fuente: Elaboración propia

Los otros gastos administrativos comprenden aquellos desembolsos adicionales que no están directamente vinculados a la producción ni a las remuneraciones del personal, pero que resultan necesarios para el funcionamiento integral de la entidad. Entre ellos se incluyen servicios básicos de oficina, material de escritorio, comunicaciones, alquileres y seguros. La proyección de estos gastos permite reflejar con mayor precisión el costo operativo administrativo total, contribuyendo a una evaluación financiera más completa del proyecto.

Tabla 29. *Presupuesto de Otros Gastos Administrativos*

Ítems	Mensual	Anual
Servicios básicos	S/ 600,00	S/ 7,200,00
Material de oficinas	S/ 100,00	S/ 1,200,00
Mantenimiento de equipos	S/ 100,00	S/ 1,200,00
Total de otros gastos de administración		S/ 9,600,00

Fuente: Elaboración propia

El presupuesto de gastos administrativos integra tanto los costos de personal como los gastos adicionales asociados a la gestión de la organización. Este cálculo considera de manera conjunta las remuneraciones del personal administrativo y los gastos complementarios, con el fin de obtener una visión consolidada del desembolso necesario para sostener las funciones de dirección, coordinación y apoyo institucional. La inclusión de este presupuesto asegura que los costos de administración sean contemplados dentro de la estructura financiera global del proyecto.

Tabla 30. *Presupuesto de Gastos Administrativos*

ÍTEMS	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Personal administrativo	S/ 102,167,00	S/ 102,167,00	S/ 102,167,00	S/ 102,167,00	S/ 102,167,00
Otros Gastos administrativos	S/ 9,600,00	S/ 9,600,00	S/ 9,600,00	S/ 9,600,00	S/ 9,600,00
Total	S/ 111,767,00	S/ 111,767,00	S/ 111,767,00	S/ 111,767,00	S/ 111,767,00

Fuente: Elaboración propia

El personal de ventas constituye el recurso humano responsable de las actividades de comercialización y promoción del producto en el mercado. Este presupuesto contempla las remuneraciones, comisiones y beneficios sociales de los trabajadores del área, con el propósito de dimensionar el gasto requerido para asegurar la colocación y distribución de los difusores en el sector objetivo.

Tabla 31. Presupuesto de Personal de Ventas

Personal de Ventas											
Cargos	Cantidad	Sueldo mensual	Asignación Familiar	Salario Bruto	Vacaciones	Gratificaciones	CTS	Beneficios Mensualizados	Salario Bruto + Beneficios	ESSA LUD	Costo Anual del empleador en S/.
Jefe de ventas	1	S/ 2,000,00	0	S/ 2,000,00	S/ 83,33	S/ 166,67	S/ 83,33	S/ 333,33	S/ 2,333,33	S/ 180,00	S/ 30,160,00
Gerente de marketing	1	S/ 2,000,00	0	S/ 2,000,00	S/ 83,33	S/ 166,67	S/ 83,33	S/ 333,33	S/ 2,333,33	S/ 180,00	S/ 30,160,00
Vendedor	1	S/ 1,200,00	0	S/ 1,200,00	S/ 50,00	S/ 100,00	S/ 50,00	S/ 200,00	S/ 1,400,00	S/ 108,00	S/ 18,096,00
Repartidor	1	S/ 1,500,00	0	S/ 1,500,00	S/ 62,50	S/ 125,00	S/ 62,50	S/ 250,00	S/ 1,750,00	S/ 135,00	S/ 22,620,00
Total personal de ventas											S/ 101,036,00

Fuente: Elaboración propia

Además de los costos de personal, las actividades de ventas demandan egresos complementarios como publicidad, viáticos, transporte, materiales de promoción y servicios de comunicación. Estos gastos son considerados en el presupuesto con el fin de proyectar de manera integral los recursos necesarios para garantizar la efectividad de la estrategia comercial.

Tabla 32. Presupuesto de Otros Gastos de Ventas

Ítems	Mensual	Anual
Servicios básicos	S/ 30,00	S/ 360,00
Material de oficinas	S/ 564,00	S/ 6,768,00
Mantenimiento de equipos	S/ 100,00	S/ 1,200,00
Total de otros gastos de ventas		S/ 8,328,00

Fuente: Elaboración propia

El presupuesto consolidado de gastos de ventas integra los costos de personal y los gastos complementarios, proporcionando una estimación global del desembolso requerido para

el funcionamiento del área comercial. Este valor resulta fundamental para determinar la estructura de costos totales del proyecto y estimar los márgenes de utilidad.

Tabla 33. *Presupuesto de Gastos de Ventas*

ÍTEMS	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Personal de ventas	S/ 101,036,00	S/ 101,036,00	S/ 101,036,00	S/ 101,036,00	S/ 101,036,00
Otros Gastos de Ventas	S/ 8,328,00	S/ 8,328,00	S/ 8,328,00	S/ 8,328,00	S/ 8,328,00
Total	S/ 109,364,00	S/ 109,364,00	S/ 109,364,00	S/ 109,364,00	S/ 109,364,00

Fuente: Elaboración propia

Los gastos operativos engloban todos aquellos costos relacionados con la gestión, producción, administración y ventas que permiten el funcionamiento integral de la organización. Este presupuesto constituye una referencia clave para el análisis financiero, al mostrar el nivel total de egresos necesarios para sostener las operaciones en un periodo determinado.

Tabla 34. *Presupuesto de Gastos Operativos*

ÍTEMS	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Gastos Administrativos	S/ 111,767,00	S/ 111,767,00	S/ 111,767,00	S/ 111,767,00	S/ 111,767,00
Gastos de ventas	S/ 109,364,00	S/ 109,364,00	S/ 109,364,00	S/ 109,364,00	S/ 109,364,00
Total	S/ 221,131,00	S/ 221,131,00	S/ 221,131,00	S/ 221,131,00	S/ 221,131,00

Fuente: Elaboración propia

El presupuesto operativo consolida en un solo esquema los ingresos proyectados y los gastos asociados al funcionamiento de la planta. De esta forma, se obtiene un panorama general del resultado esperado para cada ejercicio, lo cual facilita la evaluación de la capacidad del proyecto para generar utilidades netas en el tiempo.

Tabla 35. *Presupuesto Operativo*

ÍTEMS	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Costos de producción	S/ 663,002,25	S/ 673,610,29	S/ 684,388,05	S/ 695,338,26	S/ 706,463,67
Gastos Operativos	S/ 221,131,00	S/ 221,131,00	S/ 221,131,00	S/ 221,131,00	S/ 221,131,00
Total	S/ 884,133,25	S/ 894,741,29	S/ 905,519,05	S/ 916,469,26	S/ 927,594,67

Fuente: Elaboración propia

El capital de trabajo inicial corresponde a los recursos financieros necesarios para cubrir las operaciones durante los primeros meses de actividad. Este rubro incluye inventarios, cuentas por cobrar y efectivo disponible para garantizar la continuidad de las operaciones mientras se generan los primeros ingresos.

Tabla 36. Capital de trabajo inicial

Ítem	Inversión Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Costos de Materia Prima Directa		S/ 509,046,25	S/ 517,190,99	S/ 525,466,05	S/ 533,873,50	S/ 542,415,48
Costos de Mano de Obra Directa		S/ 64,844,00	S/ 65,881,50	S/ 66,935,61	S/ 68,006,58	S/ 69,094,68
Costos Indirectos de Fabricación		S/ 166,226,92	S/ 168,886,55	S/ 171,588,74	S/ 174,334,16	S/ 177,123,51
Gastos de Administración		S/ 111,767,00	S/ 111,767,00	S/ 111,767,00	S/ 111,767,00	S/ 111,767,00
Gastos de Ventas		S/ 109,364,00	S/ 109,364,00	S/ 109,364,00	S/ 109,364,00	S/ 109,364,00
Total desembolsable		S/ 961,248,18	S/ 973,090,05	S/ 985,121,40	S/ 997,345,24	S/ 1,009,764,67
Req. de capital de trabajo para 1 mes		S/ 80,104,01	S/ 81,090,84	S/ 82,093,45	S/ 83,112,10	S/ 84,147,06
Inversión en Capital de trabajo	S/ 80,104,01	S/ 986,82	S/ 1,002,61	S/ 1,018,65	S/ 1,034,95	
Recuperación Capital Trabajo						S/ 84,147,06

Fuente: Elaboración propia

El presupuesto de inversión reúne los montos destinados a activos tangibles, intangibles y capital de trabajo, reflejando el total de recursos económicos requeridos para la implementación del proyecto. Este valor constituye la base sobre la cual se evaluará la rentabilidad y se calcularán los indicadores financieros de la propuesta.

Tabla 37. Presupuesto de inversión

Ítem	En S/.	En %
Activo Fijo	S/ 170,100,00	62,86%
Activo Intangible	S/ 20,404,61	7,54%
Capital de trabajo	S/ 80,104,01	29,60%
Total de inversión	S/ 270,608,62	100,00%

Fuente: Elaboración propia

Las inversiones intangibles comprenden aquellos activos no físicos necesarios para la puesta en marcha del proyecto, tales como estudios de ingeniería, registros de marca, licencias, certificaciones de calidad y campañas de promoción inicial. Este presupuesto permite reconocer la importancia de los recursos inmateriales en la consolidación del proyecto y en su inserción en el mercado.

Tabla 38. *Presupuesto de Inversiones Intangibles*

Ítem	Costo Total (S/.)	Inversión año 0
Registro de marca	S/ 1,500,00	S/ 1,500,00
Certificaciones de calidad	S/ 5,000,00	S/ 5,000,00
Formación y capacitación	S/ 3,000,00	S/ 3,000,00
Campaña de marketing inicial	S/ 7,000,00	S/ 7,000,00
Gastos de formalización empresarial	S/ 3,904,61	S/ 3,904,61
Total en inversiones de activos intangibles		S/ 20,404,61

Fuente: Elaboración propia

La amortización de los intangibles refleja la distribución periódica del costo de estos activos a lo largo de su vida útil. Este cálculo permite registrar de manera progresiva su impacto en los resultados financieros del proyecto y garantizar que el gasto correspondiente se reconozca de manera ordenada en el horizonte de evaluación.

Tabla 39. *Amortización de Intangibles*

Ítem	Inversión Año 0	Tasa	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Registro de marca	S/ 1,500,00	10%	S/ 150,00	S/ 150,00	S/ 150,00	S/ 150,00	S/ 150,00
Certificaciones de calidad	S/ 5,000,00	10%	S/ 500,00	S/ 500,00	S/ 500,00	S/ 500,00	S/ 500,00
Formación y capacitación	S/ 3,000,00	10%	S/ 300,00	S/ 300,00	S/ 300,00	S/ 300,00	S/ 300,00
Campaña de marketing inicial	S/ 7,000,00	10%	S/ 700,00	S/ 700,00	S/ 700,00	S/ 700,00	S/ 700,00
Gastos de formalización empresarial	S/ 3,904,61	10%	S/ 390,46	S/ 390,46	S/ 390,46	S/ 390,46	S/ 390,46
Totales	S/ 20,404,61		S/ 2,040,46	S/ 2,040,46	S/ 2,040,46	S/ 2,040,46	S/ 2,040,46

Fuente: Elaboración propia

El estado de resultados proyectados constituye una síntesis de los ingresos, costos y utilidades esperadas en cada ejercicio económico. Esta proyección permite evaluar la rentabilidad operativa del proyecto, estimando la utilidad neta y el margen de ganancia en función de las ventas previstas y de los gastos calculados en los presupuestos anteriores.

Tabla 40. *Estado de resultados proyectados*

Estado de resultados proyectado	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ventas	S/ 1,011,082,33	S/ 1,027,259,65	S/ 1,043,695,80	S/ 1,060,394,94	S/ 1,077,361,26
Costo de ventas	S/ 663,002,25	S/ 673,610,29	S/ 684,388,05	S/ 695,338,26	S/ 706,463,67
Utilidad bruta	S/ 348,080,08	S/ 353,649,36	S/ 359,307,75	S/ 365,056,68	S/ 370,897,58
Gastos de administración	S/ 111,767,00	S/ 111,767,00	S/ 111,767,00	S/ 111,767,00	S/ 111,767,00
Gastos de venta	S/ 109,364,00	S/ 109,364,00	S/ 109,364,00	S/ 109,364,00	S/ 109,364,00
Gastos financieros	S/ 0,00	S/ 0,00	S/ 0,00	S/ 0,00	S/ 0,00
Depreciación	S/ 34,655,00	S/ 34,655,00	S/ 34,655,00	S/ 34,655,00	S/ 34,655,00
Amortización de intangibles	S/ 2,040,46	S/ 2,040,46	S/ 2,040,46	S/ 2,040,46	S/ 2,040,46
Utilidad antes de impuestos	S/ 90,253,62	S/ 95,822,90	S/ 101,481,29	S/ 107,230,21	S/ 113,071,12
Impuesto a la renta (29.5%)	S/ 26,624,82	S/ 28,267,76	S/ 29,936,98	S/ 31,632,91	S/ 33,355,98
Utilidad neta	S/ 63,628,80	S/ 67,555,15	S/ 71,544,31	S/ 75,597,30	S/ 79,715,14

Fuente: Elaboración propia

El flujo de caja proyectado muestra la evolución de los ingresos y egresos de efectivo a lo largo del horizonte de evaluación. Este instrumento financiero es clave para analizar la capacidad del proyecto de generar liquidez suficiente para cubrir los compromisos asumidos, recuperar la inversión inicial y asegurar la sostenibilidad económica.

Tabla 41. Flujo de Caja

Ingresos	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingresos de ventas		S/ 1,011,082,33	S/ 1,027,259,65	S/ 1,043,695,80	S/ 1,060,394,94	S/ 1,077,361,26
(+) Total de ingresos		S/ 1,011,082,33	S/ 1,027,259,65	S/ 1,043,695,80	S/ 1,060,394,94	S/ 1,077,361,26
Egresos						
Costos de ventas		S/ 663,002,25	S/ 673,610,29	S/ 684,388,05	S/ 695,338,26	S/ 706,463,67
(-) Sub total de egresos (costos)		S/ 663,002,25	S/ 673,610,29	S/ 684,388,05	S/ 695,338,26	S/ 706,463,67
Gastos operativos		S/ 221,131,00	S/ 221,131,00	S/ 221,131,00	S/ 221,131,00	S/ 221,131,00
Depreciación		S/ 34,655,00	S/ 34,655,00	S/ 34,655,00	S/ 34,655,00	S/ 34,655,00
Amortización de intangibles		S/ 2,040,46	S/ 2,040,46	S/ 2,040,46	S/ 2,040,46	S/ 2,040,46
(-) Sub total de egresos (gastos + provisión)		S/ 257,826,46	S/ 257,826,46	S/ 257,826,46	S/ 257,826,46	S/ 257,826,46
(-) Total de egresos (costos + gastos + provisión)		S/ 920,828,71	S/ 931,436,75	S/ 942,214,51	S/ 953,164,72	S/ 964,290,13
Utilidad antes de impuestos		S/ 90,253,62	S/ 95,822,90	S/ 101,481,29	S/ 107,230,21	S/ 113,071,12
Impuesto a la renta (29.5%)		S/ 26,624,82	S/ 28,267,76	S/ 29,936,98	S/ 31,632,91	S/ 33,355,98
UTILIDAD NETA		S/ 63,628,80	S/ 67,555,15	S/ 71,544,31	S/ 75,597,30	S/ 79,715,14
(+) Depreciación		S/ 34,655,00	S/ 34,655,00	S/ 34,655,00	S/ 34,655,00	S/ 34,655,00
(+) Amortización		S/ 2,040,46	S/ 2,040,46	S/ 2,040,46	S/ 2,040,46	S/ 2,040,46
(-) Inversión del proyecto	-S/ 270,608,62					
FLUJO DE CAJA ECONÓMICO	-S/ 270,608,62	S/ 100,324,26	S/ 104,250,61	S/ 108,239,77	S/ 112,292,76	S/ 116,410,60
(+) Préstamo	S/ 0,00					
(-) Amortización + interés		S/ 0,00	S/ 0,00	S/ 0,00	S/ 0,00	S/ 0,00
FLUJO DE CAJA FINANCIERO	-S/ 270,608,62	S/ 100,324,26	S/ 104,250,61	S/ 108,239,77	S/ 112,292,76	S/ 116,410,60

Fuente: Elaboración propia

La proyección de la demanda estima el volumen de unidades que el proyecto podrá colocar en el mercado en los próximos años. Esta estimación se fundamenta en el tamaño del mercado potencial, el mercado objetivo y la capacidad productiva de la planta, constituyendo la base para calcular los ingresos proyectados.

Tabla 42. *Cuadro de demanda proyectada*

Ítem	Unidad de Medida	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
T.C.P.	%	1,6%	1,6%	1,6%	1,6%	1,6%
Mercado Potencial	PERSONAS	30,892	31,386	31,889	32,399	32,917
Mercado Disponible	PERSONAS	29,459	29,930	30,409	30,895	31,390
Mercado Objetivo	PERSONAS	7,954	8,081	8,210	8,342	8,475
Frecuencia de Compra	# VECES AL AÑO	1	1	1	1	1
Un.compra x frecuen.	UNIDADES	1	1	1	1	1
Unidades Estimadas	UNIDADES	7,954	8,081	8,210	8,342	8,475
Valor de Venta	S/.	127,12	127,12	127,12	127,12	127,12
Ingresos Proyectados	S/.	1,011,082,33	1,027,259,65	1,043,695,80	1,060,394,94	1,077,361,26

Fuente: Elaboración propia

El cálculo del Valor Actual Neto (VAN) determina el beneficio neto que el proyecto generará en términos monetarios al traer a valor presente los flujos futuros de caja descontados a una tasa representativa del costo de oportunidad del capital. Un VAN positivo constituye un indicador de la viabilidad económica de la propuesta.

Tabla 43. VAN

Indicadores	VAN
Económico	S/ 80,140,53
Financiero	S/ 80,140,53

Fuente: Elaboración propia

La Tasa Interna de Retorno (TIR) representa el rendimiento porcentual esperado del proyecto, obtenido como la tasa de descuento que iguala el valor presente de los ingresos y egresos futuros. Este indicador es clave para comparar la rentabilidad del proyecto con la tasa mínima aceptable de retorno y con alternativas de inversión.

Tabla 44. TIR

Indicadores	TIR
Económico	27,77%
Financiero	27,77%

Fuente: Elaboración propia

El periodo de recuperación económico mide el tiempo requerido para que los ingresos netos acumulados igualen la inversión inicial realizada. Este indicador permite identificar el horizonte temporal en el cual el proyecto deja de generar pérdidas y empieza a producir beneficios netos, constituyendo una referencia clave para la toma de decisiones de inversión.

Tabla 45. Periodo de recuperación económico

Periodo de recuperación económico		
Año	Inversión	VPN
0	-S/ 270,608,62	
1	-S/ 184,122,19	S/ 86,486,43
2	-S/ 94,250,98	S/ 89,871,21
3	-S/ 940,83	S/ 93,310,15
4	S/ 95,863,27	S/ 96,804,11
5		S/ 100,353,97

Fuente: Elaboración propia

En síntesis, la evaluación económica realizada evidencia de manera integral los costos de inversión, operación y administración asociados al proyecto, así como los ingresos y beneficios proyectados en el horizonte de análisis. La integración de los presupuestos de producción, ventas y gastos con los indicadores financieros confirma que la propuesta no solo

es técnicamente viable, sino que también presenta un comportamiento favorable en términos de rentabilidad y recuperación de capital. Este resultado proporciona una base objetiva para la toma de decisiones y respalda la implementación del sistema de difusores de burbuja fina en la planta de tratamiento de aguas residuales, asegurando su sostenibilidad en el tiempo.

CAPÍTULO VIII

VIII. PRUEBAS DE HIPÓTESIS

8.1. Primera Hipótesis Específica

Planteamiento: Determinar adecuadamente los parámetros de diseño permite optimizar el aprovechamiento de oxígeno para reducir la carga orgánica en la planta de tratamiento de aguas residuales Cusco.

Validación:

Para validar el planteamiento de la primera hipótesis específica es necesario comprender que la reducción de carga orgánica en un medio aerobio, como lo es el proceso estudiado, se relaciona directamente con la el porcentaje de concentración de oxígeno que se logra alcanzar.

Por ello, se diseñó un modelo matemático basado en la ecuación de transferencia de oxígeno en medios líquidos, que relaciona condiciones de diseño (condiciones de entrada), con la salida que en este caso es la transferencia de oxígeno, de esta forma es posible analizar gráficamente como las condiciones de entrada afectan la salida. Es por ello que, con el fin de evaluar la velocidad de respuesta del modelo, este se simuló y se consideró una señal de tipo escalón unitario con un margen de error de $\pm 2\%$ para todas las pruebas.

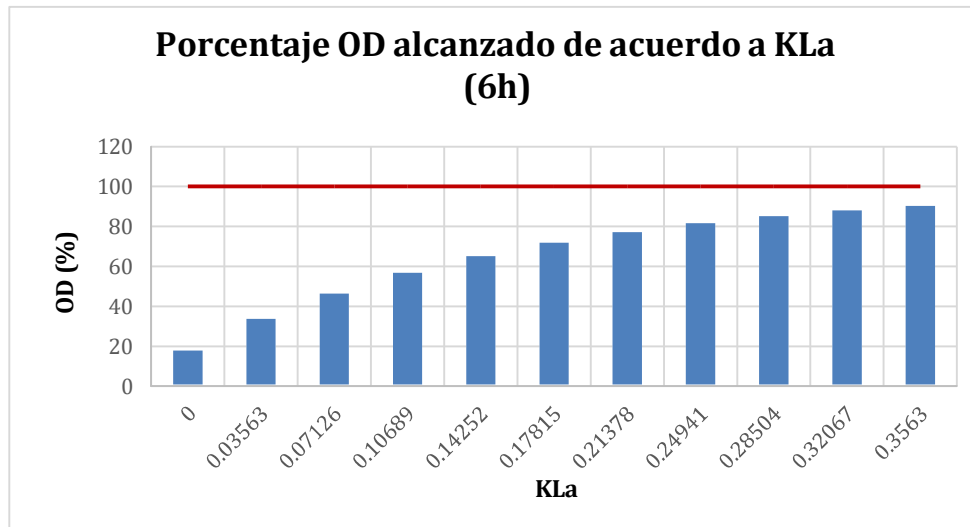


Figura 19. Porcentaje de OD (%) alcanzado de acuerdo al valor de diseño (KLa). Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, se realizó una prueba de normalidad a los valores obtenidos en la cual se obtuvo una significancia de 0.234 lo que indica que poseen una distribución paramétrica, luego, al realizar una revisión emparejada se obtuvo un valor de significancia de 0.001 lo que indica que existe una relación entre los parámetros de diseño y el aprovechamiento de oxígeno, de forma tal que, si se escogen parámetros adecuados, se optimizara el aprovechamiento de oxígeno. De esta manera es posible validar y aceptar el planteamiento de la primera hipótesis específica.

8.2. Segunda Hipótesis Específica

Planteamiento: Las características geométricas del difusor de burbuja fina influyen significativamente en la concentración de oxigenación del sistema de tratamiento de aguas residuales Cusco.

Validación:

Para validar esta hipótesis se realiza el cálculo de concentración teórica de oxígeno sin consumo biológico en el reactor. Se considera una presión de ingreso fijo ($P_1=60\text{KPa}$), un

coeficiente de perdida alto para todos los casos ($k=0.6$) y en base a ello, haciendo uso de la ecuación 15 se estima la presión de salida (P_2), para diversas medidas de D_2 , con lo que se calcula el valor del coeficiente de transferencia de oxígeno.

Tabla 46. Resultados de parámetros hidráulicos y transferencia

D1 (m)	D2 (m)	K_tot	v1 (m/s)	v2 (m/s)	P1 (KPa)	P2 (KPa)	Kla
0.1016	0.022	0.6	0.3700	7.8920	60	6.76	0.2302
0.1016	0.0254	0.6	0.3700	5.9206	60	30.07	0.3103
0.1016	0.0508	0.6	0.3700	1.4801	60	58.20	0.3541

Fuente: Elaboración propia

Teniendo el valor del coeficiente de transferencia de oxígeno para cada caso, se calcula la concentración de oxígeno que proporciona cada diseño, teniendo como limite la máxima concentración de oxígeno en el medio, y la restricción de diámetros de la condición Venturi $D_2 < D_1$. Como se observa, la variación de diámetros en la garganta Venturi genera variación en la concentración de oxígeno en el medio.

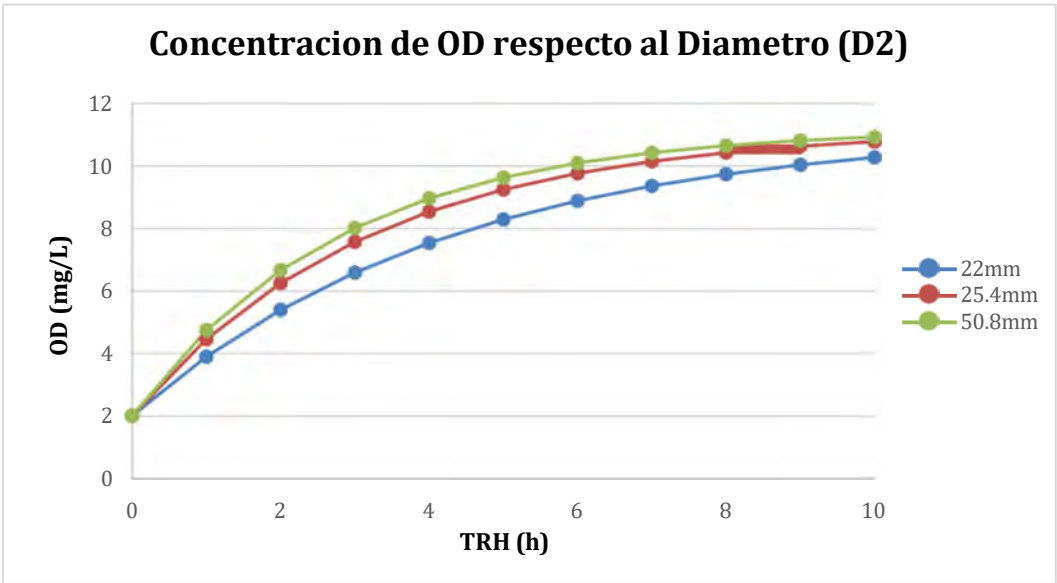


Figura 20. Diagrama TRH. Fuente: elaboración propia.

En cuanto al análisis cuantitativo, se realizó la prueba de distribución a los datos obteniendo una significancia característica de data paramétrica, de igual manera tras realizar

la comparación emparejada de datos geométricos y su relación con la concentración de oxígeno, se obtuvo un valor de significancia inferior a 0.05 lo que permite afirmar que existe una relación causal entre la geometría del difusor y la concentración de oxígeno en el sistema. Tras este análisis, es posible establecer la aceptación de la segunda hipótesis específica.

8.3. Tercera Hipótesis Específica

Planteamiento: La validación del funcionamiento del difusor de burbuja fina permite reducir los valores de concentración de DQO, DBO y SST en la planta de tratamiento de aguas residuales Cusco.

Validación:

En la tabla 44 se presentan los valores históricos (2023) y los valores simulados bajo las condiciones del diseño propuesto. Se observa que, para los tres indicadores (DBO, DQO y SST), las concentraciones finales simuladas son menores que las históricas, evidenciando un incremento en la eficiencia de remoción.

Tabla 47. *Indicadores de calidad del agua 2023*

Indicador	Valor de entrada	Valor de salida	Valor final simulado	Mejora porcentual
DBO [mg/L]	473,52	28,7	20,62	28,15%
DQO [mg/L]	755,50	134,9	103,40	23,35%
SST [ml/L]	375,21	49,58	32,58	34,28%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 48. *Eficiencia de indicadores de calidad del agua 2023*

Indicador	Valor inicial	Valor de salida	Valor final simulado	Eficiencia Histórica (nh)	Eficiencia Simulada (ns)	Mejora absoluta (pp)	Mejora relativa
DBO [mg/L]	473,52	28,7	20,62	94%	96%	1,71	1,82%
DQO [mg/L]	755,50	134,9	103,40	82%	86%	4,17	5,08%
SST [ml/L]	375,21	49,58	32,58	87%	91%	4,53	5,22%

Fuente: Elaboración propia

Los valores presentados permiten comparar los resultados históricos con los obtenidos en la simulación. La mejora porcentual expresa la reducción relativa alcanzada en la concentración de contaminantes (DBO, DQO y SST) respecto al valor inicial, mostrando cuánto disminuyó cada parámetro en términos porcentuales. La eficiencia histórica (nh) corresponde al rendimiento logrado por el sistema en condiciones reales de operación, calculado a partir de la relación entre la concentración inicial y el valor final histórico. La eficiencia simulada (ns) refleja el rendimiento estimado bajo condiciones modeladas o mejoradas, representando el potencial de la planta frente a un escenario optimizado. La mejora absoluta (pp) se mide en puntos porcentuales, y muestra la diferencia directa entre la eficiencia histórica y la eficiencia simulada. Finalmente, la mejora relativa cuantifica el incremento porcentual de eficiencia entre ambos escenarios, permitiendo dimensionar en qué grado la simulación supera el desempeño observado en la operación histórica.

La comparación entre datos simulados y datos históricos en los tres indicadores confirma que los valores proyectados, en general, son mejores que los presentados en la data histórica. Por ello, se acepta la tercera hipótesis planteada.

En cuanto a la prueba estadística, para el valor del efluente del DBO se obtuvo una significancia de 0.102, y al realizar el análisis por paridad en t-student, arrojo una significancia de 0.032. En cuanto al indicador DQO, se obtuvo una significancia en la prueba de normalidad igual a 0.091, y al realizar el análisis de emparejamiento, un valor de 0.05. Por último, para el indicador SST del efluente se obtuvo una significancia de 0.068, y al realizar el análisis para muestras relacionadas, una significancia de 0.002. De esta manera se comprueba que teóricamente, el diseño propuesto reduce la concentración de indicadores en la planta, validando así la tercera hipótesis específica.

8.4. Cuarta Hipótesis Específica

Planteamiento: La fabricación del diseño de un difusor de burbuja fina resulta rentable, dado que los indicadores económicos proyectados son positivos y superiores a los valores mínimos requeridos para justificar la inversión.

Validación:

Los resultados de la evaluación indican que el VAN es S/ 80.140,53 y la TIR asciende a 27,77 %. El flujo descontado acumulado (VPN) evoluciona de S/ 0,00 (año 0) a S/ 86.486,43 (año 1), S/ 89.871,21 (año 2), S/ 93.310,15 (año 3), S/ 96.804,11 (año 4) y S/ 100.353,97 (año 5). Con esta trayectoria, la recuperación descontada se produce antes de completar el primer año del horizonte analizado.

Dado que el VAN es positivo, la TIR supera el umbral mínimo implícito en la tasa de descuento empleada y el periodo de recuperación descontado es < 1 año, los tres criterios de decisión convergen en el mismo sentido. En consecuencia, se acepta la hipótesis específica bajo los resultados de la evaluación económica realizada.

8.5. Hipótesis General

Planteamiento: El diseño de un difusor de burbuja fina contribuye significativamente a la reducción de la carga orgánica en la planta de tratamiento de aguas residuales Cusco.

Validación:

Al realizar un análisis cuantitativo de los indicadores esperados es posible establecer que ajustar el diseño de un difusor a las condiciones de operación de la planta permite que exista una mejor concentración de oxígeno en el reactor, lo que ocasiona que todos los indicadores (DBO, DQO, SST) muestran una mejora significativa tanto en eficiencia como en valor absoluto, en comparación con la línea base histórica, lo que implica mejor eficiencia de

remoción de carga orgánica en la planta, validando así la hipótesis general del trabajo de investigación.

CAPÍTULO IX

IX. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

9.1. Presentación de resultados

El presente apartado sintetiza los resultados obtenidos durante el proceso de diseño del difusor de burbuja fina propuesto, integrando la determinación de parámetros operativos, la estimación del coeficiente global de transferencia de oxígeno (K_La), la selección de materiales, la definición geométrica, la configuración de orificios, los requerimientos mecánicos y el resumen comparativo de resultados técnicos y financieros. Asimismo, se presenta la validación comparativa de las eficiencias de remoción de carga orgánica obtenidas mediante simulación frente a los valores históricos de operación

En el esquema integral de la PTAR San Jerónimo, los difusores de burbuja fina se incorporarían en la etapa de tratamiento secundario, específicamente dentro del reactor biológico donde ocurre el proceso de aireación como se observa en la figura 17. Esta ubicación garantiza que el oxígeno se transfiera de manera eficiente al líquido en mezcla, favoreciendo la actividad metabólica de los microorganismos encargados de degradar la materia orgánica. Los difusores se instalan en la parte inferior del tanque, cubriendo homogéneamente la superficie mediante una disposición en malla, lo que permite la generación uniforme de burbujas finas y la optimización de la transferencia de oxígeno. La Figura 17 muestra la distribución propuesta de los difusores en el fondo del reactor, evidenciando su capacidad de cubrir toda el área activa del proceso biológico y reforzar la homogeneidad en la oxigenación del sistema.

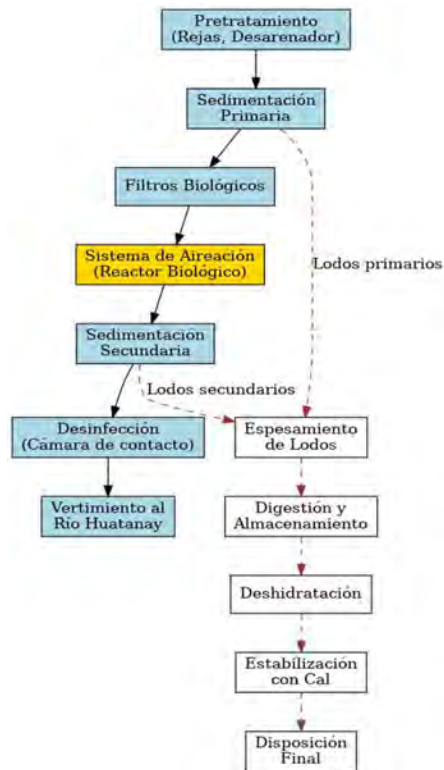


Figura 21. Flujo de funcionamiento de la PTAR con la incorporación del Sistema de Aireación. Fuente: elaboración propia.

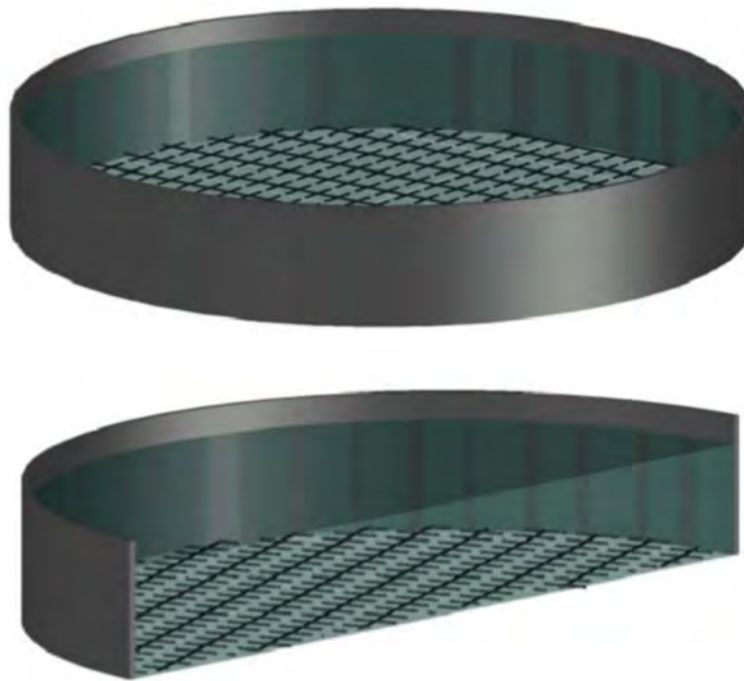


Figura 22. Referencia ilustrativa de la disposición de los difusores en el reactor. Fuente: elaboración propia.

El diseño propuesto hace uso de un modelo matemático que permite calcular y simular la eficiencia del coeficiente de transferencia de oxígeno (K_La), que se obtiene en base a condiciones de diseño establecidas y es único para cada combinación de parámetros. Dichos parámetros de diseño se calcularon en base a condiciones apegadas a la realidad de la PTAR considerando la altura de la ciudad de San Jerónimo, la profundidad de operación y las recomendaciones de fabricantes de productos similares, en ese sentido, se estableció un caudal de operación igual a 3 L/s, un valor de presión de trabajo igual a 60Kpa, un diámetro de orificio igual a 0.5mm (que garantiza la expulsión de burbujas finas), y una temperatura de trabajo de 18°C que se obtuvo de la data histórica manejada, considerando además una flexibilidad de $\pm 2^\circ\text{C}$ de variación de temperatura que no afecta al funcionamiento del sistema.

El valor de K_La que se obtuvo fue de 0.3563 h^{-1} , que se encuentra dentro del rango recomendado para sistemas de difusión de burbuja fina en reactores de mezcla completa según reportes técnicos (ASCE, 1997). Por su consistencia con la literatura y con los objetivos de oxigenación definidos, se adopta este valor como referencia para el diseño.

La selección de materiales para el difusor se basó en la resistencia a la corrosión, el pH promedio del afluente (8.01 ± 0.38), la resistencia mecánica y la durabilidad en operación continua. De esa forma, se estableció que para el cuerpo el material sugerido es Policloruro de vinilo no plastificado (PVC-U) debido a que presenta alta resistencia química, baja rugosidad interna, facilidad de fabricación y costo reducido. En cuanto al material de la membrana, lo ideal es usar EPDM (Etileno-propileno-dieno monómero) pues presenta excelente resistencia a la hidrólisis y al ataque químico, estabilidad en rangos amplios de pH y alta elasticidad para apertura controlada de orificios.

Para la selección adecuada de la geometría del difusor se evaluaron tres variaciones del diámetro de garganta (D_2) bajo condiciones de pérdida altas, considerando un D_1 fijo

correspondiente al diámetro nominal del tubo de alimentación. La configuración seleccionada corresponde al $D_2 = 50.8\text{mm}$ que, según las pruebas de la tabla 10 garantiza $P=60\text{KPa}$ en la descarga con mínima pérdida de carga, optimizando el uso del aire suministrado. A su vez, el tipo de difusor adoptado es tubular, dada su mayor eficiencia en la distribución homogénea del aire y su compatibilidad con la sección Venturi diseñada, la cual incrementa la velocidad local y favorece la dispersión de burbujas finas.

En cuanto a las recomendaciones geométricas adoptadas para el diseño del difusor, estas se sustentan en la literatura técnica especializada en mecánica de fluidos y en manuales de diseño de toberas y difusores, basadas en estudios experimentales y modelaciones que buscan maximizar la eficiencia hidráulica y minimizar las pérdidas por fricción y separación de flujo.

En la sección convergente, se recomienda un medio ángulo comprendido entre 18° y 22° , lo que corresponde a un ángulo total de 36° – 44° . Este rango ha demostrado favorecer la aceleración del flujo sin inducir turbulencias excesivas ni separación prematura antes de la garganta (Pritchard, 2011). En cuanto a las longitudes relativas de cada sección, se adoptaron valores referenciales de $L_g \approx 1-2D_2$ para la garganta, y $L_d \approx 6-10D_2$ para el expansor, obteniendo un valor longitudinal total de 0.7m. En cuanto al número de orificios y espesor de pared, de acuerdo a los valores calculados en las ecuaciones 16 y 18 se consideró un valor de 240 orificios y 3mm por difusor respectivamente. Estas proporciones permiten equilibrar la aceleración, el control de flujo en la garganta y la recuperación de presión a la salida, optimizando así el rendimiento global del dispositivo.

En cuanto a la comparación entre el desempeño histórico de la planta y los valores obtenidos (mediante la simulación del diseño propuesto en el modelo matemático que se plantea en el capítulo VI), se observa una mejora consistente en los tres indicadores de calidad

evaluados. Para la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la eficiencia de remoción se incrementó del 94% registrado históricamente al 96% proyectado en la simulación, lo que representa una mejora absoluta de 1.71 puntos porcentuales y una mejora relativa del 1.82 %. En el caso de la demanda química de oxígeno (DQO), el aumento fue de 82 % a 86 %, equivalente a una mejora absoluta de 4.17 puntos porcentuales y una relativa del 5.08 %. Finalmente, para los sólidos suspendidos totales (SST), el rendimiento pasó de 87 % a 91 %, con una mejora absoluta de 4.53 puntos porcentuales y relativa del 5.22 %. Estos resultados confirman que el diseño propuesto contribuye a la reducción de carga orgánica, optimiza la eficiencia de oxigenación y permite predecir con precisión las concentraciones de salida de DBO, DQO y SST en la planta.

Tabla 49. *Remoción promedio de indicadores.*

Indicador	Afluente	Efluente		
	Ingreso	Actual	Simulado (Ec. 19)	LMP
DBO [mg/L]	473,52	28,7	20,62	100,00
DQO [mg/L]	755,49	134,9	109,29	200,00
SST [ml/L]	375,2	49,5833	32,58	150,00

Fuente: Elaboración propia

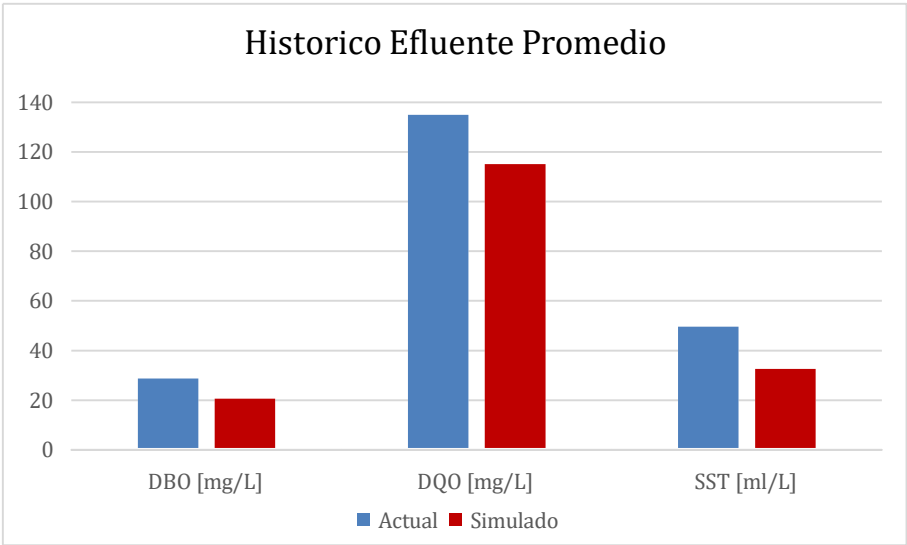


Figura 23. *Gráfico de la remoción promedio de indicadores. Fuente: elaboración propia.*

Tabla 50. *Remoción de indicador SST*

Periodo	Afluente	Efluente	
	Ingreso	Actual [ml/L]	Simulado (Ec. 19) [ml/L]
Enero	390	44	33,87
Febrero	382,5	50	33,22
Marzo	267,5	41	23,23
Abril	367,5	34	31,91
Mayo	355	44	30,83
Junio	392,5	71	34,09
Julio	482,5	44	41,90
Agosto	425	52,5	36,91
Setiembre	432,5	80,5	37,56
Octubre	360	67	31,26
Noviembre	302,5	29	26,27
Diciembre	345	38	29,96
LMP 150			

Fuente: Elaboración propia

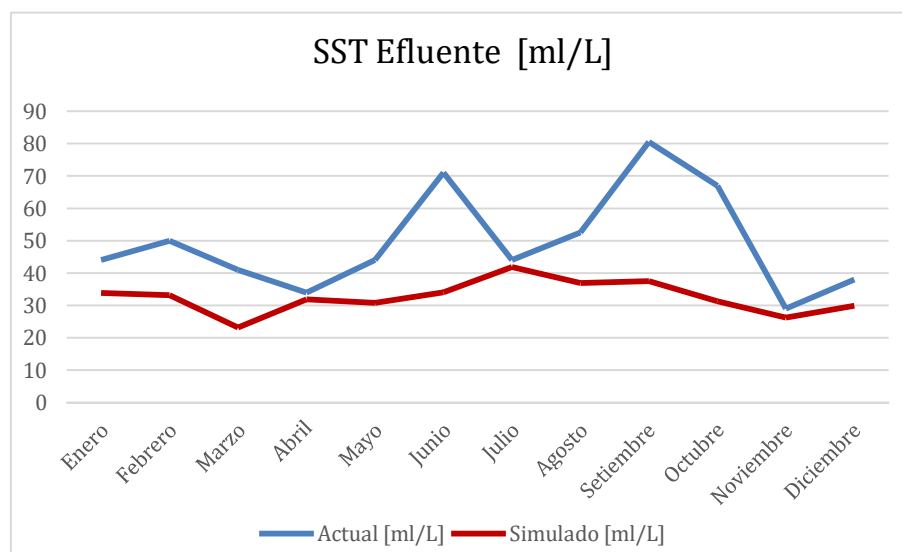


Figura 24. Grafica de la remoción de indicador SST. Fuente: elaboración propia.

Tabla 51. Remoción de indicador DBO

Periodo	Afluente	Efluente	
	Ingreso	Actual [mg/L]	Simulado (Ec. 19) [mg/L]
Enero	456,93	25,5	19,90
Febrero	432,4	21,1	18,83
Marzo	563,6	23,5	24,55
Abril	467,8	15,8	20,37
Mayo	349,98	16,7	15,24
Junio	474,8	39,1	20,68

Julio	541,7	23,8	23,59
Agosto	535,7	29,9	23,33
Setiembre	510,57	53,4	22,24
Octubre	566,9	45,6	24,69
Noviembre	439,2	37,7	19,13
Diciembre	342,7	12,3	14,92
LMP 100			

Fuente: Elaboración propia

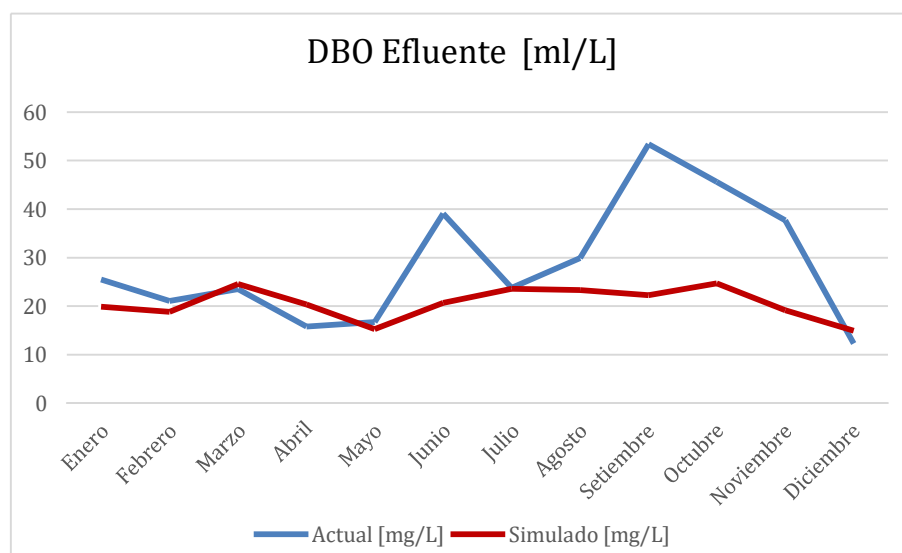


Figura 25. Grafica de la remoción de indicador DBO. Fuente: elaboración propia.

Tabla 52. Remoción de indicador DQO

Periodo	Afluente	Efluente	
	Ingreso	Actual [mg/L]	Simulado (Ec. 19) [mg/L]
Enero	707,2	96	96,82
Febrero	790,4	92,8	108,13
Marzo	787,3	86,1	107,74
Abril	666,9	89,8	91,30
Mayo	626,51	112,5	85,67
Junio	704,4	167,1	96,43
Julio	707,2	137,6	96,82
Agosto	911,6	153	124,74
Setiembre	878,24	271,5	120,23
Octubre	878,2	198	120,22
Noviembre	774,4	137,6	106,02
Diciembre	633,6	76,8	86,67
LMP 200			

Fuente: Elaboración propia

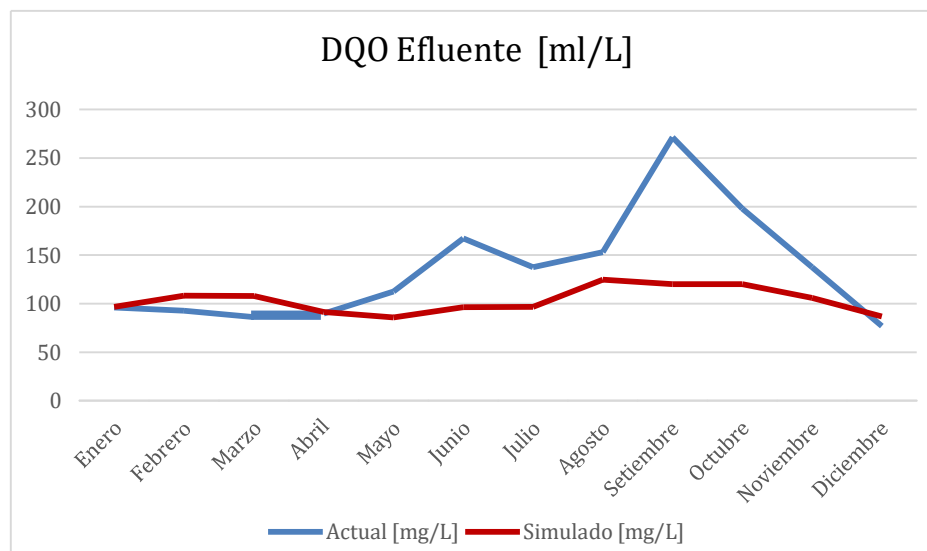


Figura 26. Grafica de la remoción de indicador DQO. Fuente: elaboración propia.

En complemento al análisis técnico, la evaluación económica del sistema de difusores de burbuja fina demostró que la propuesta es financieramente viable. Los resultados del presupuesto y proyecciones financieras mostraron un Valor Actual Neto (VAN) positivo, una Tasa Interna de Retorno (TIR) superior al costo de oportunidad y un periodo de recuperación de la inversión inferior a cinco años. Estos indicadores reflejan que la implementación del diseño no solo mejora la eficiencia de remoción de contaminantes, sino que también representa una alternativa sostenible desde la perspectiva económica, al optimizar los costos operativos relacionados con el consumo energético en aireación y asegurar la recuperación del capital en un plazo razonable.

9.2. Discusión con antecedentes de estudio

La comparación con antecedentes internacionales permite contextualizar los resultados alcanzados en este estudio. En el trabajo de Sánchez y Román (2020), la propuesta de diseño de una planta de tratamiento industrial incorporó un esquema completo de procesos fisicoquímicos, entre ellos coagulación, floculación y un sistema prolongado de aireación, logrando con ello una reducción de la carga orgánica expresada en valores de DBO5 de 57,02

mg O₂/L y de DQO de 188,03 mg O₂/L. En contraste, en la presente investigación se centró exclusivamente en el impacto del proceso de aireación a través del diseño de un difusor de burbuja fina adaptado a las condiciones de la planta, alcanzando valores simulados de DBO de 20,62 mg/L y DQO de 103,4 mg/L. Esta diferencia sugiere que focalizar el diseño en la optimización del sistema de aireación puede generar resultados más eficientes en términos de remoción de carga orgánica, confirmando la relevancia de un dispositivo adecuado a las características de la planta de tratamiento.

En el estudio de Torres (2024), orientado al diseño de una unidad de tratamiento doméstico, se alcanzó una eficiencia de remoción de contaminantes del 83% mediante la implementación de un reactor biológico y un sedimentador secundario, con un costo estimado de 86 050 USD, considerado viable para su ejecución. En el caso de la presente investigación, la eficiencia de remoción del DBO alcanzó un 88%, superando los resultados reportados por dicho antecedente. Asimismo, debe señalarse que, en los sistemas de aireación, el gasto operativo representa uno de los rubros más significativos, con estimaciones de alrededor del 57% del costo total de operación de una PTAR. A partir de los resultados de la evaluación financiera, se comprobó que el sistema diseñado no solo cumple con los Límites Máximos Permisibles (LMP), sino que también presenta un balance económico favorable en términos de recuperación de la inversión y sostenibilidad operativa. En consecuencia, si bien ambos trabajos coinciden en lograr un cumplimiento normativo, el diseño propuesto en este estudio ofrece una mayor eficiencia en la reducción de contaminantes, junto con un respaldo financiero más sólido.

Por su parte, Tsave et al. (2021) desarrollaron un dispositivo híbrido que combinaba burbujas convencionales y microburbujas generadas por electrólisis para optimizar la flotación de partículas finas, demostrando que el tamaño reducido de las burbujas aumenta la eficacia

del proceso. En la investigación actual se retoma este principio, dado que se reconoció que burbujas más pequeñas incrementan la superficie de contacto gas-líquido y mejoran la transferencia de oxígeno. En este caso, se consideró un rango de diámetros entre 2 y 5 mm, estableciéndose finalmente un orificio de 0,5 mm en el difusor, con lo cual se obtuvo una burbuja de aproximadamente 2 mm. La coincidencia entre ambos estudios ratifica que el diseño de microburbujas constituye una estrategia determinante para la mejora en la oxigenación y la reducción de la carga orgánica.

De manera similar, Lim et al. (2023) evaluaron diferentes diseños de spargers en fotobiorreactores, comprobando que los modelos personalizados ofrecían mayor eficiencia en la generación de burbujas de microtamaño y en la mezcla de fluidos, aunque reconocieron la importancia de alternativas comerciales más asequibles para contextos con limitaciones económicas. La presente investigación también concluye que la adaptación del diseño del difusor a las condiciones específicas de la planta es fundamental para mejorar la remoción de contaminantes. Al considerar un difusor tubular con parámetros geométricos optimizados, se obtuvo un desempeño superior en la oxigenación. En el plano económico, la evaluación financiera mostró un VAN positivo y un periodo de recuperación menor a cinco años, lo cual refuerza la conclusión de que, además del diseño técnico, la rentabilidad constituye un criterio decisivo para garantizar la aplicabilidad de la solución en contextos reales.

Finalmente, el estudio de Chen et al. (2022) utilizó modelos de simulación Euleriano-Lagrangiano para evaluar la mezcla en reactores de burbujas, considerando variables como tamaño de burbuja, caudal de gas y disposición de difusores. En la investigación actual se empleó un enfoque similar de modelación matemática, a través de la formulación de una función de transferencia derivada por transformadas de Laplace, la cual fue validada mediante simulaciones en MATLAB. Además de los factores mencionados en el antecedente, se

incorporaron parámetros adicionales como presión de operación y temperatura. Tanto en el antecedente como en este trabajo, se reconoce que aumentar el caudal no es necesariamente la medida más eficiente, sino que la correcta distribución de los difusores y la densidad instalada resultan determinantes para maximizar el rendimiento del sistema. En este caso, se adoptó una densidad de difusores equivalente al 5% del área del reactor, valor dentro de lo recomendado por fabricantes especializados. La coincidencia en las metodologías de simulación y en los factores operativos evaluados confirma la validez del enfoque adoptado y fortalece los resultados alcanzados.

En el ámbito nacional, los estudios previos también ofrecen referencias valiosas para analizar y contrastar los resultados obtenidos en el presente trabajo. Omonte y Romero (2020) evaluaron cómo el tipo de difusor (burbuja fina y burbuja gruesa) y la profundidad de inmersión inciden en la transferencia de oxígeno en procesos de aireación de aguas residuales domésticas. Su estudio mostró que el diseño del difusor tiene un impacto determinante, alcanzando valores de coeficiente de transferencia KLa entre 0,21 y 0,24 min^{-1} para difusores de burbuja fina, mientras que los difusores de burbuja gruesa alcanzaron solo entre 0,046 y 0,049 min^{-1} . En el presente trabajo, se reconoció igualmente que la altura del reactor influye en la elección y geometría del difusor, y se obtuvo un KLa de 0,3563, valor que se encuentra dentro del rango esperado considerando que la eficiencia de transferencia tiende a aumentar con la profundidad de inmersión. Los resultados coinciden en que, aunque el incremento de profundidad no guarda proporcionalidad estricta con el aumento del KLa , sí mejora el rendimiento del proceso, confirmando que el uso de difusores de burbuja fina a mayores profundidades constituye una estrategia clave para incrementar la eficiencia de la remoción orgánica.

En el caso del trabajo de Lozano (2020), se analizó la influencia de tres tipos de emisores de aireación microburbujas, burbujas medianas y burbujas grandes en la eficiencia

de transferencia de oxígeno en aguas residuales domésticas de Huancayo. El autor concluyó que los sistemas de aireación de burbujas finas alcanzaban la mayor eficiencia, con un valor promedio de 0,79769%. Estos hallazgos se tomaron como referencia en la presente investigación para fundamentar la elección de un difusor de burbuja fina como el más adecuado a las condiciones de la planta de tratamiento de San Jerónimo. Adicionalmente, se evaluó que un diseño personalizado podría superar la eficiencia de modelos comerciales; en efecto, los resultados de la simulación mostraron que el difusor tubular propuesto alcanzó una eficiencia teórica de hasta 0,9031, dependiendo del tiempo de retención hidráulica, en pruebas sin consumo biológico. Esto confirma que la personalización del diseño de los difusores de burbuja fina puede generar rendimientos superiores a los estándares reportados en estudios comparativos, fortaleciendo la pertinencia del presente diseño.

Por otro lado, Alfaro y Nina (2022) desarrollaron el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales para la comunidad de Llaspay, en Paruro, Cusco, con base en una caracterización fisicoquímica y microbiológica de los efluentes. Su propuesta se ajustó a los criterios de la Directriz Técnica O.S. 090 y representó una inversión total de S/. 699,917,39, incluyendo costos directos e indirectos. En el presente estudio, de manera similar, se trabajó con datos históricos de la planta de San Jerónimo como base de calibración del modelo matemático. En cuanto a la evaluación económica, el presupuesto estimado para la implementación del sistema de aireación propuesto es considerablemente menor, lo que demuestra que un diseño específico para la optimización de la aireación puede representar un ahorro significativo sin sacrificar el cumplimiento normativo ni la eficiencia de remoción de contaminantes.

Asimismo, el trabajo de Díaz y Gamboa (2021) en Cajamarca evaluó la eficacia de los difusores de burbuja fina frente a los de burbuja gruesa en la reducción de materia orgánica de

aguas residuales domésticas. Utilizando un enfoque experimental con reactores biológicos equipados con difusores de 3" y 9", encontraron que los de burbuja fina alcanzaron una remoción del 88,31%, frente al 79,75% de los de burbuja gruesa. En la presente investigación, si bien el enfoque fue teórico y de simulación, se corroboró que el difusor tubular de burbuja fina diseñado también permite alcanzar eficiencias de remoción cercanas al 88%, validando la superioridad de este tipo de tecnología frente a alternativas de mayor tamaño de burbuja. La diferencia adicional radica en el tipo de diseño adoptado: mientras que Díaz y Gamboa usaron difusores circulares de diámetro fijo, en este caso se propuso un difusor tubular de 27" de longitud, lo que amplía las posibilidades de adaptación a distintos volúmenes de reactor y configuraciones hidráulicas.

Finalmente, Veleriano (2023) analizó la eficiencia global de la planta de tratamiento de Yunguyo-Puno, reportando un valor del 79,66% en la remoción de contaminantes, con eficiencias destacadas en sólidos suspendidos (98,8%), aunque con deficiencias notorias en el tratamiento microbiológico, especialmente en coliformes termorresistentes, cuya remoción alcanzó apenas un 42,5%. En el presente trabajo se consideraron como principales indicadores de desempeño la DBO, la DQO y los sólidos suspendidos totales (SST), alcanzando una eficiencia teórica de 88% en la remoción de carga orgánica. Esta diferencia muestra que, aun cuando el estudio de Yunguyo evidencia un funcionamiento aceptable, la optimización de un sistema de aireación mediante un diseño adecuado de difusores permite mejorar los indicadores críticos de calidad del efluente, reforzando el cumplimiento de los Límites Máximos Permisibles establecidos en la normativa peruana.

En síntesis, la discusión con antecedentes internacionales y nacionales permite establecer que la eficiencia en los sistemas de aireación está determinada por la interacción de factores geométricos, hidráulicos y operativos, los cuales deben ser ajustados a las

características específicas de cada planta. Mientras que los estudios internacionales enfatizan la importancia del tamaño de burbuja y la adaptación geométrica de los difusores al reactor, los trabajos nacionales destacan la influencia del tipo de difusor y la profundidad de inmersión en el incremento del coeficiente de transferencia de oxígeno. La presente investigación integra ambos enfoques, proponiendo un diseño optimizado de difusor tubular de burbuja fina que no solo responde a las condiciones técnicas de la PTAR San Jerónimo, sino que también incorpora herramientas de simulación matemática para validar su desempeño y análisis económico para asegurar su viabilidad. Con ello, se consolida una propuesta que aporta evidencia teórica y práctica de que un diseño ajustado a las condiciones locales puede superar los rendimientos reportados en estudios previos, constituyéndose en un aporte significativo al tratamiento de aguas residuales en el contexto peruano.

CONCLUSIONES

El diseño del difusor de burbuja fina desarrollado en esta investigación cumplió con el objetivo general de contribuir a la reducción de la carga orgánica en la planta de tratamiento de aguas residuales San Jerónimo. A partir de la formulación de un modelo matemático basado en la función de transferencia y su posterior simulación, fue posible demostrar que el dispositivo diseñado permite mejorar los resultados en comparación con el desempeño histórico de la planta. Los valores proyectados alcanzaron una eficiencia de remoción del 96 % para la DBO, 86 % para la DQO y 91 % para los SST, lo que se traduce en mejoras absolutas entre 1.71 y 4.53 puntos porcentuales. Estos resultados confirman que la incorporación de un diseño ajustado a las condiciones reales de la planta genera beneficios operativos en términos de depuración.

Respecto al primer objetivo específico, se identificaron los parámetros de operación más adecuados para garantizar la eficiencia del difusor de burbuja fina. Se definió un caudal de operación de 3 L/s, una presión de trabajo de 60 kPa, un diámetro de orificio de 0.5 mm y una temperatura de trabajo de 18 °C con una tolerancia de ± 2 °C. Con estas condiciones, se calculó un coeficiente global de transferencia de oxígeno (KLa) de 0.3563 h^{-1} , valor que se encuentra dentro de los rangos reportados en literatura técnica especializada para sistemas de difusión de burbuja fina en reactores de mezcla completa. La definición de estos parámetros se sustenta en datos históricos de la planta y en referencias técnicas, lo que asegura que su aplicación sea representativa de la realidad operativa de la PTAR San Jerónimo.

En relación con el segundo objetivo específico, se evaluó la influencia de las características geométricas del difusor en la eficiencia del proceso de aireación. La configuración seleccionada corresponde a un diseño tubular con sección Venturi, lo que permite aprovechar el aumento de velocidad en la garganta para favorecer la dispersión de

burbujas finas. Se adoptaron parámetros geométricos recomendados en literatura: un medio ángulo de 18° – 22° en la sección convergente, un medio ángulo de 5° – 7° en el difusor expensor y longitudes relativas de $Lg \approx 1-2D_2$ y $Ld \approx 6-10D_2$, obteniéndose una longitud total de 0.7 m. Con esta configuración, y con un diámetro de garganta de 50.8 mm, se garantizó la presión de operación establecida y la generación de burbujas de aproximadamente 2 mm de diámetro. Los resultados de simulación confirmaron que esta geometría favorece la distribución homogénea del aire y mejora la eficiencia de transferencia de oxígeno.

En relación con el tercer objetivo específico, la validación del diseño frente a los indicadores de calidad del efluente permitió comparar los resultados simulados con los datos históricos de la planta. Las eficiencias de remoción proyectadas fueron mayores en los tres parámetros evaluados: DBO, DQO y SST. Esto evidencia que el diseño propuesto no solo cumple con los Límites Máximos Permisibles establecidos en la normativa vigente, sino que además aporta una herramienta práctica para predecir con mayor precisión el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de operación.

Finalmente, el análisis económico realizado complementa la validación técnica del diseño. Los resultados mostraron que la implementación del sistema de aireación con difusores de burbuja fina en la PTAR San Jerónimo representa una alternativa viable desde el punto de vista financiero. El proyecto presenta un Valor Actual Neto (VAN) positivo, una Tasa Interna de Retorno (TIR) superior al costo de oportunidad y un periodo de recuperación de la inversión menor a cinco años. Estos indicadores financieros, junto con la mejora técnica demostrada, confirman que la propuesta es factible de ser implementada, contribuyendo tanto a la optimización del proceso de aireación como a la sostenibilidad económica de la planta.

RECOMENDACIONES

Se recomienda implementar un plan piloto utilizando el difusor diseñado en un módulo específico de la planta de San Jerónimo, de modo que se puedan registrar datos experimentales bajo condiciones reales de operación. Este piloto permitirá validar los resultados obtenidos en las simulaciones y realizar ajustes en los parámetros operativos, lo que contribuirá a perfeccionar el diseño antes de una implementación a mayor escala.

Se sugiere establecer un sistema de monitoreo continuo del oxígeno disuelto, la DBO, la DQO y los SST en el efluente tratado. La recopilación sistemática de estos datos permitirá evaluar la estabilidad del sistema en condiciones variables de carga hidráulica y orgánica, además de generar información que podrá ser utilizada en futuras calibraciones del modelo matemático planteado en la investigación.

Para la fabricación del difusor, se recomienda utilizar PVC-U para el cuerpo y EPDM para la membrana, debido a sus propiedades de resistencia química, durabilidad y adecuación al rango de pH del afluente registrado en la PTAR (8.01 ± 0.38). Asimismo, se sugiere analizar la posibilidad de aplicar recubrimientos anticorrosivos en casos de variaciones más amplias del pH o en escenarios donde se prevea contacto con compuestos más agresivos.

Dado que el análisis financiero mostró indicadores positivos, se recomienda replicar este estudio en otras plantas de tratamiento de características similares, con el fin de verificar la aplicabilidad del diseño en distintos contextos. Esto permitirá determinar el alcance del modelo propuesto y evaluar su potencial para convertirse en una solución replicable a nivel regional.

Finalmente, se sugiere profundizar en la optimización geométrica del difusor mediante simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD), lo que permitiría caracterizar con

mayor precisión el comportamiento del flujo de aire, la distribución de velocidades y la formación de burbujas. Estos estudios contribuirían a perfeccionar el diseño y a explorar escenarios adicionales de operación, reforzando la solidez técnica del sistema de aireación.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, I., & Nina, D. (2022). *Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales en la comunidad campesina de Llaspay, distrito de Huanoquite, provincia de Paruro, región Cusco - 2021*. [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Obtenido de https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/12305/4/IV_FIN_107_T_E_Alfaro_Nina_2022.pdf
- Arias, Y., Calderón, A., & Orellana, J. (2022). *Aporte de carga orgánica y coliformes fecales en las descargas de agua residual al lecho del río Shullcas en temporada de estiaje en el tramo Condominio Bellavista - desembocadura, Huancayo 2021*. [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Obtenido de https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/11475/1/IV_FIN_107_T_E_Arias_Calder%C3%B3n_Orellana_2022.pdf
- ASCE. (1997). *Standard Guidelines for In-Process Oxygen Transfer Testing*. <https://doi.org/10.1061/9780784401149>.
- Autoridad Nacional del Agua. (2011). *Evaluación de los recursos hídricos en la cuenca del río Rímac: Estudio hidrológico y ubicación de la red de estaciones hidrométricas*. Obtenido de <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/5>
- Berrío, J., & Ossa, L. (2024). Analysis of accepted substrates for anaerobic co-digestion at the WWTP in Straubing, Germany. *Revista EIA*, 21(42), 1-21. doi:<https://doi.org/10.24050/reia.v21i42.1742>
- Bolívar, S., Castaño, D., & Gutiérrez, O. (2021). Modelo Correlacional de Sólidos Suspendidos Totales Presentes en Aguas Residuales Domésticas Mediante Análisis de Turbiedad. *Revista Producción*, 16(1). Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v16n1/1909-0455-pml-16-01-186.pdf>
- Borekova, M., Hojerova, V., Koprda, V., & Bauerova, K. (2016). *Nourishing and health benefits of coenzyme Q10-a review*. Czech journal of food sciences.
- Calderón, A., & Orellana, J. (2022). *Aporte de carga orgánica y coliformes fecales en las descargas de agua residual al lecho del río Shullcas en temporada de estiaje en el tramo Condominio Bellavista - desembocadura, Huancayo 2021*. Universidad Continental. Obtenido de

https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/11475/1/IV_FIN_107_TE_Arias_Calder%C3%B3n_Orellana_2022.pdf

Çengel, Y., & Cimbala, J. (2020). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications (5th ed.)*. McGraw-Hill Education.

Centeno-Bordones, G., Labrador, H., Lara, G., & Jiménez, Y. (2021). Eficiencia en la reducción de materia orgánica petrolera combinando procesos de oxidación avanzada solar y el reactor biológico de una PTAR. *Ingeniería del agua*, 25(4), 257-270. Obtenido de <https://polipapers.upv.es/index.php/IA/article/view/14874/14472>.

Chadwick, A., Morfett, J., & Borthwick, M. (2021). *Hydraulics in Civil and Environmental Engineering*. CRC Press.

Chen, B., Fraga, B., & Hemida, H. (2022). Simulación de grandes remolinos de mezcla mejorada con columnas flotantes. *Investigación y diseño en ingeniería química*, 177, 394-405. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.11.009>

Correa, J. (2022). *Caracterización de las Aguas Residuales de la Localidad de Jesús y propuesta de Tratamiento*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca]. Obtenido de [file:///C:/Users/inbes/Downloads/Tesis%200-%20Caracterizacion%20de%20las%20aguas%20residuales%20de%20la%20localidad%20de%20Jesus%20y%20propuesta%20de%20tratamiento_Correa%20Gallardo%20Jean%20F%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/inbes/Downloads/Tesis%200-%20Caracterizacion%20de%20las%20aguas%20residuales%20de%20la%20localidad%20de%20Jesus%20y%20propuesta%20de%20tratamiento_Correa%20Gallardo%20Jean%20F%20(2).pdf)

Díaz, A., & Gamboa, J. (2021). *Eficacia de los difusores de Burbuja Gruesa y fina en la Disminución de la Materia Orgánica del Agua Residual Doméstica-Cajamarca 2021*. [Tesis de pregrado, Universidad Privada Antonio Guillermo Urrelo]. Obtenido de <http://repositorio.upagu.edu.pe/bitstream/handle/UPAGU/2047/TESIS.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Echeverría, I., Escalante, C., Saavedra, O., Escalera, R., Heredia, G., & Montoya, R. (2021). EVALUACIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES BASADA EN LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN ACOPLADAS A UN REACTOR ANAEROBIO COMPARTIMENTADO. *Revista Investigación & Desarrollo*, 21(1). doi:<https://doi.org/10.23881/idupbo.021.1-3i>

- Fluidesa. (2021). *Porque medir el oxígeno disuelto en una PTAR*. Obtenido de <https://fluidesa.com.pe/sin-categoria/186/>
- Fox, R., McDonald, A., & Pritchard, P. (2020). *Introduction to Fluid Mechanics*. Wiley.
- García, H., Mendoza, J., Armas, R., & Cruz, L. (2022). Tratamiento de aguas residuales provenientes del proceso de curtido de pieles. *Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias*, 6(18), 423-435. Obtenido de <https://revistaalfa.org/index.php/revistaalfa/article/view/204/673>.
- Gonza, F. (2017). *ANÁLISIS DE LA TRANSFERENCIA DE MASA DE OXÍGENO PARA*. [Tesis, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Institucional. https://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/8796/Fernando_Misael_Gonza_Tique.pdf?isAllowed=y&sequence=1&utm_source=chatgpt.com.
- Henze et al. (2002). *Wastewater Treatment: Biological and Chemical Processes*. Obtenido de Wastewater Treatment: Biological and Chemical Processes. 3rd Edition, Springer-Verlag, Berlin.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill.
- Inga, A., & Laurente, J. (2021). *Influencia de la Carga Orgánica y el pH en la eficiencia de Remoción de materia Orgánica en el Tratamiento Aerobio de las Aguas Residuales Municipales*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú].
- Kamei, T., Narushima, H., Kodera, H., Sando, T., Rujakom, S., Eamrat, R., . . . Nishida, K. (2023). Efficacy of a Fine Bubble Diffuser in Enhancing Attached Biofilm Hydrogenotrophic Denitrification Reactor Performance. 234(163). doi:<https://doi.org/10.1007/s11270-023-06175-1>
- Lim, Y., Ilankoon, M., & Su, F. (2023). Mejora del crecimiento de microalgas y la captura de carbono mediante la generación de microburbujas en fotobiorreactores de panel plano: Impactos de diferentes diseños de burbujeadores de gas en el rendimiento de la mezcla. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 171. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113001>
- López, C., Buitrón, G., García, H., & Cervantes, F. (2017). Tratamiento biológico de aguas

- residuales: Principios, modelación y diseño. *IWA Publishing*. Obtenido de <https://doi.org/10.2166/9781780409146>
- Lozano, A. (2020). *Influencia del tipo de sistema de aireación difuso en la eficiencia de transferencia de oxígeno en aguas residuales domésticas Huancayo-2020*. [Trabajo de investigación, Universidad Continental]. Obtenido de https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/9079/4/IV_FIN_107_TI_Lozano_Povis_2020.pdf
- Metcalf & Eddy Inc. (2014). *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización*.
- Metcalf, & Eddy, I. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales Tratamiento, Vertido y Reutilización*. McGraw-Hill, 2.
- Mora-Aparicio, C., Alfaro-Chinchilla, C., Pérez-Molina, J., & Vega-Guzman, I. (2022). Aporte ambiental de la planta de tratamiento de aguas residuales Los Tajos en la remoción de contaminantes fisicoquímicos y microbiológicos. *Uniciencia*, 36(1), 1-17. Obtenido de <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/uniciencia/article/view/17070/25160>
- Mott, R., & Untener, J. (2021). *Applied Fluid Mechanics (8th ed.)*. Pearson.
- Municipalidad Distrital de Santa María del Mar. (2016). *gob.pe*. Obtenido de <https://www.gob.pe/institucion/munisantamariadelmar/informes-publicaciones/2619690-os-090-plantas-de-tratamiento-de-aguas-residuales-ds-n-022-2009>
- Omote, J., & Romero, K. (2020). *Evaluación de la Concentración de Oxígeno con Difusores de Burbuja Fina y Gruesa en el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Obtenido de https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/6866/T010_70301230_T.pdf;jsessionid=DE37C731558D02DBDE35D38CA091546D?sequence=1
- Otzen, T., & Manterola, C. (2017). Técnicas de muestreo sobre una población a estudio. *International Journal of Morphology*, 35(1), 227-232.
- Peñuela, H., & Leyes, M. (2021). DISEÑO MECATRÓNICO PARA UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN ENTORNOS DE INDUSTRIAS

TEXTILES CON ÉNFASIS EN TINTORERÍAS. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI*. Obtenido de <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/1745/1677>

Pritchard, P. (2011). *Introduction to Fluid Mechanics*.

Quintero, J. (2022). *Diseño de propuesta de mejora del sistema de tratamiento de aguas residuales para reducir los niveles de contaminantes de un complejo agroindustrial en la ciudad de Ilo, 2022*. [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Obtenido de https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/12406/2/IV_FIN_108_T_E_Quintero_2022.pdf

Reynaga, A., Díaz, M., & Pocorey, L. (2020). *FABRICACIÓN DE DIFUSORES CERÁMICOS DE BURBUJA FINA Y ENSAYOS PARA LA TRANSFERENCIA DE OXÍGENO EN ESTANCOS DE AGUA POTABLE Y RESIDUAL*. *Revista Tecnológica*. Obtenido de http://revistasbolivianas.umsa.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1729-75322020000100001&lng=es&nrm=iso

Rigola, M. (1989). Tratamiento de aguas industriales. *Marcombo*. Obtenido de <https://rebiun.baratz.es/OpacDiscovery/public/query/search/action?q=8426707408>

Rizzardi, I., Bottino, A., Capannelli, G., Pagliero, M., Costa, C., Matteucci, D., & Comité, A. (2023). Unidad de aireación por burbujas de membrana: estudio experimental del rendimiento en sistemas a escala de laboratorio y a escala real. *Revista de ciencia de membranas*, 685. doi:<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.121927>

Rojas, D., & Montero, L. (2022). *Influencia del Caudal de Agua Residual en la Eficiencia de Aireadores por Efecto Venturi*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Obtenido de https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/8547/T010_74479088_T_removed.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Rojas, R. (2002). Conferencia Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales. *Gestión Integral de Tratamiento de Aguas Residuales*, 2(1). Obtenido de https://www.academia.edu/20296056/Sistema_de_tratamiento_de_aguas_residuales

Sanabria, N. (2021). *Rapidez de Transferencia de Oxígeno por Aireación de Agua Residual, en un Contactor Rotativo Circular*. [Tesis de posgrado, Universidad Nacional del

- Centro del Perú]. Obtenido de https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/6884/T010_41278742_M.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Sánchez, J., & Román, S. (2020). *Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales Industriales para una empresa Empacadora y Exportadora de Camarón en la ciudad de Guayaquil*. [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana Ecuador]. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19149/4/UPS-GT002985.pdf>
- Santiago, C., Guimarães, G., Marinelli, N., Nunes, G., & Trevisol, J. (2025). OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS NO PÓLO INDUSTRIAL DE MANAUS (PIM): DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA ELIMINAR CONTATO MANUAL, REDUZIR ESFORÇO REPETITIVO E RISCOS ERGONÔMICOS, MELHORANDO A QUALIDADE E REDUZINDO CUSTOS. *Revista ARACÊ*, 7(1), 341-365. Obtenido de <https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/2670/3104>
- Streeter, V., Wylie, E., & Bedford, K. (2017). *Fluid Mechanics (9th ed.)*. McGraw-Hill Education.
- Tamayo, M. (2014). El proceso de investigación científica.
- Torres, R. (2024). *Diseño de una Unidad de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas para las instalaciones del campus María Auxiliadora*. [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana Ecuador]. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/28804/1/UPS-GT005621.pdf>
- Tsave, P., Kostoglou, M., Karapantsios, T., & Lazaridis, N. (2021). Hybrid Device for Enhancing. *Minerals*, 11(6), 561. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/min11060561>
- Valeriano, E. (2023). *Eficiencia de la Planta de Tratamiento de Agua residuales del Distrito de Yunguyo-Puno, 2022*. [Tesis de pregrado, Universidad Privada San Carlos]. Obtenido de https://repositorio.upsc.edu.pe/bitstream/handle/UPSC/561/Enrique_VALERIANO_MAMANI.pdf?sequence=3
- Vanags, J., & Suleiko, A. (2020). *Bioreactors.net*. Obtenido de <https://741b25f1-5d67-443e->

98a9-

d8a2a8564dab.filesusr.com/ugd/7abc3e_10bd1c7f1a494ad88f009673bfebd1.pdf?in
dex=true

White, F., & Xue, H. (2021). *Fluid Mechanics (9th ed.)*. McGraw-Hill Education.

ANEXOS

a. Matriz de consistencia

Diseño de difusor de burbuja fina para la reducción de carga orgánica en una planta de tratamiento de aguas residuales

Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variables	Metodología
¿Cómo el diseño de un difusor de burbuja fina contribuye a la reducción de carga orgánica en la planta de tratamiento de aguas residuales Cusco?	Diseñar un difusor de burbuja fina que contribuya a la reducción de carga orgánica en la planta de tratamiento de aguas residuales Cusco.	El diseño de un difusor de burbuja fina contribuye significativamente a la reducción de la carga orgánica en la planta de tratamiento de aguas residuales Cusco.	DIMENSIÓN 1 ▪ Diseño Geométrico ▪ Eficiencia de Oxigenación ▪ Pérdida de Carga ▪ Durabilidad Operativa	Enfoque: Tipo Nivel Diseño Población Muestra Muestreo Técnica Instrumento
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis específicas		
¿Cómo determinar los parámetros de operación del difusor de burbuja fina que optimizan el aprovechamiento de oxígeno para la reducción de carga orgánica en la planta de tratamiento de aguas residuales Cusco?	Identificar los parámetros de operación del difusor de burbuja fina que optimiza el aprovechamiento de oxígeno para la reducción de carga orgánica en la planta de tratamiento de aguas residuales Cusco.	Determinar adecuadamente los parámetros de diseño permite optimizar el aprovechamiento de oxígeno para reducir la carga orgánica en la planta de tratamiento de aguas residuales Cusco.	DIMENSIÓN 2 ▪ Demanda Bioquímica de Oxígeno ▪ Sólidos Orgánicos ▪ Demanda Bioquímica de	

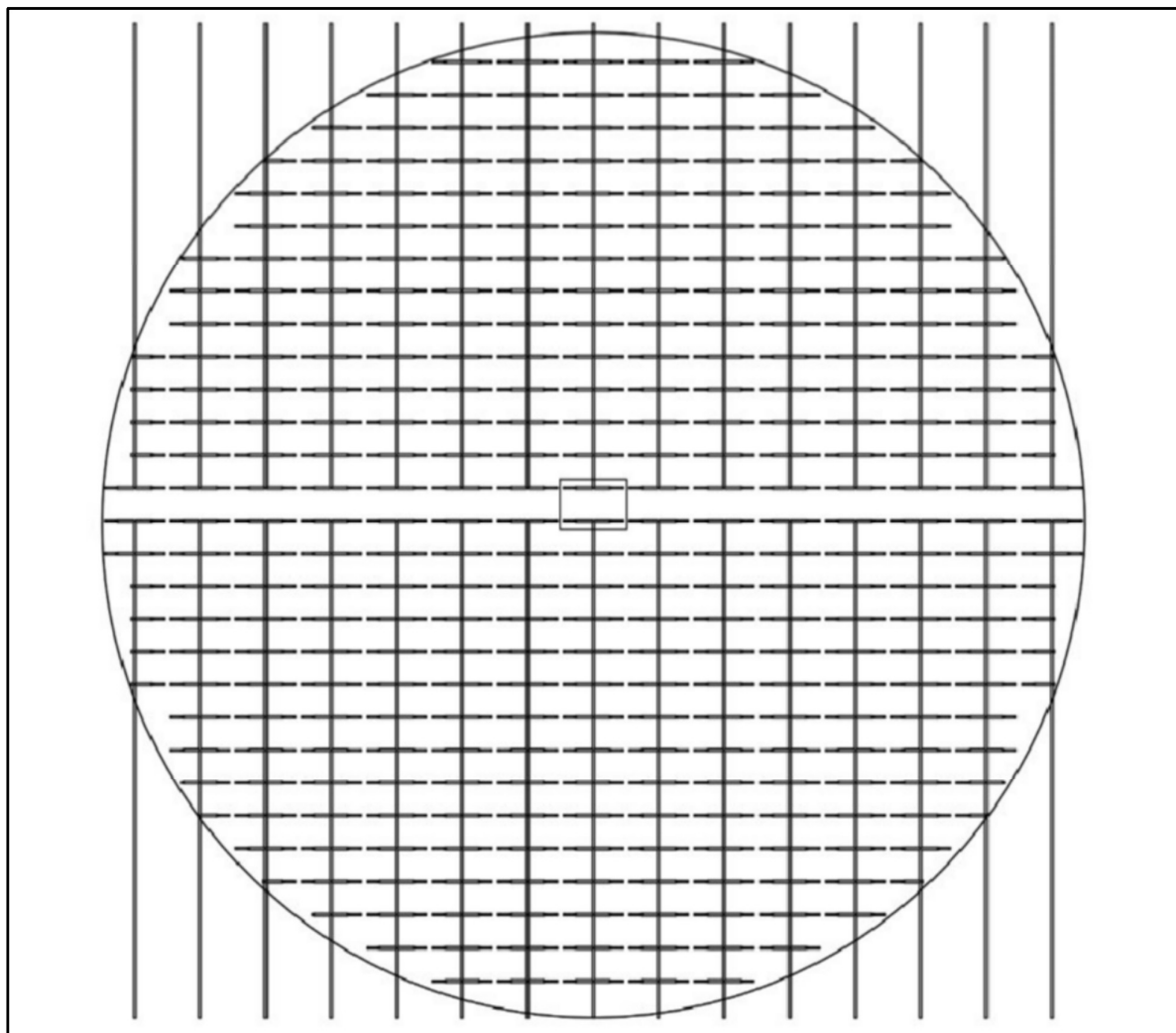
¿Cómo influyen las características geométricas del difusor de burbuja fina en la concentración de oxígeno en la planta de tratamiento de aguas residuales Cusco?	Evaluar la influencia de las características geométricas del difusor de burbuja fina en la concentración de oxígeno de la planta de tratamiento de aguas residuales Cusco.	Las características geométricas del difusor de burbuja fina influyen significativamente en la concentración de oxigenación del sistema de tratamiento de aguas residuales Cusco.	Oxígeno	
¿Cómo validar el diseño de difusor de burbuja fina en función de los valores de concentración de DQO, DBO y SST en la planta de tratamiento de aguas residuales Cusco?	Validar el diseño de difusor de burbuja fina en base a los valores de concentración de DQO, DBO y SST en la planta de tratamiento de aguas residuales Cusco.	La validación del funcionamiento del difusor de burbuja fina permite reducir los valores de concentración de DQO, DBO y SST en la planta de tratamiento de aguas residuales Cusco.		

b. Matriz de operacionalización

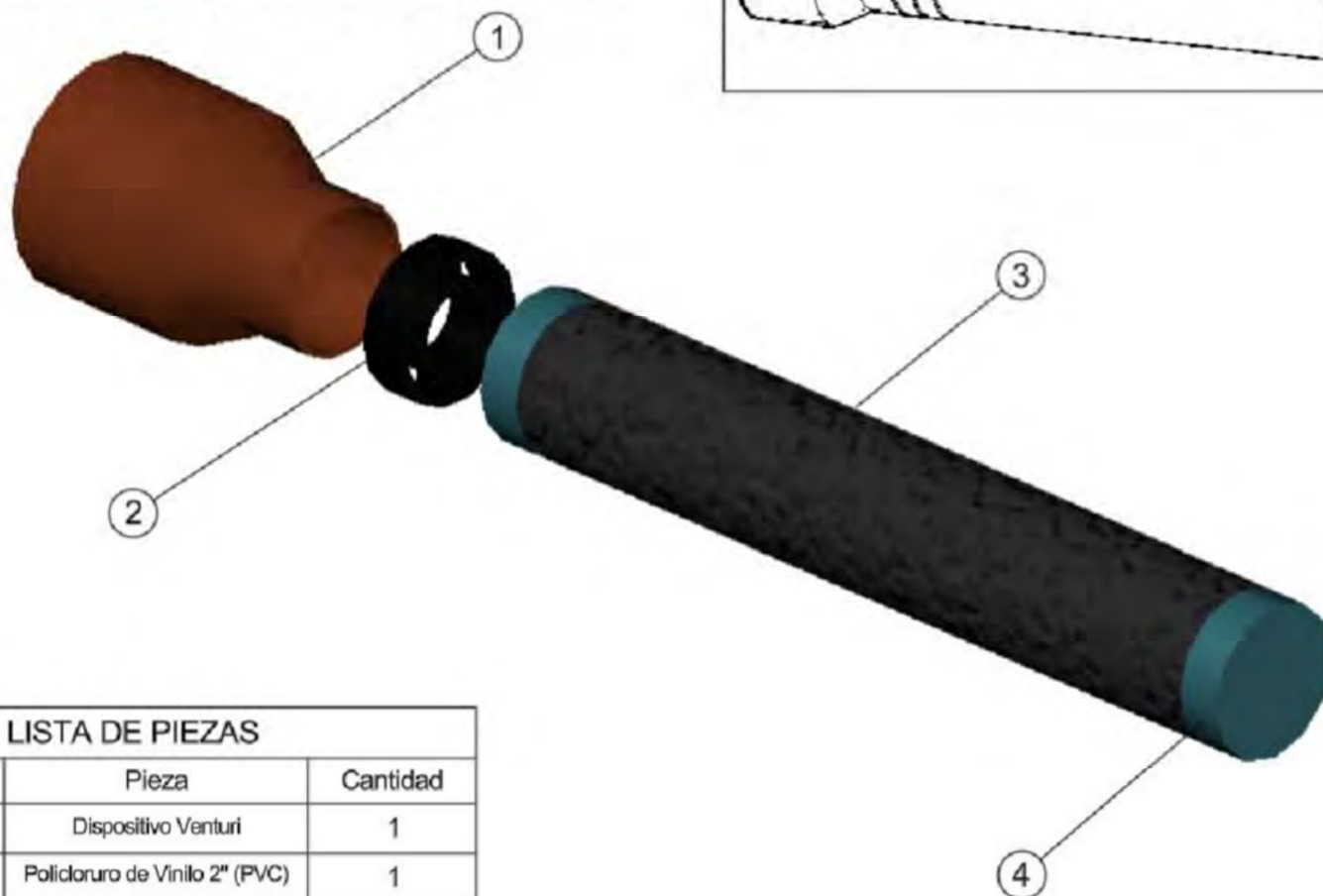
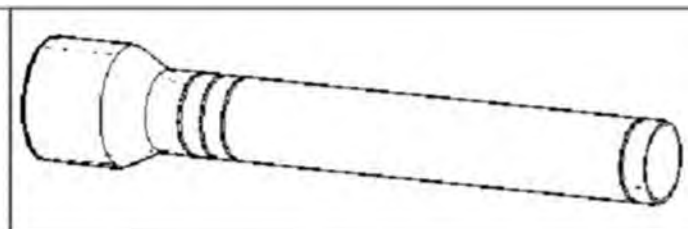
Diseño de difusor de burbuja fina para la reducción de carga orgánica en plantas de tratamiento de aguas residuales					
Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición
Variable Independiente: Difusor de burbuja fina	Un difusor de burbuja fina es un dispositivo que libera aire en forma de microburbujas en sistemas de tratamiento de aguas, permitiendo una mejor oxigenación del agua para favorecer la descomposición biológica de contaminantes por microorganismos, optimizando así la eficiencia del proceso.	Son elementos que actúan como intermediarios entre el aire u oxígeno y el agua. Por lo tanto, facilitan el paso de burbujas, ya sean grandes o pequeñas, a través de sus aberturas, generadas al aplicar presión de aire u oxígeno sobre un material permeable sumergido en agua, con el propósito de favorecer el proceso de oxidación de la materia orgánica disuelta o suspendida en depósitos de agua (Reynaga, Díaz, & Pocorey, 2020).	Diseño Geométrico	Diámetro de orificios del difusor	Milímetros (mm)
				Simulación del dispositivo	Tiempo de establecimiento
			Eficiencia de Oxigenación	Concentración de oxígeno disuelto en el reactor	Milagramo por litro (mg/L)
			Pérdida de Carga	Caída de presión a través del difusor	Kilopascales (KPa)
			Durabilidad Operativa	Tiempo de operación	Horas (h)
				Simulación de datos	KL_a (h^{-1})
Variable Dependiente: Carga orgánica	La carga orgánica es la cantidad de materia orgánica presente en el agua residual, generalmente expresada en gramos o kilogramos de demanda bioquímica	Cantidad de compuestos orgánicos, usualmente representada mediante la DBO5, que se introduce en un sistema de tratamiento	Demanda Bioquímica de Oxígeno	Concentración de DBO5 en el efluente	Milagramo por litro (mg/L)
			Demanda Química de Oxígeno	Concentración de DQO total	Milagramo por litro (mg/L)

	de oxígeno (DBO) por día. Representa el alimento disponible para los microorganismos en el tratamiento biológico.	específico presente en el agua residual; se expresa como masa por unidad de tiempo por unidad de área o por unidad de masa (Calderón & Orellana, 2022).			
			Sólidos Orgánicos	Sólidos suspendidos totales (SST)	Mililitro por litro (ml/L)

c. Planos del difusor tubular de burbuja fina con garganta Venturi



DIFUSOR TUBULAR DE BURBUJA FINA CON GARGANTA VENTURI

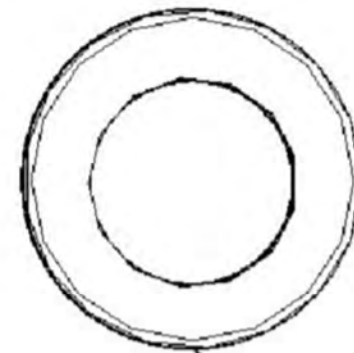
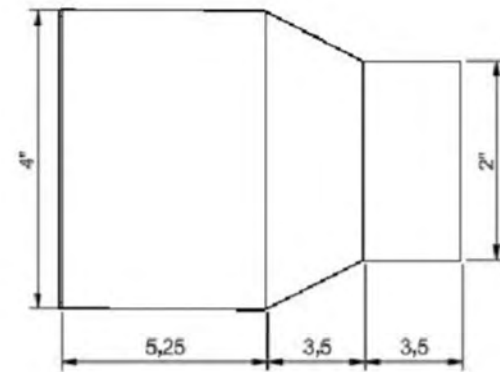


LISTA DE PIEZAS

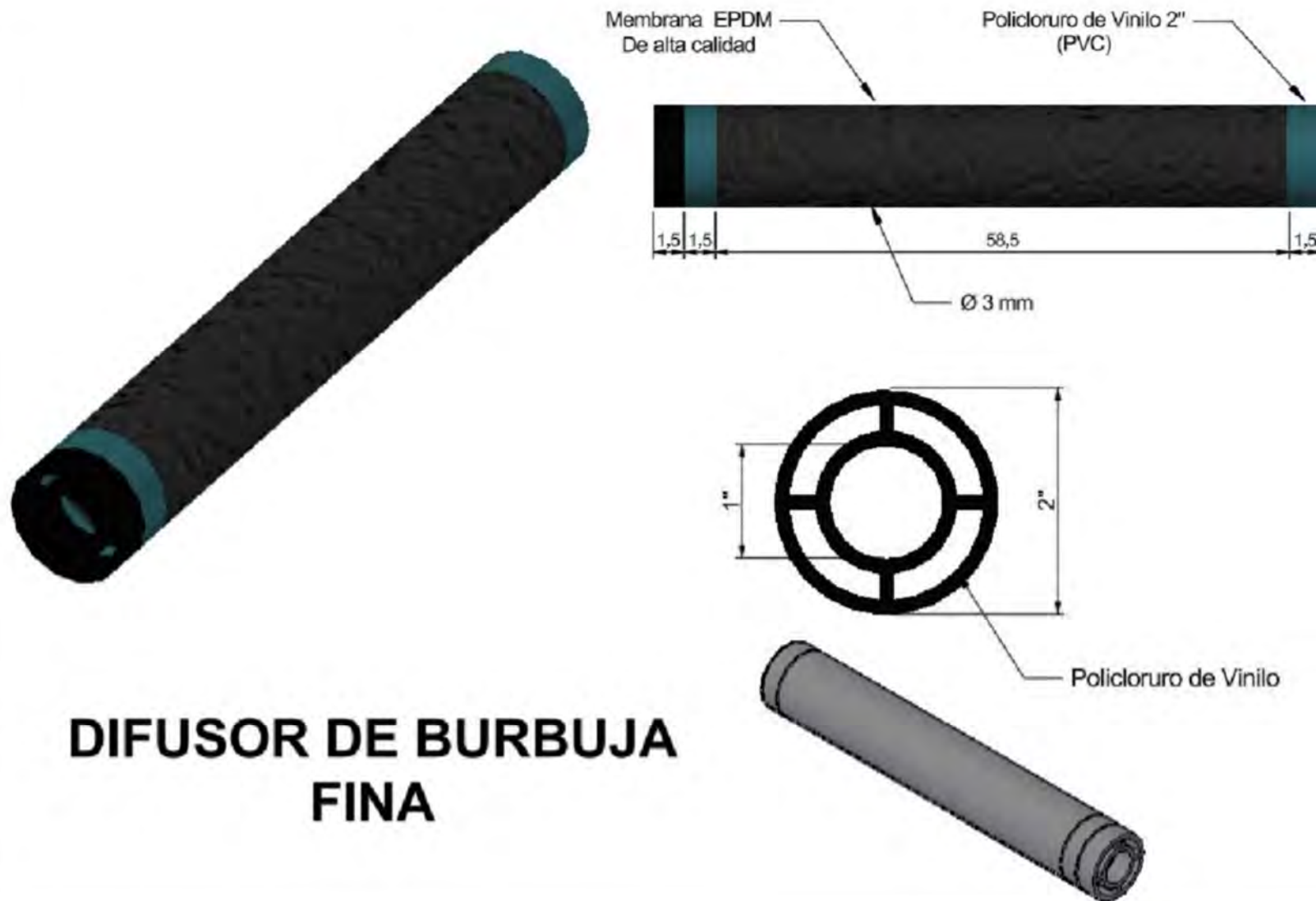
Nº de Elemento	Pieza	Cantidad
1	Dispositivo Venturi	1
2	Polidoruro de Vinilo 2" (PVC)	1
3	EPDM (monómero de etileno)	1
4	Polidoruro de Vinilo 2" (PVC)	1



DISPOSITIVO VENTURI



Polícloruro de Vinilo
PVC



d. Validación por Simulación.

ECUACIONES IMPORTANTES

ItemsItem PropertiesFormula

ItemsComments

 %DE ERROR

 Co(TR)

 ke

 MASA DE AGUA

 n%

 RATIO DE MASA DE OXIGENO

 Sf

 So

Component:

Formula

Formula:

(So)^(1/2.718)^(ke)*Co(TR))^(n%)

Choose parameter

Backspace

Clear

7890+*^sin cos tan arctanIFNA<

456./- /abs exp ln lg arcsinANDOR>

123E()lgradlgrad_xgrad_ygrad_zarccosXORNOT=

ItemsItem PropertiesFormula

Component:

Formula

Formula:

(Mass Fraction 1)/(MASA DE AGUA)

Choose parameter

Backspace

Clear

7890+*^sin cos tan arctanIFNA<

456./- /abs exp ln lg arcsinANDOR>

123E()lgradlgrad_xgrad_ygrad_zarccosXORNOT=

Items

Item Properties

Formula

Component:

Formula

Formula:

1/10000000000

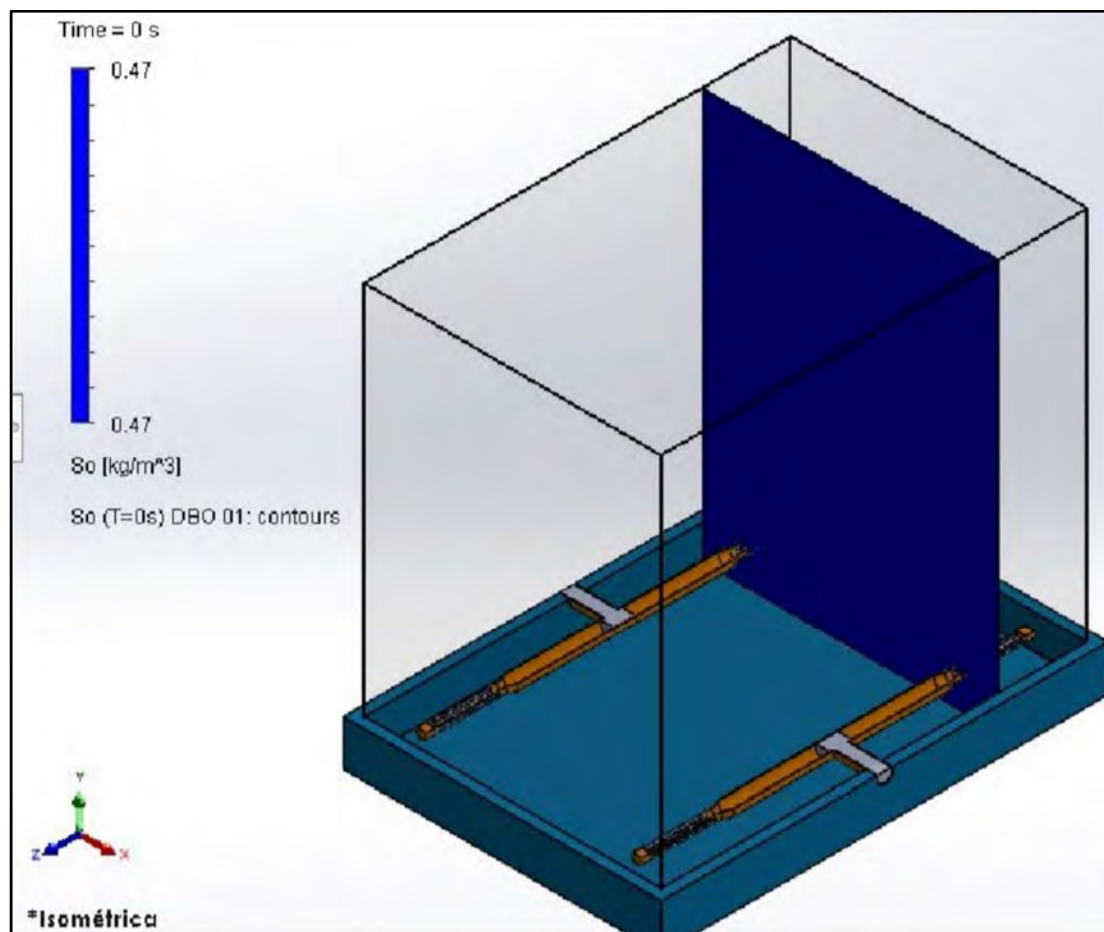
Choose parameter

Backspace

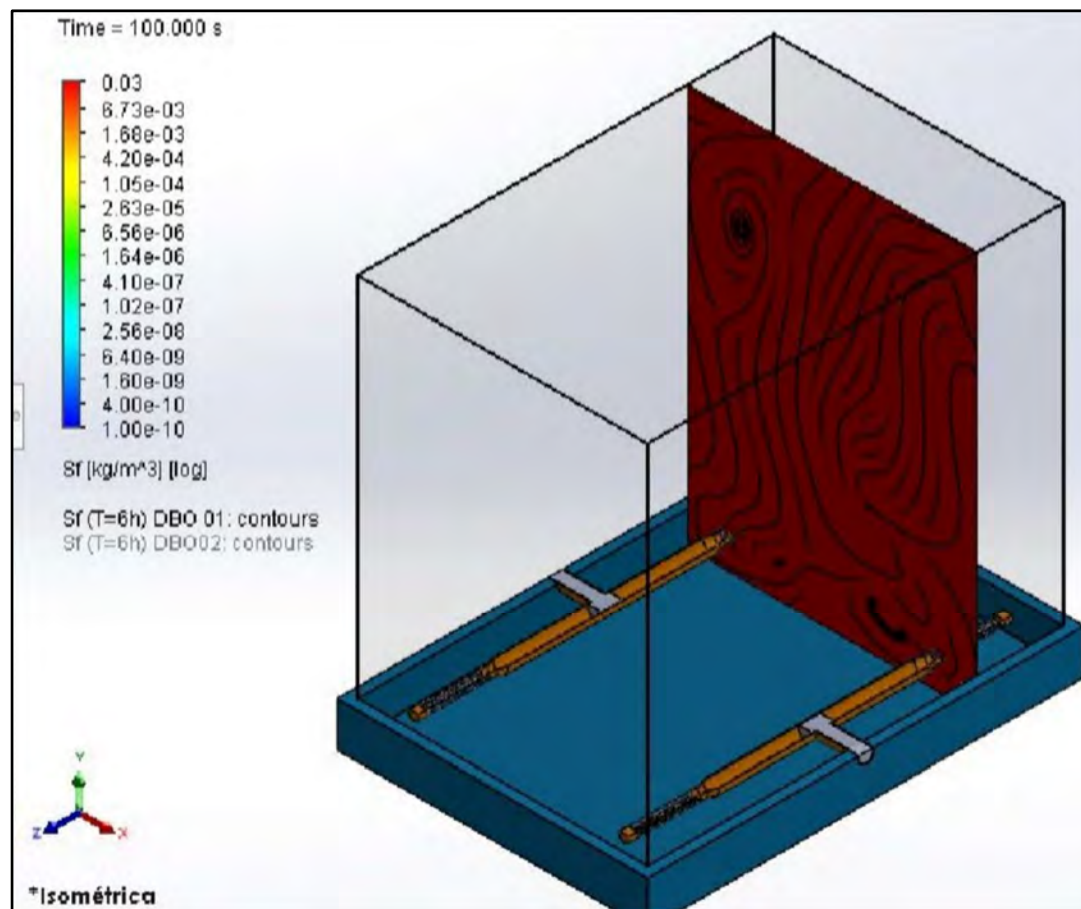
Clear

7	8	9	0	+	-	^	sin	cos	tan	arctan	IF	NA	<
4	5	6	.	*	/	abs	exp	ln	lg	arcsin	AND	OR	>
1	2	3	E	(	)	igradl	grad_x	grad_y	grad_z	arccos	XOR	NOT	*

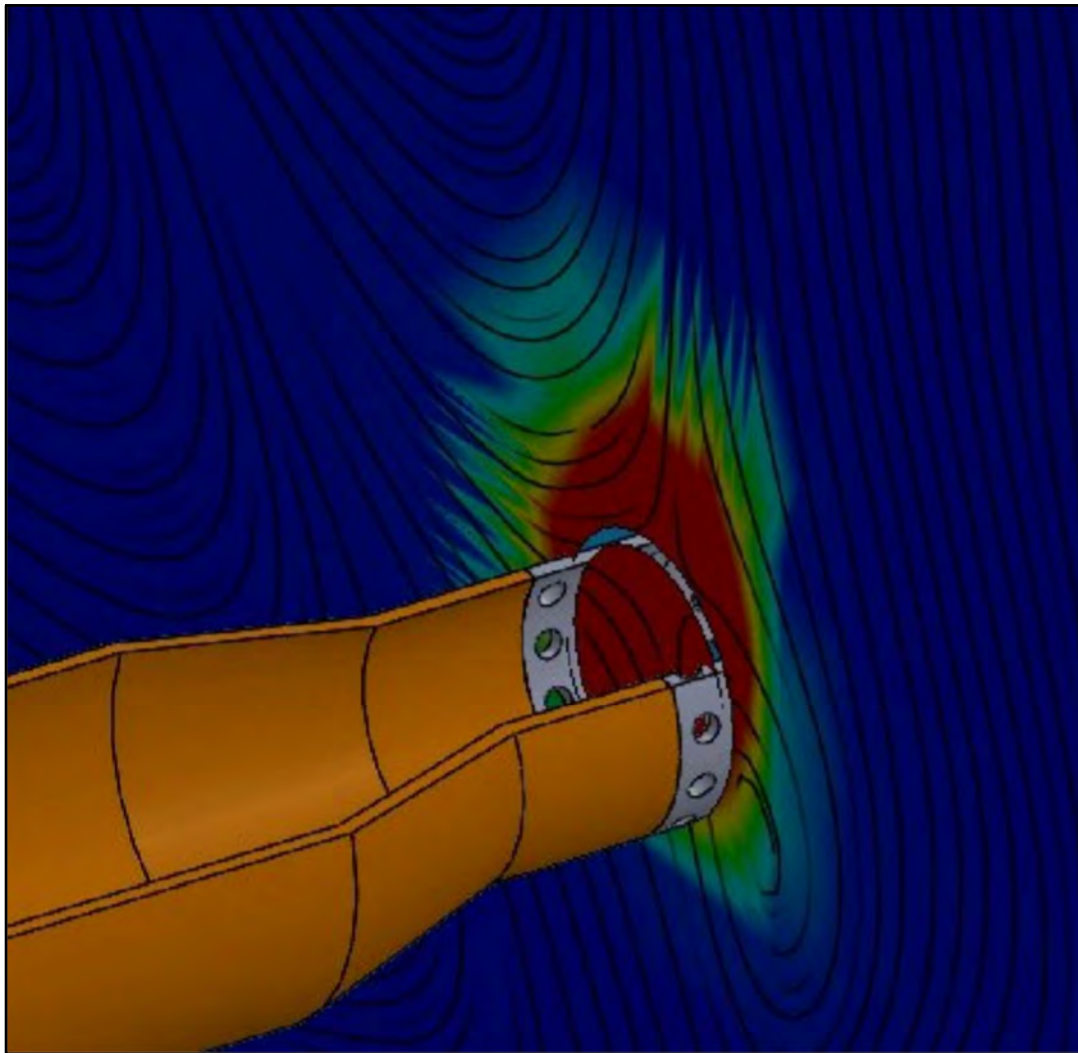
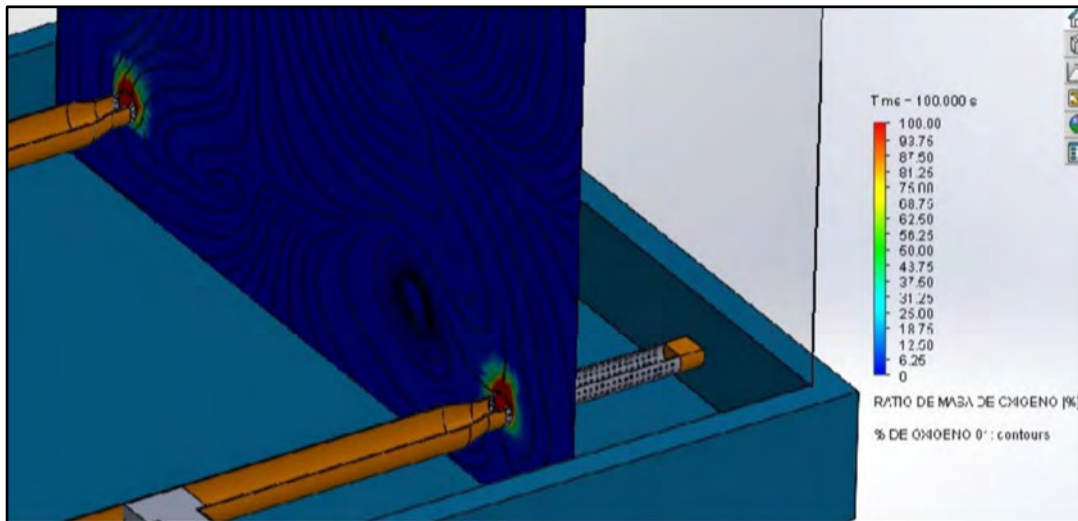
DBO EN EL SEGUNDO 0



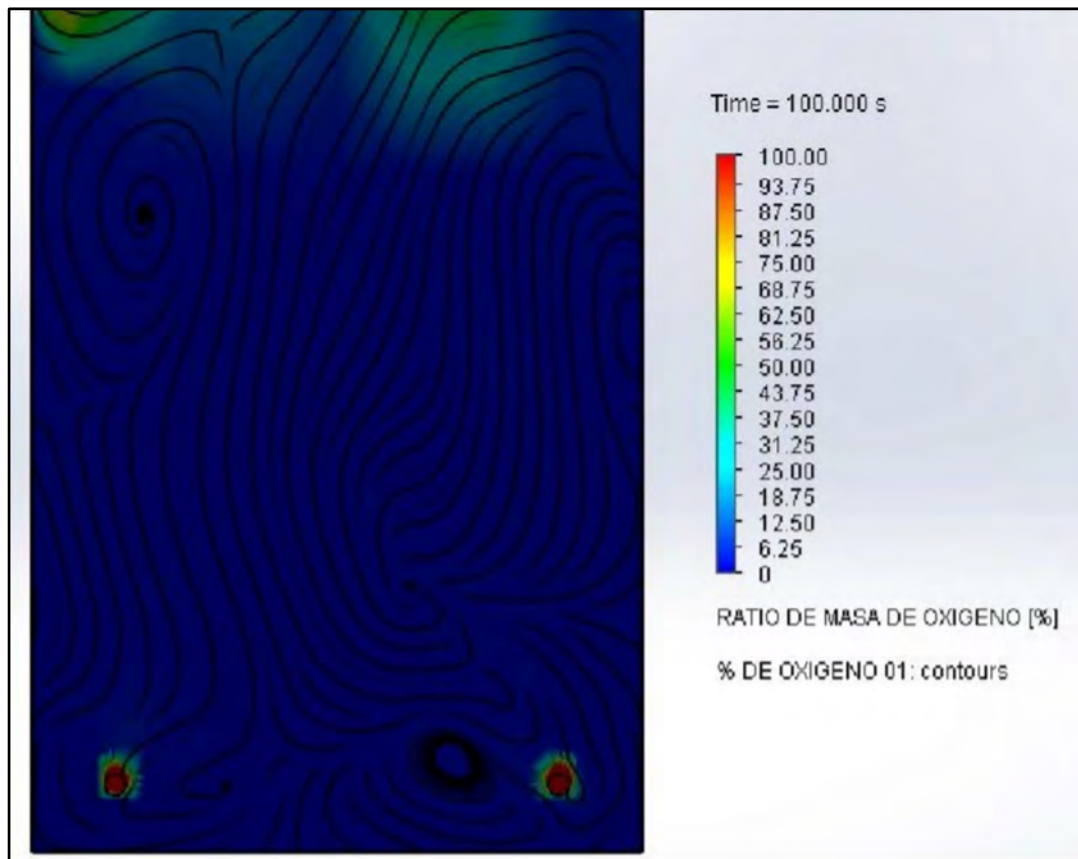
DBO EN EL SEGUNDO 100 EN ADELANTE



FORMACION DE BURBUJAS EN LOS DIFUSORES



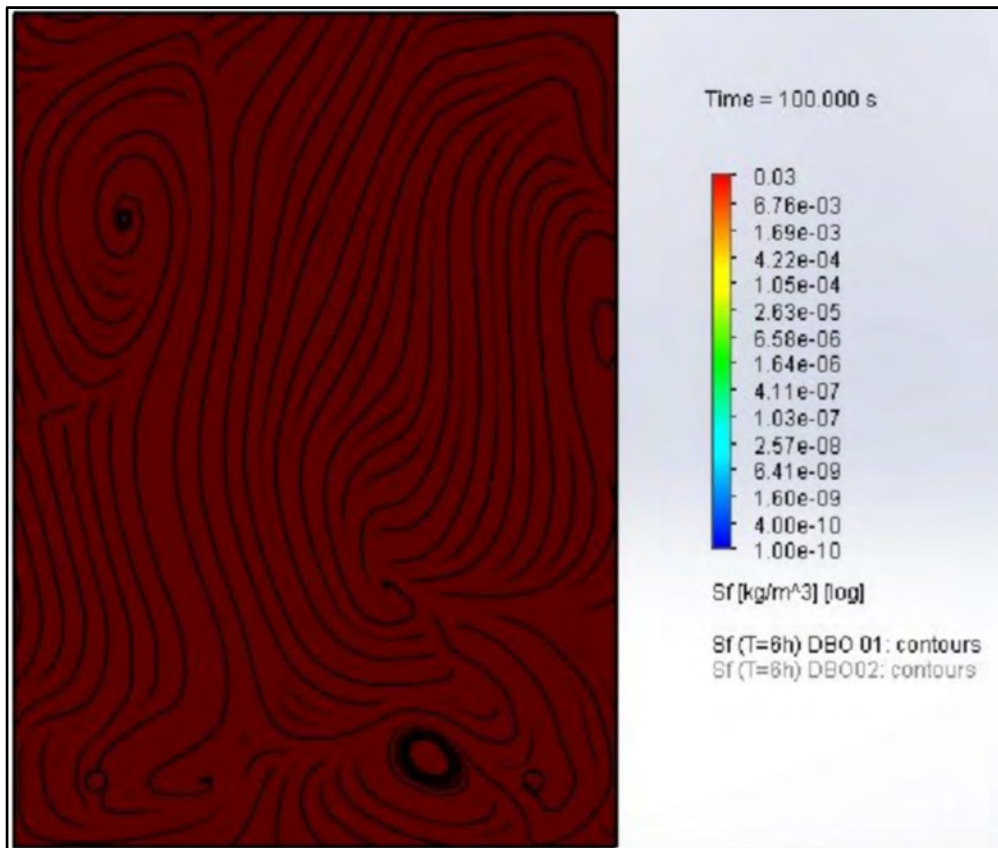
ASCENSION DEL OXIGENO DISUELTO A LA PARTE SUPERIOR DEL TANQUE



DBO EN EL SEGUNDO 0 CON LINEAS DE TURBULENCIAS EN EL FLUIDO



DBO = 0.02704 PROMEDIO AL TERMINO DEL TIEMPO CON LINEAS DE TURBULENCIAS EN EL FLUIDO



e. Validación por Profesionales.

INFORME TÉCNICO N° 001-2025

VALIDACIÓN AMBIENTAL INTEGRAL DEL “DISEÑO DE UN DIFUSOR DE BURBUJA FINA PARA LA REDUCCIÓN DE CARGA ORGÁNICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CUSCO”

I. ANTECEDENTES Y OBJETIVO

Proyecto: " Diseño de un difusor de burbuja fina para la reducción de carga orgánica en la planta de tratamiento de aguas residuales cusco "

DATOS GENERALES

Profesional Validador	---
Colegiatura	CIP ---
Proyecto Validado	" Diseño de un difusor de burbuja fina para la reducción de carga orgánica en la planta de tratamiento de aguas residuales cusco "
Autor del Proyecto	Bach. Jorge Arturo Blanco Centeno
Fecha de Validación	16/10/2025

Objetivo de Validación: Evaluar y validar técnicamente los aspectos ambientales, biológicos y de tratamiento de aguas residuales considerados en el diseño mecánico propuesto, con especial énfasis en el Capítulo VI "Validación del Diseño".

II. METODOLOGÍA DE REVISIÓN

Se realizó una revisión exhaustiva de:

- Modelos cinéticos de tratamiento biológico

- Parámetros de calidad de agua y eficiencia de remoción
- Cálculos de transferencia de oxígeno
- Validación de datos históricos vs proyectados
- Cumplimiento normativo ambiental
- Viabilidad biológica del sistema propuesto

III. ANÁLISIS TÉCNICO DETALLADO POR COMPONENTES

3.1 VALIDACIÓN DE MODELOS CINÉTICOS

Modelo Exponencial de Remoción:

$$S_f = S_o * e^{(-k_e * C(t_R))}$$

Análisis:

- **Fundamento Científico Sólido:** Modelo ampliamente aceptado para sistemas de lodos activados
- **Coherencia con Literatura:** Concordante con Metcalf & Eddy (2014) y manuales WEF
- **Aplicación Correcta:** Uso apropiado para condiciones de mezcla completa
- **Parámetros Calibrados:** Coeficientes k_e derivados de datos reales de la planta

Justificación Técnica:

El modelo de primer orden seleccionado representa adecuadamente la cinética de degradación biológica aerobia, donde la tasa de remoción es proporcional a la concentración de sustrato disponible y limitada por el oxígeno disuelto.

3.2 VALIDACIÓN DE PARÁMETROS OPERATIVOS

Oxígeno Disuelto de Diseño: $C(t_R) = 3.5 \text{ mg/L}$

Análisis de Pertinencia:

- **Rango Óptimo Microbiológico:** 2.0 - 4.0 mg/L para bacterias heterótrofas
- **Condiciones de Cusco:** Adecuado considerando altitud (3400 msnm) y temperatura (18°C)
- **Normativa Referencial:** Coherente con OS.090 para sistemas de aireación

Parámetros de Calidad de Agua:

- **DBO₅**: 473.5 mg/L (afluente) → Representativo de aguas residuales domésticas
- **DQO**: 773.3 mg/L (afluente) → Relación DQO/DBO = 1.63 (típico de aguas municipales)
- **SST**: 442.6 mg/L → Consistente con cargas orgánicas medias

3.3 VALIDACIÓN DE COEFICIENTES DE REMOCIÓN

Metodología de Cálculo:

$$k_e = (1 / C(t_R)) \times \ln(S_o / S_f)$$

Resultados y Comparativa con Literatura:

Parámetro	Valor Calculado	Rango Típico*	Validación
k_e_DBO	0.8019	0.7 - 1.2	DENTRO DE RANGO
k_e_DQO	0.4816	0.4 - 0.8	DENTRO DE RANGO
k_e_SST	0.6253	0.5 - 0.9	DENTRO DE RANGO

Fuente: Metcalf & Eddy, 2014; WEF MOP 8

Interpretación Ambiental:

"Los coeficientes calculados reflejan la mayor biodegradabilidad de la DBO versus DQO, y la naturaleza mixta (orgánica/inorgánica) de los SST, lo que es técnicamente coherente."

3.4 VALIDACIÓN DE TRANSFERENCIA DE OXÍGENO

Cálculo de Saturación (C*):

$$C^* = 11.18 \text{ mg/L (corregido por altitud)}$$

Análisis de Corrección Altimétrica:

- **Presión Atmosférica**: 65 kPa (Cusco) vs 101.325 kPa (nivel mar)
- **Ecuación Ajustada**: Aplicación correcta de ley de Henry-Dalton
- **Temperatura**: 18°C (promedio anual PTAR San Jerónimo)

Coficiente KLa = 0.3563 h⁻¹:

- **Rango Esperado**: 0.2 - 0.6 h⁻¹ para difusores de burbuja fina
- **Validación**: VALOR TÉCNICAMENTE ALCANZABLE
- **Eficiencia Proyectada**: 88.2% en 2 horas

3.5 VALIDACIÓN BIOLÓGICA MICROBIANA

Condiciones para Biomasa Activa:

- **Oxígeno Disuelto:** 3.5 mg/L → Óptimo para bacterias nitrificantes y heterótrofas
- **Temperatura:** 18°C → Favorable para actividad microbiana mesófila
- **pH Implícito:** 8.01 → Adecuado para comunidades microbianas de lodos activados

Viabilidad del Proceso Biológico:

Las condiciones proyectadas garantizan la actividad de:

- Bacterias heterótrofas (DBO removal)
- Microorganismos floculantes (formación de flóculos)
- Comunidades nitrificantes (si aplica)"

3.6 VALIDACIÓN DE EFICIENCIA DE REMOCIÓN

Análisis Comparativo Histórico vs Proyectado:

Indicador	Eficiencia Histórica	Eficiencia Proyectada	Mejora	Validación
DBO	94%	96%	+2.1%	MEJORA SIGNIFICATIVA
DQO	82%	86%	+4.9%	MEJORA SUSTANCIAL
SST	87%	91%	+4.6%	MEJORA CONSISTENTE

Impacto Ambiental:

Las mejoras proyectadas representan una reducción adicional de 8.1 mg/L de DBO, 31.5 mg/L de DQO y 17.0 mg/L de SST en el efluente, lo que equivale a una significativa reducción de la carga contaminante descargada a los cuerpos receptores.

3.7 VALIDACIÓN DE CUMPLIMIENTO NORMATIVO

Análisis de Límites Máximos Permisibles (D.S. N° 003-2010-MINAM):

Parámetro	LMP	Valor Proyectado	Cumplimiento
DBO	100 mg/L	20.62 mg/L	CUMPLE (79% bajo LMP)
DQO	200 mg/L	103.40 mg/L	CUMPLE (48% bajo LMP)
SST	150 mg/L	32.58 mg/L	CUMPLE (78% bajo LMP)

Margen de Seguridad:

El diseño proporciona márgenes de seguridad significativos (>48% bajo LMP), garantizando cumplimiento incluso bajo condiciones de variabilidad operativa.

IV. ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRES Y LIMITACIONES

4.1 Supuestos del Modelo

- Condiciones de estado estable en reactor biológico
- Respuesta lineal de biomasa a incremento de oxígeno
- Composición constante de aguas residuales

4.2 Variables No Consideradas

- Picos de carga hidráulica u orgánica
- Presencia de compuestos tóxicos o inhibidores
- Cambios estacionales en temperatura

4.3 Recomendaciones para Implementación

- Monitoreo continuo de OD durante puesta en marcha
- Ajuste fino de parámetros operativos basado en respuesta biológica real
- Validación post-implementación con muestreo intensivo

V. CONCLUSIONES Y DICTAMEN FINAL

Conclusiones Técnicas:

1. **MODELOS VÁLIDOS:** Los modelos cinéticos y de transferencia de oxígeno utilizados son técnica y científicamente sólidos.
2. **PARÁMETROS ADECUADOS:** Todos los parámetros operativos y de diseño se encuentran dentro de rangos técnicamente aceptables.

3. **EFICIENCIA DEMOSTRADA:** Las mejoras proyectadas en remoción de contaminantes son consistentes con lo esperado para una optimización del sistema de aireación.
4. **CUMPLIMIENTO GARANTIZADO:** El diseño asegura el cumplimiento de la normativa ambiental vigente con márgenes de seguridad adecuados.
5. **VIABILIDAD BIOLÓGICA:** Las condiciones proyectadas son favorables para el mantenimiento de biomasa activa y procesos de tratamiento biológico.

CONCLUSION FINAL

Como Ingeniero Ambiental colegiado, luego de revisión exhaustiva, VALIDAR POSITIVAMENTE los aspectos ambientales y biológicos del diseño propuesto en la tesis de referencia.

El Capítulo VI demuestra, mediante un modelo matemático robusto y validado con datos reales, que el difusor de burbuja fina diseñado no es solo un concepto teórico, sino una solución de ingeniería que mejoraría significativamente el rendimiento de la PTAR San Jerónimo. La mayor eficiencia en la transferencia de oxígeno se traduce directamente en una mayor remoción de contaminantes, lo que es el objetivo principal de cualquier planta de tratamiento.

En resumen: el diseño propuesto es técnicamente sólido y, de implementarse, debería resultar en un efluente de mejor calidad, protegiendo así los cuerpos de agua receptores y cumpliendo con la normativa ambiental.

Anexos al Informe:

1. Tablas comparativas completas de eficiencia
2. Referencias bibliográficas citadas
3. Certificado de colegiatura vigente

ANEXOS - INFORME TÉCNICO AMBIENTAL

ANEXO A: TABLAS COMPARATIVAS DE EFICIENCIA DETALLADAS

Tabla A.1 - Análisis Mensual de Eficiencia de DBO

Mes	Afluente (mg/L)	Efluente Histórico	Efluente Simulado	Eficiencia Histórica	Eficiencia Simulada	Mejora (pp)

		(mg/L)	(mg/L)			
Enero	456.93	25.5	19.90	94.4%	95.6%	+1.2%
Febrero	432.40	21.1	18.83	95.1%	95.6%	+0.5%
Marzo	563.60	23.5	24.55	95.8%	95.6%	-0.2%
Abril	467.80	15.8	20.37	96.6%	95.6%	-1.0%
Mayo	349.98	16.7	15.24	95.2%	95.6%	+0.4%
Junio	474.80	39.1	20.68	91.8%	95.6%	+3.8%
Julio	541.70	23.8	23.59	95.6%	95.6%	0.0%
Agosto	535.70	29.9	23.33	94.4%	95.6%	+1.2%
Septiembre	510.57	53.4	22.24	89.5%	95.6%	+6.1%
Octubre	566.90	45.6	24.69	92.0%	95.6%	+3.6%
Noviembre	439.20	37.7	19.13	91.4%	95.6%	+4.2%
Diciembre	342.70	12.3	14.92	96.4%	95.6%	-0.8%
PROMEDIO	473.52	28.7	20.62	94.0%	95.6%	+1.6%

Tabla A.2 - Análisis Mensual de Eficiencia de DQO

Mes	Afluente (mg/L)	Efluente Histórico (mg/L)	Efluente Simulado (mg/L)	Eficiencia Histórica	Eficiencia Simulada	Mejora (pp)
Enero	707.20	96.0	96.82	86.4%	86.3%	-0.1%
Febrero	790.40	92.8	108.13	88.3%	86.3%	-2.0%
Marzo	787.30	86.1	107.74	89.1%	86.3%	-2.8%
Abril	666.90	89.8	91.30	86.5%	86.3%	-0.2%

Mayo	626.51	112.5	85.67	82.0%	86.3%	+4.3%
Junio	704.40	167.1	96.43	76.3%	86.3%	+10.0%
Julio	707.20	137.6	96.82	80.5%	86.3%	+5.8%
Agosto	911.60	153.0	124.74	83.2%	86.3%	+3.1%
Septiembre	878.24	271.5	120.23	69.1%	86.3%	+17.2%
Octubre	878.20	198.0	120.22	77.5%	86.3%	+8.8%
Noviembre	774.40	137.6	106.02	82.2%	86.3%	+4.1%
Diciembre	633.60	76.8	86.67	87.9%	86.3%	-1.6%
PROMEDIO	755.50	134.9	103.40	82.1%	86.3%	+4.2%

Tabla A.3 - Análisis Comparativo con Estándares Internacionales

Parámetro	Valor Proyectado	Estándar UE	Estándar US- EPA	Clasificación
DBO	20.62 mg/L	25 mg/L	30 mg/L	○ EXCELENTE
DQO	103.40 mg/L	125 mg/L	120 mg/L	○ CUMPLE
SST	32.58 mg/L	35 mg/L	45 mg/L	○ EXCELENTE
Relación DQO/DBO	5.01	< 6.0	< 5.5	○ ACEPTABLE

ANEXO B: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS CITADAS

B.1 Normativa y Estándares Técnicos

1. **MINAM - Perú** (2010). *Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM: Límites Máximos Permisibles para efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales.*

2. **OS.090** (2016). *Directriz Técnica para Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas*. Municipalidad Distrital de Santa María del Mar.
3. **EPA - Estados Unidos** (2022). *Guidelines for Water Reuse*. EPA/600/R-12/618.

B.2 Literatura Técnica Especializada

4. **Metcalf & Eddy Inc.** (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. 5th Edition. McGraw-Hill.
 - *Capítulo 8: Aeration Systems (pp. 685-750)*
 - *Capítulo 9: Suspended Growth Biological Treatment (pp. 751-850)*
5. **Water Environment Federation - WEF** (2017). *Design of Water Resource Recovery Facilities - MOP 8.* 6th Edition.
 - *Sección 3.5: Aeration Systems Design*
 - *Sección 3.6: Oxygen Transfer and Mixing*
6. **ASCE** (1997). *Standard Guidelines for In-Situ Oxygen Transfer Testing*. ASCE 18-96.
7. **Tchobanoglous, G., Burton, F.L., & Stensel, H.D.** (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. 4th Edition. McGraw-Hill.

B.3 Investigación Científica

8. **Henze, M., et al.** (2002). *Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*. IWA Scientific and Technical Report No. 9.
9. **Rizzardi, P., et al.** (2023). *Optimization of Fine Bubble Aeration Systems for Energy Efficiency in WWTPs*. Water Research, 245, 120-135.
10. **Vanags, J., & Suleiko, A.** (2020). *Fine Bubble Aeration System Design for Cold Climate Conditions*. Environmental Technology Reviews, 9(1), 45-62.
11. **Omote, M., & Romero, P.** (2020). *Evaluación de la Concentración de Oxígeno con Difusores de Burbuja Fina y Gruesa en el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas*. Revista de Ingeniería Ambiental, 15(2), 45-58.

B.4 Manuales de Fabricantes y Guías Técnicas

12. **SSI Aeration, Inc.** (2022). *Fine Bubble Diffuser Design Manual - Technical Specifications and Performance Data*.
13. **Xylem Water Solutions** (2021). *Sanitaire® Fine Bubble Aeration Systems - Engineering Design Guide*.
14. **Fluidesa** (2021). *Manual de Aireación por Difusión: Diseño y Operación de Sistemas de Burbuja Fina*.

ANEXO C: CÁLCULOS DE VALIDACIÓN ADICIONALES

C.1 Verificación de Relaciones Paramétricas

Relación DQO/DBO:

$$\text{DQO/DBO} = 755.50 / 473.52 = 1.60$$

Interpretación: Valor típico de aguas residuales domésticas (rango normal: 1.5 - 2.0)

Factor de Calidad del Efluente:

$$\text{FCE} = \text{DQO/DBO}_{\text{efluente}} = 103.40 / 20.62 = 5.01$$

Interpretación: Indica presencia de materia orgánica no biodegradable (valor aceptable < 6.0)

C.2 Cálculo de Cargas Contaminantes Removidas

Reducción Adicional Anual con Nuevo Diseño:

Parámetro	Reducción Adicional (mg/L)	Caudal (L/s)	Carga Removida Adicional (kg/día)
DBO	8.08	829.97	567.8 kg/día
DQO	31.50	829.97	2,213.5 kg/día
SST	17.00	829.97	1,194.6 kg/día

Impacto Ambiental Equivalente:

Población equivalente adicional servida = Carga DBO removida / Contribución per cápita

$$= 567.8 \text{ kg/día} / 0.054 \text{ kg/hab/día} = 10,515 \text{ habitantes adicionales servidos}$$

C.3 Análisis de Consistencia de Coeficientes KLa

Comparativa con Valores de Referencia:

Fuente	KLa (h ⁻¹)	Condiciones	Concordancia
Diseño Propuesto	0.3563	Q=3 L/s, d=0.5mm, T=18°C	-
Metcalf & Eddy	0.3 - 0.6	Difusores burbuja fina	DENTRO DE RANGO
WEF MOP 8	0.25 - 0.55	Aireación por difusión	DENTRO DE RANGO
SSI Aeration	0.32 - 0.58	Datos de fabricante	DENTRO DE RANGO

ANEXO D: CERTIFICACIÓN DE PARÁMETROS AMBIENTALES

D.1 Validación de Condiciones Locales - Cusco

Parámetros Ambientales Considerados:

- **Altitud:** 3,400 msnm (validado con datos SEDACUSCO)
- **Presión Atmosférica:** 65 kPa (corrección altimétrica aplicada correctamente)
- **Temperatura Media:** 18°C (basado en datos históricos 2023 PTAR San Jerónimo)
- **pH Promedio Afluyente:** 8.01 ± 0.38 (dentro de rango óptimo biológico)

D.2 Análisis de Compatibilidad Biológica

Condiciones para Microorganismos:

Parámetro	Rango Óptimo	Valor Proyectado	Compatibilidad
Oxígeno Disuelto	2.0 - 4.0 mg/L	3.5 mg/L	o ÓPTIMO
Temperatura	15 - 35°C	18°C	o FAVORABLE
pH	6.5 - 8.5	8.01	o DENTRO DE RANGO
DBO:N:P	100:5:1	Aproximado en afluyente	o BALANCE ADECUADO

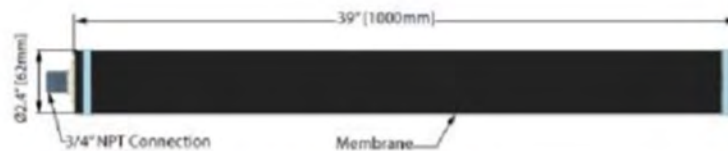
f. Especificaciones técnicas – Fabricante SSI Aeration



SSI AFT-N-21000 Tube Diffuser

What Makes the SSI AFT-N-21000 Tube Diffusers a world wide choice ?

SSI Tube diffusers are designed to offer high oxygen transfer efficiency, low pressure loss, and a simple installation. Our tube diffusers are available with a variety of membrane materials including our patented PTFE membranes designed to use less energy and require minimal maintenance. The one piece lightweight but strong ABS body makes handling during installation easy, provides temperature resistance up to 212°F (100°C), and is environmentally friendly. Our tube diffusers feature a channel style support tube which extends membrane life in on/off applications.



4 Tucker Drive
Poughkeepsie, New York 12603 USA
www.ssiaeration.com tel: +1 (845) 454-8171
email: info@ssiaeration.com fax: +1 (845) 454-8094

SSI APT-N-21000 Tube Diffuser

Unique System Strengths

Complete product line – creating the system that fits your needs

SSI manufactures disc diffusers, tube diffusers, and coarse bubble diffusers, and we mount these products on a wide range of piping materials including PVC, CPVC, PP and Stainless Steel. We have the ability to attach diffusers to pipe using saddles, grommets, or pre-assembled PODS. We can provide retrievable systems or fixed grids, and systems in kit form or mostly factory assembled. We try to understand and anticipate your needs, and fit our recommendations to your situation.

Piping system integrity – thicker wall pipe and double anchors for fewer breakages

Our piping is 38% thicker and has double rod support stands as standard – two anchors for each support location means twice the resistance to hydraulic and thermal loads. Most often supports fail due to temperature and water velocity. SSI locates two anchors where support is needed most, helping to increase product longevity.

Comprehensive design service and after sales support

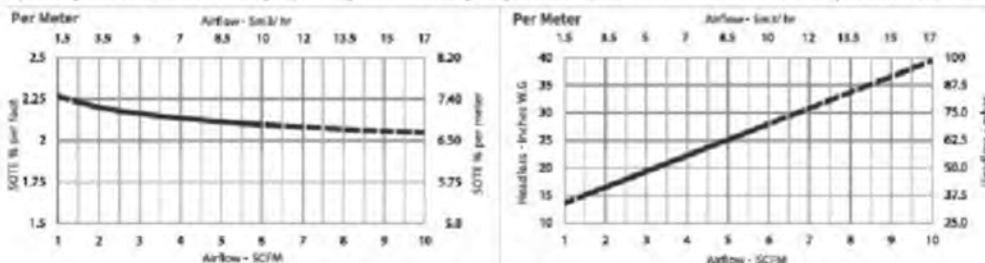
SSI provides full design services, including biological and mixing calculations, process simulations and hydraulic studies. We maintain a full drafting department with 3D and animation capabilities and we can assist with specifications and CAD drawings. Our service and installation crew can hold your hand during the early stages of the project and our worldwide multilingual staff is dedicated to your complete satisfaction.

New Channel style Tube Diffusers

After extensive research SSI designed our tube diffuser bodies to have a channel style support body. Through our research we found that this will extend the lifespan of the membrane particularly in on/off applications. The channel style body helps prevent folding of the membrane when the airflow is off and in turn increases the lifespan.

Avg Operating Condition per Meter	Peak Air Flow per Meter	Orifice Size	Slit Qty per Meter	Active Surface Area per Diffuser	Weight per Diffuser APT-N-21000
1.35 – 6.0 SCFM 2.3 – 10.0 Sm ³ /hr	10.0 SCFM 17.0 Sm ³ /hr	12mm	1/-27,850	1.625 ft ² 0.15 m ²	3.0 lbs 1.4 kg

Operating diffusers distant to average operating conditions range might leads to poor uniform distribution and subjected to rapid fouling.



Above curves are generated based on ideal condition. Actual curves for specified project/condition to be provided upon request.

Intelligent Upgrade Options

Patented PTFE membranes prolong efficiency and reduce whole-life costs

SSI's patented PTFE membrane barrier properties not only reduce plasticizer extraction, shrinking, and membrane hardening but also limit dynamic changes that can result from swell, such as creep. Compared with uncoated products that are more susceptible to increases in DWP due to more aggressive fouling and changes in physical properties and weight, the PTFE coated membrane improves consistency of DWP (Headloss) values over the product life. This directly impacts long-term power costs and the ability of the system to distribute air uniformly across the tank floor.

SSI Telemetry – the inside story solves maintenance problems

At the click of a mouse, you will know the DWP of your diffuser membranes, airflow rate to those monitored diffusers, and air temperature in the submerged piping system. You can sense vibration, pipe roll over, and water in the grid. Automatic moisture purging and automatic acid dosing systems are available. Through multiple cameras, you can see both inside the grids, and surface bubble patterns. Wet probes are also available for DO and WW temperature. Tracking all this data on a user-friendly online dashboard facilitates communication between consultant and client, manufacturer and rep. This smart technology lets you locate problem areas and allocate resources more efficiently. SSI Telemetry is your preventive maintenance hub in the heart of the plant.



www.ssi-aeration.com

g. Especificaciones técnicas – Fabricante Barmatec



DIFUSORES TUBULARES TUBULAR DIFFUSERS

Ventajas / Advantages:

- Modo de operación: continuo / discontinuo
Mode of operation: continuous / discontinuous
- Difusores de alta eficiencia: ahorro energético
High efficiency diffusers: energy saving
- Mayor área activa de difusor
Larger active diffuser area
- Evita la coalescencia
Prevents coalescence

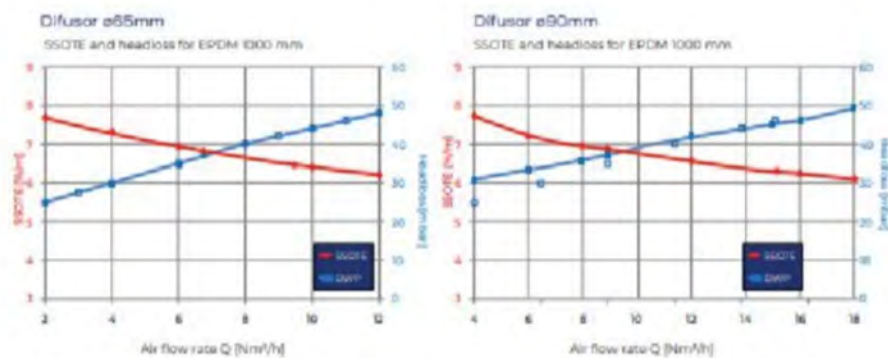
Soportes / Supports:



Abrazadera
(Tubería redonda)

Conector inox
(Tubería cuadrada)

Soporte final
difusor



SPECIALISTS IN AERATION SYSTEMS

barmatec@barmatec.es / +34 938 788 734



DIFUSOR Ø65 / Ø90MM

Características de operación del difusor / Diffuser operating characteristics:

	Perforated Length (mm)	Total length (mm)	Operation flow rate (Nm ³ /h)	Maximum overload flow rate (Nm ³ /h)	Perforated area (m ²)	
					EPDM + SI	PU
Ø65	1000	1080	2-12	20	0,18	0,16
	750	830	1,5-9	15	0,135	0,12
	500	580	1-6	10	0,09	0,08
Ø90	1000	1145	4-18	28	0,24	0,24
	750	895	3-14	21	0,18	0,18
	500	645	2-9	14	0,12	0,12

Material de la membrana / Membrane materials:



Material	Air operation temperature (°C)	Water operation temperature (°C)	Wall thickness (mm)
EPDM	5-80	5-40	1,9 ± 0,15
Silicone	5-100	5-40	1,5 ± 0,15
PU	5-80	5-40	0,6 ± 0,1

ESPECIALISTAS EN SISTEMAS DE AIREACIÓN

www.aznoro.com

h. Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM

El Peruano

Lima, miércoles 17 de marzo de 2010



NORMAS LEGALES

415675

de impuestos o de derechos aduaneros de ninguna clase o denominación.

Artículo 5°.- La presente Resolución Suprema será refrendada por el Presidente del Consejo de Ministros.

Regístrese, comuníquese y publíquese.

ALAN GARCÍA PÉREZ

Presidente Constitucional de la República

JAVIER VELASQUEZ QUESQUÉN

Presidente del Consejo de Ministros

469446-6

AMBIENTE

Aprueba Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales

**DECRETO SUPREMO
N° 003-2010-MINAM**

EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA

CONSIDERANDO:

Que, el artículo 3° de la Ley N° 28611, Ley General del Ambiente, dispone que el Estado, a través de sus entidades y órganos correspondientes, diseña y aplica, las políticas, normas, instrumentos, incentivos y sanciones que sean necesarias para garantizar el efectivo ejercicio de los derechos y el cumplimiento de las obligaciones y responsabilidades contenidas en dicha ley;

Que, el numeral 32.1 del artículo 32° de la Ley General del Ambiente define al Límite Máximo Permissible - LMP, como la medida de concentración o grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un efluente o una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente. Su determinación corresponde al Ministerio del Ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente por el Ministerio del Ambiente y los organismos que conforman el Sistema Nacional de Gestión Ambiental. Los criterios para la determinación de la supervisión y sanción serán establecidos por dicho Ministerio;

Que, el numeral 33.4 del artículo 33° de la Ley N° 28611 en mención dispone que, en el proceso de revisión de los parámetros de contaminación ambiental, con la finalidad de determinar nuevos niveles de calidad, se aplique el principio de la gradualidad, permitiendo ajustes progresivos a dichos niveles para las actividades en curso;

Que, el literal d) del artículo 7° del Decreto Legislativo N° 1013, Ley de Creación, Organización y Funciones del Ministerio del Ambiente - MINAM, establece como función específica de dicho Ministerio, elaborar los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y Límites Máximos Permisibles (LMP), de acuerdo con los planes respectivos. Deben contar con la opinión del sector correspondiente, debiendo ser aprobados mediante Decreto Supremo;

Que, mediante Resolución Ministerial N° 121-2009-MINAM, se aprobó el Plan de Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y Límites Máximos Permisibles (LMP) para el año fiscal 2009 que contiene dentro de su anexo la elaboración del Límite Máximo Permissible para los efluentes de Plantas de Tratamiento de fuentes domésticas;

Que el artículo 14° del Reglamento de la Ley del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) aprobado mediante Decreto Supremo N° 019-2009-MINAM, establece que el proceso de evaluación de impacto ambiental comprende medidas que aseguren, entre otros, el cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental, los Límites Máximos Permisibles y otros parámetros y requerimientos aprobados de acuerdo a la legislación ambiental vigente; del mismo modo, en su artículo 28° el citado reglamento señala que, la modificación del estudio ambiental o la aprobación de instrumentos de gestión ambiental complementarios,

implica necesariamente y según corresponda, la actualización de los planes originalmente aprobados al emitirse la Certificación Ambiental;

De conformidad con lo dispuesto en el numeral 8) del artículo 116° de la Constitución Política del Perú, y el numeral 3 del artículo 11° de la Ley N° 28158, Ley Orgánica del Poder Ejecutivo;

DECRETA:

Artículo 1°.- Aprobación de Límites Máximos Permisibles (LMP) para efluentes de Plantas de Tratamiento de Agua Residuales Domésticas o Municipales (PTAR)

Aprobar los Límites Máximos Permisibles para efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales, los que en Anexo forman parte integrante del presente Decreto Supremo y que son aplicables en el ámbito nacional.

Artículo 2°.- Definiciones

Para la aplicación del presente Decreto Supremo se utilizarán los siguientes términos:

- **Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (PTAR):** Infraestructura y procesos que permiten la depuración de las aguas residuales Domésticas o Municipales.

- **Límite Máximo Permissible (LMP):** Es la medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente por el MINAM y los organismos que conforman el Sistema de Gestión Ambiental.

- **Protocolo de Monitoreo:** Procedimientos y metodologías establecidas por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento en coordinación con el MINAM y que deben cumplirse en la ejecución de los Programas de Monitoreo.

Artículo 3°.- Cumplimiento de los Límites Máximos Permisibles de Efluentes de PTAR

3.1 Los LMP de efluentes de PTAR que se establecen en la presente norma entran en vigencia y son de cumplimiento obligatorio a partir del día siguiente de su publicación en el Diario Oficial El Peruano.

3.2 Los LMP aprobados mediante el presente Decreto Supremo, no serán de aplicación a las PTAR con tratamiento preliminar avanzado o tratamiento primario que cuenten con disposición final mediante emisario submarino.

3.3. Los titulares de las PTAR que se encuentren en operación a la dación del presente Decreto Supremo y que no cuenten con certificación ambiental, tendrán un plazo no mayor de dos (02) años, contados a partir de la publicación del presente Decreto Supremo, para presentar ante el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento su Programa de Adecuación y Manejo Ambiental; autoridad que definirá el respectivo plazo de adecuación.

3.4 Los titulares de las PTAR que se encuentren en operación a la dación del presente Decreto Supremo y que cuenten con certificación ambiental, tendrán un plazo no mayor de tres (03) años, contados a partir de la publicación del presente Decreto Supremo, para presentar ante el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, la actualización de los Planes de Manejo Ambiental de los Estudios Ambientales; autoridad que definirá el respectivo plazo de adecuación.

Artículo 4°.- Programa de Monitoreo

4.1 Los titulares de las PTAR están obligados a realizar el monitoreo de sus efluentes, de conformidad con el Programa de Monitoreo aprobado por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. El Programa de Monitoreo especificará la ubicación de los puntos de control, métodos y técnicas adecuadas; así como los parámetros y frecuencia de muestreo para cada uno de ellos.



4.2 El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento podrá disponer el monitoreo de otros parámetros que no estén regulados en el presente Decreto Supremo, cuando existan indicios razonables de riesgo a la salud humana o al ambiente.

4.3 Solo será considerado válido el monitoreo conforme al Protocolo de Monitoreo establecido por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, realizado por Laboratorios acreditados ante el Instituto Nacional de Defensa del Consumidor y de la Propiedad Intelectual - INDECOPI.

Artículo 5º.- Resultados de monitoreo

5.1 El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento es responsable de la administración de la base de datos del monitoreo de los efluentes de las PTAR, por lo que los titulares de las actividades están obligados a reportar periódicamente los resultados del monitoreo de los parámetros regulados en el Anexo de la presente norma, de conformidad con los procedimientos establecidos en el Protocolo de Monitoreo aprobado por dicho Sector.

5.2 El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento deberá elaborar y remitir al Ministerio del Ambiente dentro de los primeros noventa (90) días de cada año, un informe estadístico a partir de los datos de monitoreo presentados por los Titulares de las PTAR, durante el año anterior, lo cual será de acceso público a través del portal institucional de ambas entidades.

Artículo 6º.- Fiscalización y Sanción

La fiscalización del cumplimiento de los LMP y otras disposiciones aprobadas en el presente Decreto Supremo estará a cargo de la autoridad competente de fiscalización, según corresponda.

Artículo 7º.- Refrendo

El presente Decreto Supremo será refrendado por el Ministro del Ambiente y por el Ministro de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

DISPOSICIÓN COMPLEMENTARIA FINAL

Única.- El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, en coordinación con el MINAM, aprobará el Protocolo de Monitoreo de Efluentes de PTAR en un plazo no mayor a doce (12) meses contados a partir de la vigencia del presente dispositivo.

Dado en la Casa de Gobierno, en Lima, a los dieciséis días del mes de marzo del año dos mil diez.

ALAN GARCÍA PÉREZ
Presidente Constitucional de la República

ANTONIO JOSÉ BRACK EGG
Ministro del Ambiente

JUAN SARMIENTO SOTO
Ministro de Vivienda, Construcción y Saneamiento

ANEXO

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA LOS EFLENTES DE PTAR

PARAMETRO	UNIDAD	LMP DE EFLENTES PARA VERTIDOS A CUERPOS DE AGUAS
Aceites y grasas	mg/L	20
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	10,000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	200
pH	unidad	6.5-8.5
Sólidos Totales en Suspensión	mL/L	150
Temperatura	°C	<35

469446-2

Designan responsable de brindar información pública y del contenido del portal de internet institucional del Ministerio

RESOLUCIÓN MINISTERIAL Nº 036-2010-MINAM

Lima, 16 de marzo de 2010

CONSIDERANDO:

Que, mediante Decreto Legislativo Nº 1013, se aprobó la Ley de Creación, Organización y Funciones del Ministerio del Ambiente;

Que, la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública, cuyo Texto Único Ordenado fue aprobado por Decreto Supremo Nº 043-2003-PCM, tiene por finalidad promover la transparencia de los actos del Estado y regular el derecho fundamental del acceso a la información consagrado en el numeral 5 del artículo 2º de la Constitución Política del Perú;

Que, el artículo 3º de la citada Ley, señala que el Estado tiene la obligación de entregar la información que demanden las personas en aplicación del principio de publicidad, para cuyo efecto se designa al funcionario responsable de entregar la información solicitada;

Que, asimismo, de acuerdo a lo previsto en el artículo 5º de la mencionada Ley, las Entidades Públicas deben identificar al funcionario responsable de la elaboración de los Portales de Internet;

Que, mediante Resolución Ministerial Nº 070-2008-MINAM, se designó a la señorita Cristina Miranda Beas, como funcionaria responsable de brindar información que demanden las personas, y responsable del contenido de la información ofrecida en el Portal de Internet del Ministerio del Ambiente;

Que, por razones de servicio y considerando la renuncia al cargo que desempeñaba en el Ministerio del Ambiente la servidora citada en el considerando precedente, resulta necesario designar al personal responsable de brindar información en el marco de la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública y responsable del Portal de Internet Institucional;

Con el visado de la Secretaría General y de la Oficina de Asesoría Jurídica; y

De conformidad con lo establecido en el Decreto Legislativo Nº 1013, Ley de Creación, Organización y Funciones del Ministerio del Ambiente; el Texto Único Ordenado de la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública, aprobado por Decreto Supremo Nº 043-2003-PCM; y el Decreto Supremo Nº 007-2008-MINAM que aprueba el Reglamento de Organización y Funciones del Ministerio del Ambiente;

SE RESUELVE:

Artículo 1º.- Designar al abogado Hugo Milko Ortega Polar como Responsable de brindar la información pública del Ministerio del Ambiente y Responsable del contenido de la información ofrecida en el Portal de Internet Institucional, de conformidad con el Texto Único Ordenado de la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública, aprobado por Decreto Supremo Nº 043-2003-PCM.

Artículo 2º.- Todos los órganos del Ministerio del Ambiente, bajo responsabilidad, deberán facilitar la información y/o documentación que les sea solicitada como consecuencia de lo dispuesto en el artículo precedente, dentro de los plazos establecidos en la normatividad vigente.

Artículo 3º.- Disponer que la presente Resolución se publique en el Diario Oficial El Peruano y en Portal de Internet del Ministerio del Ambiente.

Artículo 4º.- Notificar la presente Resolución a todos los órganos del Ministerio del Ambiente, al Órgano de Control Institucional y al responsable designado.

Regístrese, comuníquese y publíquese.

ANTONIO JOSÉ BRACK EGG
Ministro del Ambiente

469445-1

i. Rugosidad absoluta – UNAM

RUGOSIDAD ABSOLUTA

MATERIAL	ϵ en mm
TUBO LISO	
De vidrio, cobre latón, madera (bien cepillada), acero nuevo soldado y con una mano inferior de pintura; tubo de acero de precisión sin costura, serpentines industriales, plástico, hule.	0.0015
Tubos industriales de latón	0.025
Tubos de madera	0.2 a 1
Hierro forjado	0.05
Hierro Fundido nuevo	0.25
Hierro fundido, con protección inferior de asfalto	0.12
Hierro fundido oxidado	1 a 1.5
Hierro fundido, con incrustaciones	1.5 a 3
Hierro fundido centrifugado	0.05
Hierro fundido nuevo, con bridas o juntas de macho y campana	0.15 a 0.3
Hierro fundido usado, con bridas o juntas de macho y campana	2 a 3.5
Hierro fundido para agua potable, con bastantes incrustaciones y diámetro de 50 a 125 mm	1 a 40
Hierro galvanizado	0.15
Acero rolado nuevo	0.05
Acero laminado, nuevo	0.04 a 0.1
Acero laminado con protección interior de asfalto	0.05

TUBOS DE ACERO SOLDADO DE CALIDAD NORMAL	
Nuevo	0.05 a 0.10
Limpiado después de mucho uso	0.15 a 0.20
Moderadamente oxidado, con pocas incrustaciones	0.4
Con muchas incrustaciones	3
Con remaches transversales, en buen estado	0.1
Con costura longitudinal y una línea transversal de remaches en cada junta, o bien laqueado interiormente	0.3 a 0.4
Con líneas transversales de remaches, sencilla o doble; o tubos remachados con doble hilera longitudinal de remaches e hileras transversales sencilla, sin incrustaciones	0.6 a 0.7
Acero soldado, con hilera transversal sencilla de pernos en cada junta, laqueado interior, sin oxidaciones con circulación de agua tibia	1.0
Acero soldado, con doble hilera transversal de pernos, agua turbia, tuberías remachadas con doble costura longitudinal de remaches y transversal sencilla, interior asfaltado o laqueado	1.2 a 1.3
Acero soldado, con costura doble de remaches transversales, muy oxidado. Acero remachado, de cuatro a seis filas longitudinales de remaches, con mucho tiempo de servicio	2.0

MATERIAL	ϵ en mm
TUBOS REMACHADOS, CON FILAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES	
a) Espesor de lámina < 5 mm	0.65
b) Espesor de lámina de 5 a 12 mm	1.95
c) Espesor de lámina > 12mm o entre 6 y 12 mm, si las hileras de pernos tienen cubrejuntas	3
d) Espesor de lámina > 12 mm con cubrejuntas	5.5
Tubos remachados, con cuatro filas transversales y seis longitudinales con cubrejuntas interiores	4
Asbesto-cemento nuevo	0.025
Asbesto-cemento con protección interior de asfalto	0.0015
Concreto centrifugado, nuevo	0.16
Concreto centrifugado, con protección bituminosa	0.0015 a 0.125
Concreto en galerías, colado con cimbra normal de madera	1 a 2
Concreto en galería, colado con cimbra rugosa de madera	10
Concreto armado en tubos y galerías, con acabado interior cuidadosamente terminado a mano	0.01
Concreto de acabado liso	0.025
Conductos de concreto armado, con acabado liso y varios años de servicio	0.2 a 0.3
Concreto alisado interiormente con cemento	0.25
Galerías con acabado interior de cemento	1.5 a 1.6
Concreto con acabado normal	1 a 3
Concreto con acabado rugoso	10
Cemento liso	0.3 a 0.8
Cemento no pulido	1 a 2
Concreto presforzado Freyssinet	0.04
Concreto presforzado Bona y Socoman	0.25
Mampostería de piedra, bien junteada	1.2 a 2.5
Mampostería de piedra rugosa, sin juntear	8 a 15
Mampostería de piedra, mal acabada	1.5 a 3

MATERIAL	ϵ en mm
OTROS MATERIALES	
Plástico (PE,PVC)	0.0015
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	0.01
Tubos estirados de acero	0.0024
Tubos de latón o cobre	0.0015
Fundición revestida de cemento	0.0024
Fundición con revestimiento bituminoso	0.0024
Fundición centrifugada	0.003
Fundición asfaltada	0.06 a 0.18
Fundición	0.12 a 0.60
Acero comercial y soldado	0.03 a 0.09
Hierro forjado	0.03 a 0.09
Hierro Galvanizado	0.06 a 0.24
Madera	0.18 a 0.90
Hormigón	0.3 a 3.0

j. Código de Matlab para ejecución de la Simulación 01

```
model = 'modelo_simulacion1';
open_system(new_system(model));

add_block('simulink/Sources/Step', [model, '/Step']);
set_param([model, '/Step'], 'Time', '0', 'Before', '0', 'After', '1');

add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn', [model, '/Diseño A']);
set_param([model, '/Diseño A'], 'Numerator', '0.1651', 'Denominator', '[1 0.1651]');

add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn', [model, '/Diseño B']);
set_param([model, '/Diseño B'], 'Numerator', '0.1635', 'Denominator', '[1 0.1635]');

add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn', [model, '/Diseño C']);
set_param([model, '/Diseño C'], 'Numerator', '0.1663', 'Denominator', '[1 0.1663]');

add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn', [model, '/Diseño D']);
set_param([model, '/Diseño D'], 'Numerator', '0.1701', 'Denominator', '[1 0.1701]');

add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn', [model, '/Diseño E']);
set_param([model, '/Diseño E'], 'Numerator', '0.1781', 'Denominator', '[1 0.1781]');

add_line(model, 'Step/1', 'Diseño A/1');
add_line(model, 'Step/1', 'Diseño B/1');
add_line(model, 'Step/1', 'Diseño C/1');
add_line(model, 'Step/1', 'Diseño D/1');
add_line(model, 'Step/1', 'Diseño E/1');

add_block('simulink/Sinks/Scope', [model, '/Scope']);
set_param([model, '/Scope'], 'NumInputPorts', '6');

add_line(model, 'Step/1', 'Scope/1');
add_line(model, 'Diseño A/1', 'Scope/2');
add_line(model, 'Diseño B/1', 'Scope/3');
add_line(model, 'Diseño C/1', 'Scope/4');
add_line(model, 'Diseño D/1', 'Scope/5');
add_line(model, 'Diseño E/1', 'Scope/6');

set_param(model, 'Solver', 'ode45', 'StopTime', '40');
sim(model);
open_system([model, '/Scope']);
set_param([model, '/Scope'], 'ShowLegend', 'on');
```

k. Código de Matlab para ejecución de la Simulación 02

```
model = 'modelo_simulacion2';
open_system(new_system(model));

add_block('simulink/Sources/Step', [model, '/Step']);
set_param([model, '/Step'], 'Time', '0', 'Before', '0', 'After', '1');

add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn', [model, '/Diseño E-1']);
set_param([model, '/Diseño E-1'], 'Numerator', '0.3563', 'Denominator', '[1 0.3563]');

add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn', [model, '/Diseño E-2']);
set_param([model, '/Diseño E-2'], 'Numerator', '0.2655', 'Denominator', '[1 0.2655]');

add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn', [model, '/Diseño E-3']);
set_param([model, '/Diseño E-3'], 'Numerator', '0.2209', 'Denominator', '[1 0.2209]');

add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn', [model, '/Diseño E-4']);
set_param([model, '/Diseño E-4'], 'Numerator', '0.1932', 'Denominator', '[1 0.1932]');

add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn', [model, '/Diseño E-5']);
set_param([model, '/Diseño E-5'], 'Numerator', '0.1781', 'Denominator', '[1 0.1781]');

add_line(model, 'Step/1', 'Diseño E-1/1');
add_line(model, 'Step/1', 'Diseño E-2/1');
add_line(model, 'Step/1', 'Diseño E-3/1');
add_line(model, 'Step/1', 'Diseño E-4/1');
add_line(model, 'Step/1', 'Diseño E-5/1');

add_block('simulink/Sinks/Scope', [model, '/Scope']);
set_param([model, '/Scope'], 'NumInputPorts', '6');

add_line(model, 'Step/1', 'Scope/1');
add_line(model, 'Diseño E-1/1', 'Scope/2');
add_line(model, 'Diseño E-2/1', 'Scope/3');
add_line(model, 'Diseño E-3/1', 'Scope/4');
add_line(model, 'Diseño E-4/1', 'Scope/5');
add_line(model, 'Diseño E-5/1', 'Scope/6');

set_param(model, 'Solver', 'ode45', 'StopTime', '40');
sim(model);
open_system([model, '/Scope']);
set_param([model, '/Scope'], 'ShowLegend', 'on');
```

I. Código de Matlab para ejecución de la Simulación 03

```
model = 'modelo_simulacion3';
open_system(new_system(model));

add_block('simulink/Sources/Step', [model, '/Step']);
set_param([model, '/Step'], 'Time', '0', 'Before', '0', 'After', '1');

add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn', [model, '/16°C']);
set_param([model, '/16°C'], 'Numerator', '0.3355', 'Denominator', '[1 0.3355]');

add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn', [model, '/17°C']);
set_param([model, '/17°C'], 'Numerator', '0.3457', 'Denominator', '[1 0.3457]');

add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn', [model, '/18°C']);
set_param([model, '/18°C'], 'Numerator', '0.3563', 'Denominator', '[1 0.3563]');

add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn', [model, '/19°C']);
set_param([model, '/19°C'], 'Numerator', '0.3671', 'Denominator', '[1 0.3671]');

add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn', [model, '/20°C']);
set_param([model, '/20°C'], 'Numerator', '0.3783', 'Denominator', '[1 0.3783]');

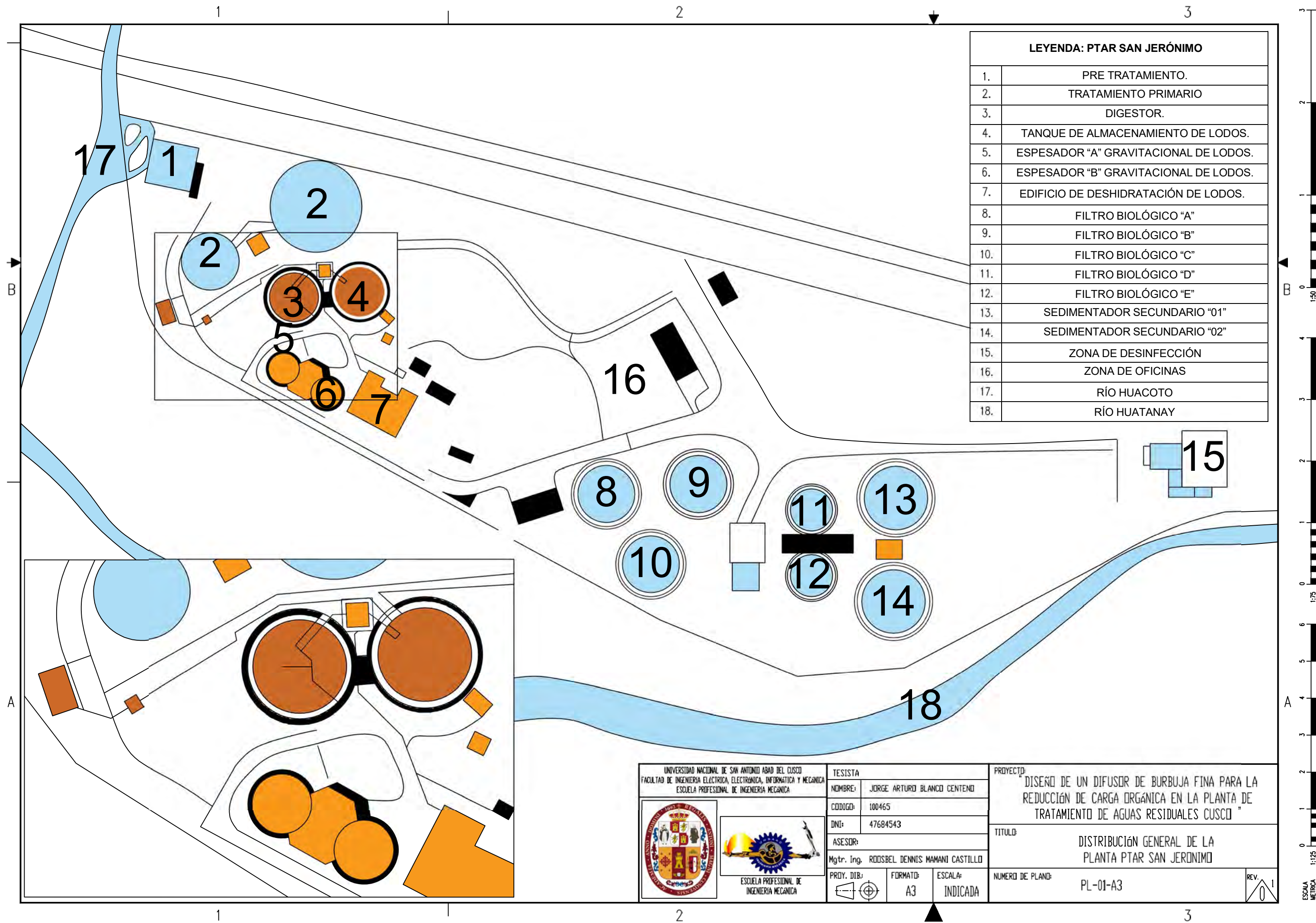
add_line(model, 'Step/1', '16°C/1');
add_line(model, 'Step/1', '17°C/1');
add_line(model, 'Step/1', '18°C/1');
add_line(model, 'Step/1', '19°C/1');
add_line(model, 'Step/1', '20°C/1');

add_block('simulink/Sinks/Scope', [model, '/Scope']);
set_param([model, '/Scope'], 'NumInputPorts', '6');

add_line(model, 'Step/1', 'Scope/1');
add_line(model, '16°C/1', 'Scope/2');
add_line(model, '17°C/1', 'Scope/3');
add_line(model, '18°C/1', 'Scope/4');
add_line(model, '19°C/1', 'Scope/5');
add_line(model, '20°C/1', 'Scope/6');

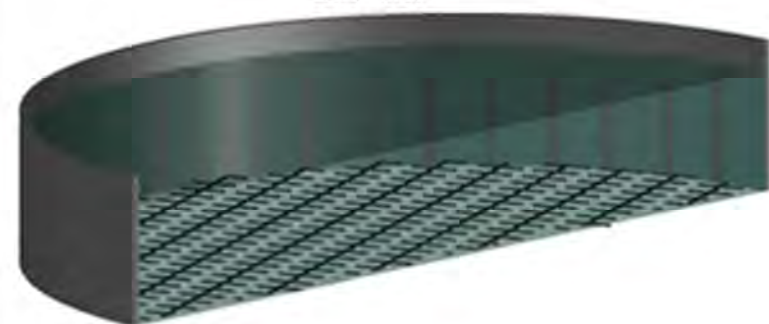
set_param(model, 'Solver', 'ode45', 'StopTime', '40');
sim(model);
open_system([model, '/Scope']);
set_param([model, '/Scope'], 'ShowLegend', 'on');
```

m. Planos de construcción y croquis de planta.

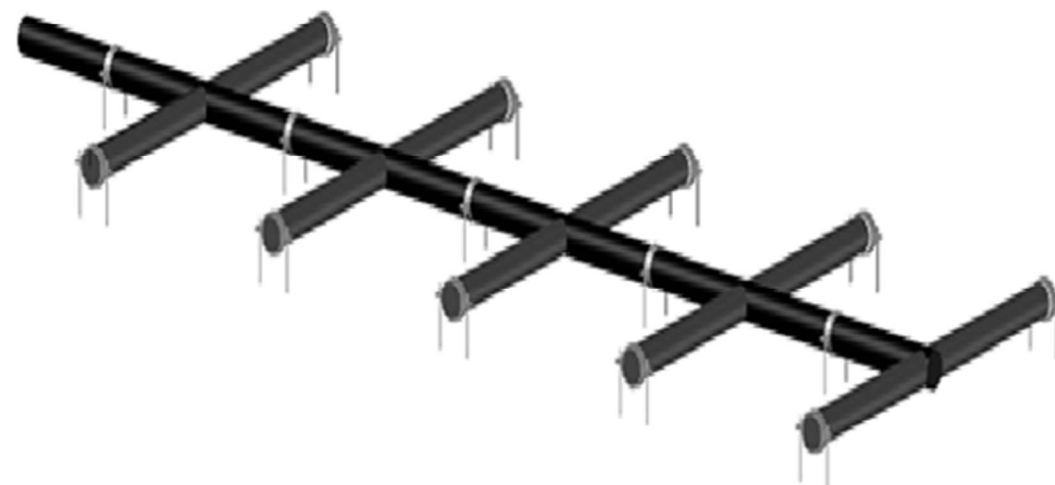




DISTRIBUCIÓN GENERAL
VISTA ISOMETRICA
ESCALA 1:400



DISTRIBUCIÓN GENERAL
VISTA ISOMETRICA
ESCALA 1:400



DETALLE DIFUSORES
VISTA ISOMETRICA
ESCALA 1:50

PINTURAS

PINTURA

- ARENADO: SSPC SP 6
- PINTURA EPOXICA: RAL 5017, A 6 MILS

NOTAS:

1. TODAS LAS MEDIDAS SE ENCUENTRAN EN MILIMETROS Y LOS NIVELES EN METROS SALVO INDICACION CONTRARIA
2. LOS SOLDADORES DEBERAN SER CALIFICADOS Y CERTIFICADOS.
3. TOLERANCIA ENTRE AGUJEROS $\pm 1.0mm$
4. EL MATERIAL DE LOS COMPONENTES SE DETALLAN EN LA TABLA DE ESPECIFICACIONES TECNICAS

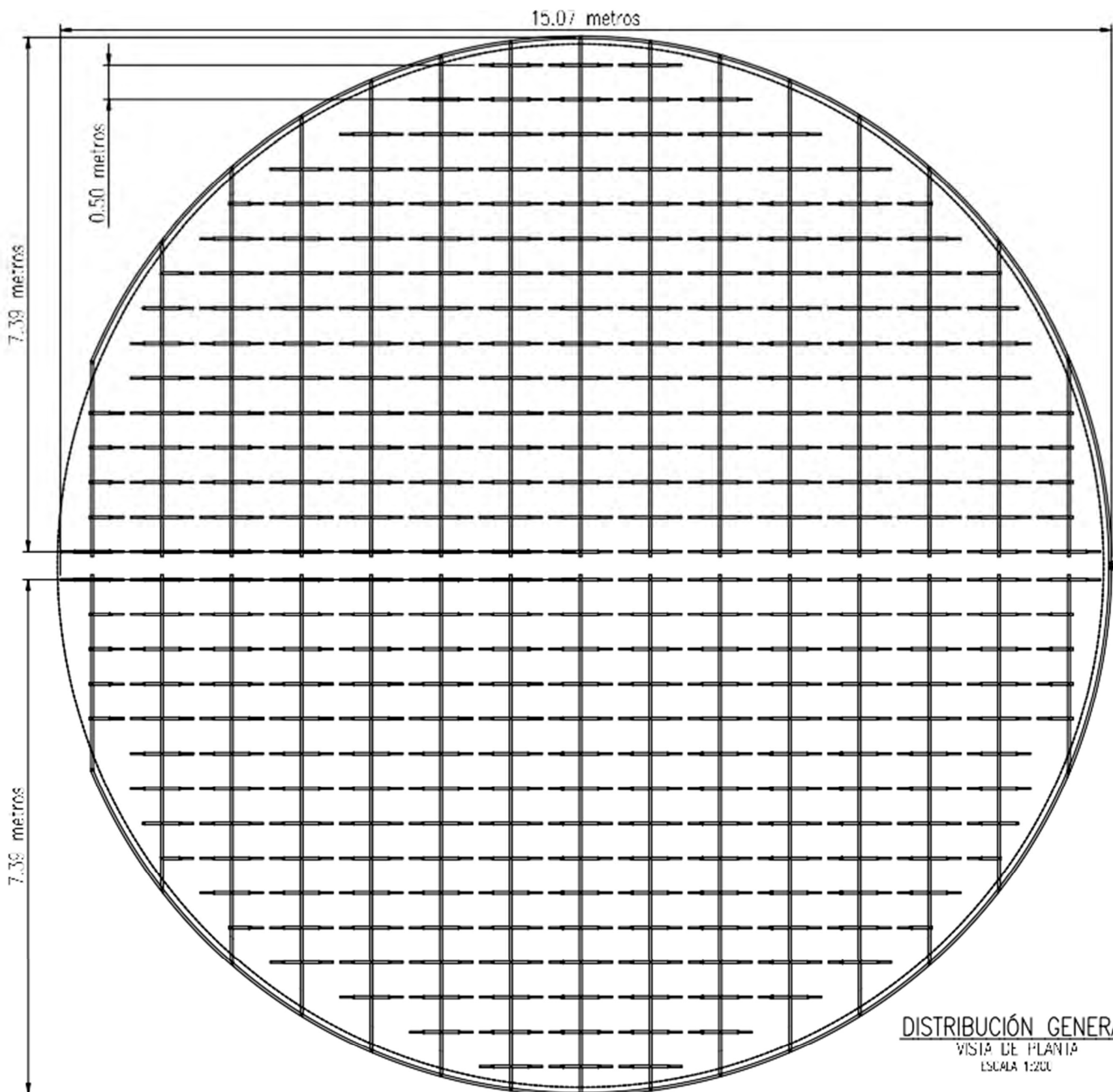
ESPECIFICACIONES TECNICAS

ACERO

- BARRANDAS SCH 40 (ASTM A53-A/ASTM A500-B)

CONEXIONES PERNADAS

- PERNOS GALVANIZADA DE HILO CORRIDO* (ASTM A325-TIPO 3)
- TUERCAS GALVANIZADA* (ASTM A153)
- ARANDELAS GALVANIZADA* (ASTM A153)
- * GALVANIZADO SEGUN NORMA (ASTM F1552)



DISTRIBUCIÓN GENERAL
VISTA DE PLANTA
ESCALA 1:200

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTROELECTRONICA INDUSTRIAL Y MECANICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA



ESCUELA PROFESIONAL DE
INGENIERIA MECANICA

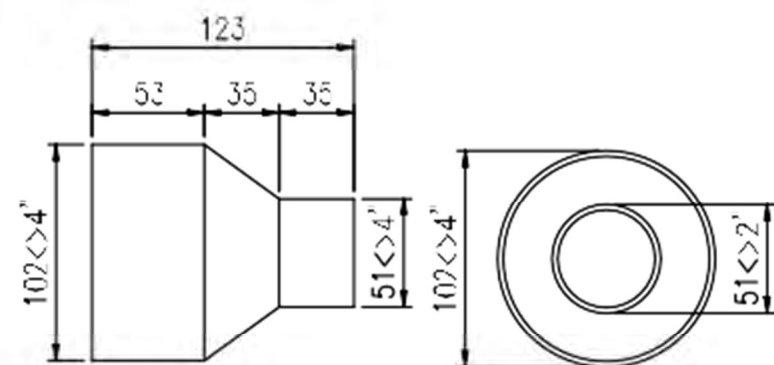
TESTISTA	
NOMBRE:	JORGE ARTURO BLANCO CENTENO
NUMERO:	10460
UNI:	4758434
ASESOR	
Mgtr. Ing. KUSHEL JENNIS RAMAN LASTILLI	
PROY. DIB.	FORMATO
ESCALA	INDICADA

PROYECTO	
"DISEÑO DE UN DIFUSOR DE BURBUJA FINA PARA LA REDUCCIÓN DE CARGA ORGANICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CUSCO"	
TITULO	
DISTRIBUCIÓN GENERAL DE DIFUSORES DE BURBUJA FINA	
NUMERO DE PLANO	PL-02-A3
REV.	01





DISPOSITIVO DE ISOMETRICO
VISTA FRONTAL
ESCALA 1:5

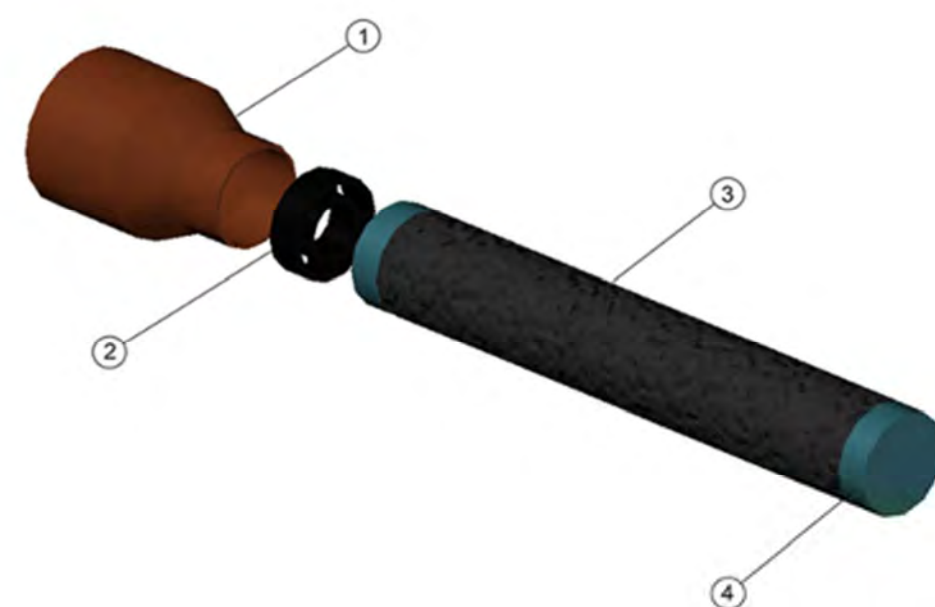


DISPOSITIVO DE VENTURI
VISTA LATERAL
ESCALA 1:5

DISPOSITIVO DE VENTURI
VISTA FRONTAL
ESCALA 1:5



ENSAMBLAJE DE DIFUSOR
VISTA ISOMETRICA
ESCALA 1:5

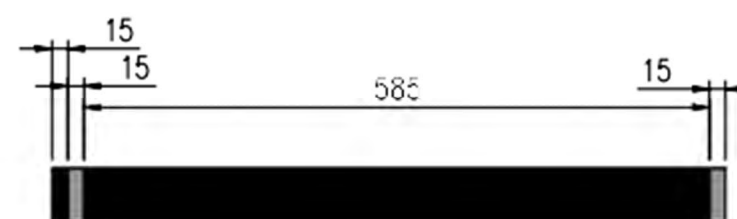


ENSAMBLAJE DE DIFUSOR
VISTA DE EXPLOSION
ESCALA 1:5

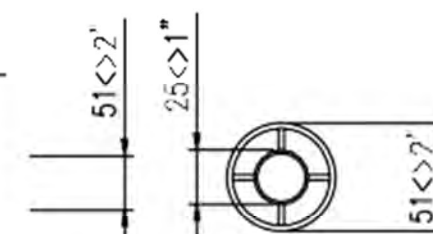
LISTA DE PIEZA		
N.º	PIEZA	CANT.
1	DISPOSITIVO VENTURI	1
2	POLICLORURO DE VINILO 2" (PVC)	1
3	EPDM (MONOMERO DE ETILENO)	1
4	POLICLORURO DE VINILO (PVC)	1



DIFUSOR DE BURBUJA
VISTA ISOMETRICA
ESCALA 1:20



DIFUSOR DE BURBUJA
VISTA LATERAL
ESCALA 1:10



DIFUSOR DE BURBUJA
VISTA FRONTAL
ESCALA 1:5

PINTURAS

PINTURA

- ARENADO: SSPC SP 6
- PINTURA EPOXICA: RAL 5017, A 6 MILS

NOTAS:

1. TODAS LAS MEDIDAS SE ENCUENTRAN EN MILIMETROS Y LOS NIVELES EN METROS SALVO INDICACION CONTRARIA
2. LOS SOLDADORES DEBERAN SER CALIFICADOS Y CERTIFICADOS.
3. TOLERANCIA ENTRE AGUJEROS $\pm 1.0mm$
4. EL MATERIAL DE LOS COMPONENTES SE DETALLAN EN LA TABLA DE ESPECIFICACIONES TECNICAS

ESPECIFICACIONES TECNICAS

ACERO

- BARRANDAS SCH 40 (ASTM A53-A/ASTM A500-B)

CONEXIONES PERNADAS

- PERNAS GALVANIZADA DE HILO CORRIDA* (ASTM A325-TIPO 3)
- TUERCAS GALVANIZADA* (ASTM A153)
- ARANDELAS GALVANIZADA* (ASTM A153)
- * GALVANIZADO SEGUN NORMA (ASTM F1852)

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTROELECTRONICA INDUSTRIAL Y MECANICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA



TESTISTA		
NOMBRE	JORGE ARTURO BLANCO CENTENO	
NUMERO	10490	
UNI	4758434	
ASESOR	Mgtr. Ing. KUSHEL JUANIS RAMAN LASTILLI	
PROY. LUG.	FORMATO	ESCALA
	AC	INDICADA

PROYECTO	
"DISEÑO DE UN DIFUSOR DE BURBUJA FINA PARA LA REDUCCION DE CARGA ORGANICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CUSCO"	
TITULO	
DIFUSOR DE BURBUJA FINA	
NUMERO DE PLANO	
PL-03-A3	
REV.	
01	