



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“EVALUACIÓN DE FACTORES QUE DEFINEN LA  
TRANSFERENCIA DE OXÍGENO (SOTE) EN UN SISTEMA  
DE DIFUSIÓN DE AIRE PARA UN PROCESO DE LODOS  
ACTIVADOS Y SU IMPACTO EN EL AHORRO  
ENERGÉTICO”**

**TESIS  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERA QUÍMICA**

**PRESENTA:  
SANDRA GUERRA GARCÍA**



**CIUDAD DE MÉXICO**

**2022**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:**                   **Profesor:** Juan Mario Morales Cabrera  
**VOCAL:**                           **Profesor:** José Fernando Barragán Arroche  
**SECRETARIO:**               **Profesor:** Carlos Álvarez Maciel  
**1er. SUPLENTE:**           **Profesor:** Alejandra Mendoza Campos  
**2° SUPLENTE:**               **Profesor:** David Fragoso Osorio

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:** Ciudad de México

**ASESOR DEL TEMA:**

---

**Juan Mario Morales Cabrera**

**SUSTENTANTE:**

---

**Sandra Guerra García**

## *Agradecimientos*

Al profesor Juan Mario por su confianza, enseñanza y por ser un ejemplo en la docencia.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por su extraordinaria labor social, pues siendo una institución pública, brinda acceso a educación de excelencia a personas de todos los estratos sociales. Es un orgullo ser parte de su comunidad.

Mi especial reconocimiento y agradecimiento a Aurora, mi madre, por ser mi ejemplo a seguir, base de mi educación, ideales, valores y pensamiento crítico. Este logro también es tuyo. A Miguel, mi padre, por su ejemplo de optimismo, constancia y alegría ante las adversidades, su visión de la vida ha sido un referente y gran apoyo.

A mis hermanos: Janet, gracias por significar protección, solidaridad y amor y a Miguel por ser mi compañero y más grande amigo.

A Francisco y Andrés por ser mi equipo durante mi formación profesional dentro y fuera de las aulas, brindándome su afecto, apoyo y amistad en todo momento.

A Norma y Janinne por guiarme y darme las herramientas para cumplir este objetivo, su apoyo fue determinante.

A Saúl por impulsarme, inspirarme y su valiosa compañía.

A las mujeres que han luchado y luchan por nuestra autonomía, seguridad y que han hecho posible nuestro acceso a la educación. Igualmente, a las primeras ingenieras que abrieron camino en el gremio a nuevas generaciones.

¡GRACIAS!

---

# Índice

<b>Lista de definiciones y abreviaturas</b>	<b>1</b>
<b>Vínculos a videos de funcionamiento del equipo</b>	<b>5</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>7</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>14</b>
2.1    Objetivo General	14
2.2    Objetivos Específicos	14
<b>3. Marco teórico</b>	<b>15</b>
3.1    Aguas Residuales	15
3.2    Medida de Concentración de Contaminantes	16
3.2.1    Relación entre la DQO y la DBO <sub>5</sub>	17
3.3    Tratamiento de Aguas Residuales	18
3.3.1    Tratamiento Primario	20
3.3.2    Tratamiento Secundario	29
3.3.3    Tratamiento Terciario	32
3.4    Normas Oficiales Mexicanas aplicables al tratamiento de aguas residuales	36
3.5    Oxidación biológica aeróbica	40
3.6    Conceptos básicos de difusión de aire	42
3.6.1    Diseño de sistemas de Aireación	47
3.7    Factores que influyen en el SOTE	52
3.7.1    Sistemas de difusión de aire vs aireación superficial.	52
3.7.2    Tamaño de burbuja	56
3.7.3    Densidad de difusión (difusores/área del tanque)	61

---

3.7.4	Flujo de aire por difusor	61
3.7.5	Columna de agua del tanque	63
3.7.6	Tecnología del soplador	65
3.8	Memoria de cálculo del flujo de aire para la remoción de $\text{DBO}_5$ en un proceso de lodos activados	69
3.8.1	Modelo de la teoría de las dos películas	69
3.8.2	Cálculo del AOR	70
3.8.3	Cálculo de SOR	73
3.8.4	Cálculo de aire requerido a condiciones estándar	75
3.9	Diseño de la red de aireación	78
<b>4.</b>	<b>Marco metodológico</b>	<b>87</b>
4.1	Definición de condiciones de diseño del proyecto preliminar	88
4.1.1	Planteamiento del problema	88
4.1.2	Normas Mexicanas Oficiales aplicables al problema	89
4.2	Cálculo de flujo de aire requerido para el sistema preliminar	91
4.3	Diseño de la red de aireación preliminar	92
4.4	Determinación de costo del sistema preliminar	93
4.4.1	Costo de energía mensual del sistema preliminar	95
4.5	Evaluación de condiciones de mejora del diseño del sistema preliminar	96
4.5.1	Tamaño de burbuja de los difusores de aireación	96
4.5.2	Flujo de aire por difusor y densidad de difusión (difusores/área del tanque)	97
4.5.3	Columna de agua del tanque	98
4.6	Cálculo de flujo de aire requerido del proyecto optimizado	100
4.7	Diseño de la red de aireación del sistema optimizado	101
4.8	Determinación de costo del proyecto optimizado	102
4.8.1	Costo de energía mensual del sistema optimizado	104

---

4.9	Análisis de ahorro energético y económico	104
4.9.1	Burbuja fina vs burbuja gruesa	105
4.9.2	Flujo de aire por difusor y densidad de difusión	106
4.9.3	Columna de agua	107
4.9.4	Energía Consumida	110
4.9.5	Costo del equipo	111
4.9.6	Impacto ambiental	116
<b>5.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>120</b>
<b>Anexo A</b>		<b>122</b>
<b>Anexo B</b>		<b>124</b>
<b>Anexo C</b>		<b>126</b>
<b>Anexo D</b>		<b>127</b>
<b>Anexo E</b>		<b>129</b>
	<b>Referencias bibliográficas</b>	<b>131</b>

## Índice de tablas

Tabla 3-1. Clasificación del agua de acuerdo con su DBO <sub>5</sub>	17
Tabla 3-2. Relación entre la DQO y la DBO <sub>5</sub> .	18
Tabla 3-3. Ventajas y desventajas de los biodiscos.	31
Tabla 3-4. Ventajas y desventajas de las lagunas de estabilización.	31
Tabla 3-5. Ventajas y desventajas de lodos activados.	32
Tabla 3-6. Ventajas y desventajas del tratamiento de cloración.	33
Tabla 3-7. Ventajas y desventajas del tratamiento de microfiltración y ultrafiltración.	35
Tabla 3-8. Ventajas y desventajas del tratamiento mediante luz UV.	35
Tabla 3-9. Límites permisibles.	38
Tabla 3-10. Límites permisibles para metales y cianuros. <sup>26</sup>	39
Tabla 3-11. Ventajas y desventajas de sistemas de difusión.	44
Tabla 3-12. Factores de corrección en la relación SOR-AOR..	50
Tabla 3-13. Sistemas de difusión vs aireadores superficiales.	54
Tabla 3-14. Consumos de aireador tipo Jet.	55
Tabla 3-15. Consumos de sistemas de difusión de burbuja fina.	55
Tabla 3-16. Ahorro económico.	56
Tabla 3-17. Ventajas y desventajas de difusores de burbuja fina.	58
Tabla 3-18. Ventajas y desventajas de difusores de burbuja gruesa.	59
Tabla 3-19. Ejemplo de consumos de oxígeno por demanda de oxígeno carbonáceo.	72
Tabla 3-20. Lineamientos de aire requerido para mezclado.	76
Tabla 3-21. Flujo de aire máximo sugerido por diámetro.	85
Tabla 4-1. Datos de diseño.	88
Tabla 4-2. Condiciones objetivo del proceso.	89
Tabla 4-3. Cálculos de diseño del sistema preliminar.	92
Tabla 4-4. Estimación del costo del sistema preliminar.	93
Tabla 4-5. Consumo energético del sistema preliminar.	95
Tabla 4-6. Resultados burbuja gruesa vs burbuja fina.	96
Tabla 4-7. Resultados ensayo 2 vs 3.	98



Tabla 4-8. Resultados ensayo 3 vs 4.	99
Tabla 4-9. Cálculos de diseño del sistema optimizado.	101
Tabla 4-10. Estimación del costo del sistema optimizado.	102
Tabla 4-11. Consumo energético del sistema optimizado.	104
Tabla 4-12. Diámetros de tubería sistema preliminar vs sistema optimizado.	113
Tabla 4-13. Cantidad de cabezales y laterales por sistema.	114
Tabla 4-14. Resumen de gastos energéticos por sistema.	115
Tabla 0-1. Resumen de resultados.	126

## Índice de Gráficas

Gráfica 1-1. Distribución del consumo eléctrico en una PTAR.	12
Gráfica 3-1. Consumo eléctrico aireador Jet vs sistema de difusión.	55
Gráfica 3-2. Consumo económico mensual de cada tecnología.	56
Gráfica 3-3. Efecto del flujo por difusor en el SOTE.	62
Gráfica 3-4. SOTE (%) vs profundidad del agua.	64
Gráfica 3-5. O <sub>2</sub> Requerido/ DBO <sub>5</sub> removido vs STR.	72
Gráfica 3-6. Factor alfa vs concentración de MLSS.	74
Gráfica 4-1. Eficiencia energética burbuja gruesa vs burbuja gruesa.	105
Gráfica 4-2. Flujo por difusor vs SOTE.	106
Gráfica 4-3. Densidad de difusión.	107
Gráfica 4-4. Columna de agua vs SOTE.	108
Gráfica 4-5. Análisis de caída de presión y flujo de aire requerido.	109
Gráfica 4-6. Consumo energético.	110
Gráfica 4-7 y Gráfica 4-8. Distribución de costo por sistema de difusión.	112
Gráfica 4-9. Costo estimado por sistema de difusión.	113
Gráfica 4-10. Emisión de CO <sub>2</sub> equivalente por cada ensayo.	118

## Índice de Diagramas

Diagrama 1-1. Componentes principales de un proceso biológico.	13
Diagrama 3-1. Etapas de tratamiento de aguas residuales	19

---

Diagrama 3-2. Operaciones unitarias en el tratamiento primario.	20
Diagrama 3-3. Etapas de la Sedimentación en una PTAR.	22
Diagrama 3-4. Esquema típico del cribado.	24
Diagrama 3-5. Elementos típicos de un sistema de flotación.	25
Diagrama 3-6. Estanques de homogenización de nivel constante.	27
Diagrama 3-7. Depósitos de homogenización de nivel variable.	27
Diagrama 3-8. Método del estanque de retención para homogenización.	28
Diagrama 3-9. Degradación de la materia orgánica.	29
Diagrama 3-10. Operaciones unitarias en el tratamiento secundario.	29
Diagrama 3-11. Arreglo de un biodisco.	30
Diagrama 3-12. Laguna de estabilización.	31
Diagrama 3-13. Arreglo de lodos activados.	32
Diagrama 3-14. Operaciones unitarias utilizadas en el tratamiento terciario.	33
Diagrama 3-15. Arreglo de la desinfección por luz ultravioleta.	35
Diagrama 3-16. Nitrificación y desnitrificación.	42
Diagrama 3-17. Clasificación de aireación en el tratamiento de aguas residuales. (Metcalf & Eddy, Inc. , 2003)	45
Diagrama 3-18. Pasos para el cálculo de flujo de aire requerido.	47
Diagrama 3-19. Transferencia de masa con diferentes diámetros de burbuja.	57
Diagrama 3-20. Eficiencia de equipos de aireación.	60
Diagrama 3-21. Teoría de dos películas para a) Absorción de gas y b) Extracción de gas.	69
Diagrama 3-22. Pautas de espaciamiento para el diseño de una red de aireación.	81
Diagrama 4-1. Relación SOTE y el impacto ambiental.	116

## Índice de Ilustraciones

Ilustración 3-1. Baja densidad de difusión vs alta densidad de difusión.	61
Ilustración 3-2. Bajo flujo por difusor vs alto flujo por difusor.	63

---

Ilustración 3-3. Efecto de la columna de agua.	64
Ilustración 3-4. Arreglo "rollo" o en espiral.	77
Ilustración 3-5 . Arreglo parrilla fija.	77
Ilustración 3-6. Esquema de un sistema de aireación de burbuja fina.	79
Ilustración 4-1. Área del reactor sistema preliminar vs sistema optimizado.	115

## Índice de Imágenes

Imagen 1-1. Energías renovables: energías para un futuro más seguro.	7
Imagen 1-2. Cambio de temperatura global del 2012-2016.	8
Imagen 1-3. Plantas de tratamiento de agua residual en México	10
Imagen 1-4. Sistema de aireación en un proceso biológico.	11
Imagen 3-1. Ejemplo de tratamiento primario. (Rejillas fijas para cribado)	21
Imagen 3-2. Sedimentadores primarios a) Rastras b) Sedimentador circular c) Sedimentador rectangular d) Vertedores triangulares.	23
Imagen 3-3. Equipo de ultrafiltración.	34
Imagen 3-4. Sistema sumergido de difusión de aire.	46
Imagen 3-5. Aireador superficial.	46
Imagen 3-6. Comparación entre burbujas de difusores de burbuja fina y gruesa.	60
Imagen 3-7. Soplador centrifugo.	66
Imagen 3-8. Soplador con rodamientos magnéticos.	68

## Lista de definiciones y abreviaturas

### Términos técnicos

Término	Definición
PTAR - Planta de tratamiento de aguas residuales.	Conjunto de procesos de depuración en sistemas utilizados para remover los contaminantes del agua residual y hacer apta su composición final, según la forma en que esta se desee reutilizar.
Afluente	Líquido que ingresa a un proceso de la PTAR.
Efluente	Líquido descargado en un proceso de la PTAR.
Reactor biológico	Sistema diseñado para el crecimiento de masa biológica mediante la transformación o degradación.
Proceso aeróbico	Procesos que tienen lugar en presencia de oxígeno.
Biomasa	Semisólidos orgánicos residuales producto de la remoción.
DQO - Demanda química de oxígeno	Cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica por medios químicos.
DBO <sub>5</sub> - Demanda biológica de oxígeno	Cantidad de oxígeno que los microorganismos consumen durante la degradación de sustancias

	orgánicas contenidas en la muestra en un periodo de 5 días.
Bacterias autótrofas	Bacterias presentes en la nitrificación aeróbica pues se caracterizan por el consumo de O <sub>2</sub> .
Bacterias heterótrofas	“En la desnitrificación con ausencia de O <sub>2</sub> las bacterias heterótrofas son capaces de utilizar los nitratos como aceptor terminal de electrones para la producción de N <sub>2</sub> .” <sup>1</sup>
Condiciones actuales	Las condiciones de temperatura y presión del sitio en donde se está realizando el proceso de un gas (aire).
Condiciones estándar	Las condiciones de temperatura y presión estandarizadas de un gas (aire). Para esta investigación son consideradas temperatura de 20°C y presión de una atmósfera.
AOR - Actual Oxygen Requirement	Demanda de oxígeno requerida para degradar la materia orgánica en condiciones actuales, sus unidades de medición son en términos de masa por tiempo.
SOR - Standard Oxygen Requirement	Demanda de oxígeno requerida para degradar la materia orgánica en condiciones estándar.

---

<sup>1</sup> (UNEMI, 2018)

SOTE - Standard Oxygen Transfer Efficiency	Se define como la relación entre la cantidad de oxígeno que se proporciona al agua a tratar y lo que realmente se transfiere.
SRT - Solids Retention Time	Tiempo de retención de los sólidos en el proceso.
pH - Potential of hydrogen	Medida de la acidez o basicidad de una solución acuosa. <sup>2</sup>
MLSS - Mixed liquor suspended solids	Media de la biomasa presente en el reactor biológico, es decir, la cantidad de organismos disponibles para degradar la materia orgánica. <sup>3</sup>
tCO <sub>2</sub> e - Toneladas de dióxido de carbono equivalente	La tonelada de CO <sub>2</sub> equivalente (CO <sub>2</sub> e) es una medida del efecto térmico en la atmósfera que produce una masa de emisiones de gases de efecto invernadero, como si todas estas sustancias (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, halocarburos) fueran CO <sub>2</sub> , para lo cual se emplea a este gas como referencia en el cálculo del potencial de calentamiento global. (IPCC, 2022)
PVC, CPVC - Polyvinyl chloride	Resina termoplástica obtenida por polimerización de derivados del cloruro de vinilo, usada frecuentemente para aislamientos y tuberías. <sup>4</sup>

---

<sup>2</sup> (Metcalf & Eddy, Inc. , 2003)

<sup>3</sup> (Ramis Cirujeda, 2019)

<sup>4</sup> (Real Academia Española, 2022)

PVC, CPVC - Polyvinyl chloride	La principal diferencia entre el PVC y CPVC es el rango de temperaturas que es capaz de resistir. El CPVC debe ser utilizado en procesos con temperaturas mayores a los 60°C.
--------------------------------	---

### **Organizaciones y autoridades regulatorias**

ONU	Organización de las Naciones Unidas
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
EPA	Environmental Protection Agency
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura

### **Abreviaciones de Unidades**

ft	feet
psig	Pounds per square inch gauge
scfm	Standard cubic feet per minute
HP	Horse power

## Vínculos a videos de funcionamiento del equipo

Equipo	Vínculo
<p data-bbox="332 384 448 415"><b>Cribado</b></p> 	<p data-bbox="810 491 1266 522"><u><a href="#">Video de funcionamiento de una criba.</a></u></p> <p data-bbox="810 537 990 569">Dirección URL:</p> <p data-bbox="810 583 1373 657"><a href="https://www.youtube.com/watch?v=swmPuwZI_18">https://www.youtube.com/watch?v=swmPuwZI_18</a></p>
<p data-bbox="332 810 456 842"><b>Biodisco</b></p> 	<p data-bbox="810 974 1292 1005"><u><a href="#">Video de funcionamiento de un biodisco.</a></u></p> <p data-bbox="810 1020 990 1052">Dirección URL:</p> <p data-bbox="810 1066 1373 1140"><a href="https://www.youtube.com/watch?v=lgWJKQyTwkk">https://www.youtube.com/watch?v=lgWJKQyTwkk</a></p>
<p data-bbox="332 1236 748 1320"><b>Difusores de burbuja fina tipo disco</b></p> 	<p data-bbox="810 1236 1312 1310"><u><a href="#">Video de patrón de aireación de difusor de disco.</a></u></p> <p data-bbox="810 1325 990 1356">Dirección URL:</p> <p data-bbox="810 1371 1317 1444"><a href="https://www.youtube.com/watch?v=y6mhg-NK2no">https://www.youtube.com/watch?v=y6mhg-NK2no</a></p>



<p>Difusores de burbuja fina tipo tubular</p> 	<p><a href="#">Video de patrón de aireación de difusor tubular. (Burbuja gruesa vs burbuja fina)</a></p> <p>Dirección URL: <a href="https://www.youtube.com/watch?v=K2DNbpRD2Fg">https://www.youtube.com/watch?v=K2DNbpRD2Fg</a></p>
<p>Difusores de burbuja gruesa</p> 	<p><a href="#">Video de patrón de burbuja gruesa.</a></p> <p>Dirección URL: <a href="https://www.youtube.com/watch?v=LH92vk40RV">https://www.youtube.com/watch?v=LH92vk40RV</a></p>

# 1. Introducción

En la actualidad existe una búsqueda constante en el ámbito industrial y doméstico por incorporar prácticas que alcanzan la eficiencia energética, con el fin de conseguir ahorros en sus gastos de operación, pero fundamentalmente por decrecer los impactos ambientales, y es que en los últimos años es más frecuente reconocer en el entorno las secuelas del deterioro del medio ambiente.

Dependiendo la ubicación geográfica los gobiernos implementan normas para tener control sobre el correcto tratamiento en los distintos tipos de desechos. Con el fin del cumplimiento de los requerimientos de las autoridades ambientales, las empresas van adoptando tecnologías que les permiten estar a la vanguardia y tener procesos más eficientes, es decir, que con menor uso de energía se llegue a los resultados esperados de transformación. Tener tecnologías rezagadas generan un efecto contrario, en otras palabras, sus procesos implican gastos operativos altos a causa del desperdicio de la energía.

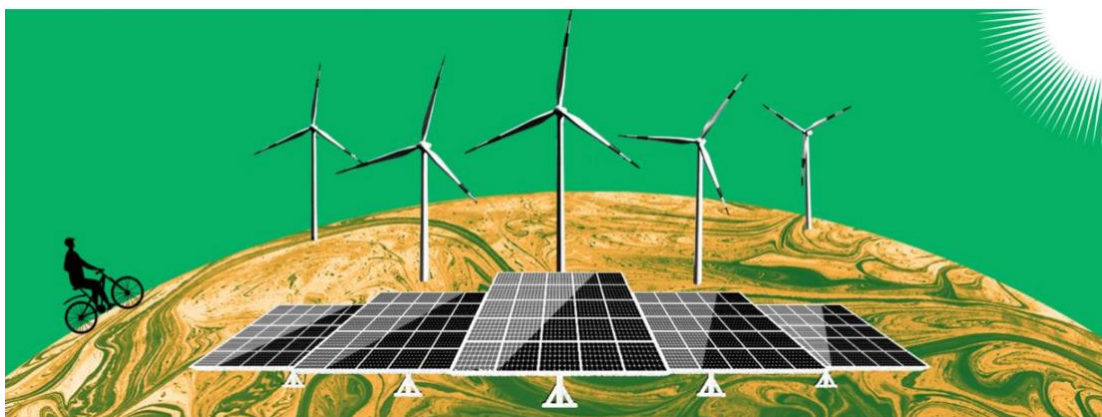


Imagen 1-1. Energías renovables<sup>5</sup> : Energías para un futuro más seguro. <sup>6</sup>

---

<sup>5</sup> La expresión “energías renovables” sólo se maneja en un ámbito coloquial o no académico, técnicamente hablando el termino correcto es “fuentes renovables de energía”, porque la energía no se puede renovar, pues eso implica una generación y por lo tanto la no conservación de la energía. Lo renovable es la fuente donde el humano aprovecha para transformar la energía proveniente de algún fenómeno natural.

<sup>6</sup> (Naciones Unidas, 2022)

Desde hace algunas décadas, la sociedad científica ha revelado algunos datos preocupantes sobre los posibles efectos que vienen en camino en caso de no actuar a tiempo. Los expertos han advertido que la humanidad está en una cuenta regresiva para realizar acciones indispensables que ayuden a aminorar los posibles efectos climáticos esperados.

La ONU y otras organizaciones han sido participes de comunicar, educar y difundir estudios realizados por científicos, políticos y economistas sobre la información de acciones que pueden adoptar en la categoría doméstica, pero sin duda las industrias de transformación en volúmenes inmensos provocan los mayores efectos negativos. En busca de sumarse a los planes de acciones, las compañías hacen público su cumplimiento, no solo con las normas, sino de la aprobación de certificaciones enfocadas a logros ambientales. Con la unión de diversos países se pactan acuerdos internacionales para una mejora en las prácticas industriales, y es más común y necesario en esta década la incorporación de ética de sustentabilidad y responsabilidad social.

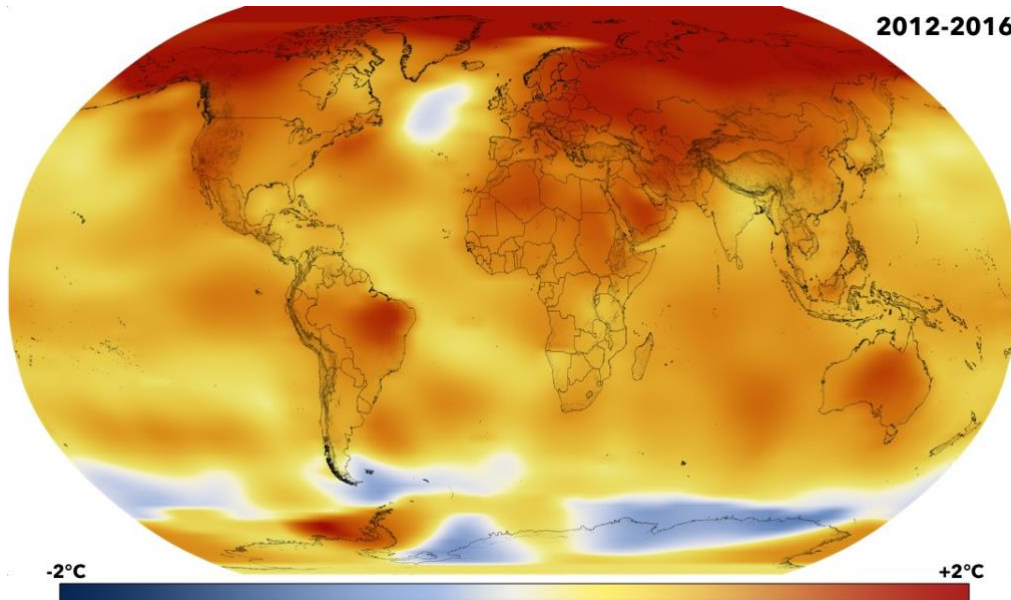


Imagen 1-2. Cambio de temperatura global del 2012-2016.<sup>7</sup>

<sup>7</sup> (NASA, 2017)

En agosto del 2021 el reporte de la IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) reveló que “el cambio climático es generalizado, rápido y se está intensificando”<sup>8</sup>, muchos efectos climáticos están ocurriendo, dejando las regiones devastadas y esto se repite alrededor del mundo. El informe responsabiliza del aumento de la temperatura global de aproximadamente 1.1°C a las emisiones de gases de efecto invernadero utilizadas para las actividades humanas. Finalmente, el reporte tiene una rotunda conclusión, y es que a menos que las emisiones de los gases causantes del efecto invernadero se reduzcan de forma rápida, inmediata y de manera masiva, limitar el calentamiento global de 1.5°C será un objetivo inalcanzable.

En la variedad de industrias se encuentran diversas áreas de oportunidad para contar con procesos más eficientes y como resultantes tener ahorros económicos, pero sobre todo energéticos, y extrapolando, contribuir a la reducción de emisiones a causa del uso de la energía.

El presente escrito acota el panorama anterior a una Planta Tratadora de Agua Residual (PTAR) y específicamente al tratamiento aeróbico, que principalmente incorpora sistemas de difusión de aire para alcanzar los parámetros del efluente establecidos por las autoridades ambientales.

El agua es vital para las actividades humanas e industriales, cada día y cada momento es contaminada en grandes volúmenes. El aumento de la población y la industrialización incrementa la generación de agua a tratar. Es importante mencionar que México tiene una problemática, pues según datos de la Agenda Ambiental 2018, presentada por la UNAM, una gran cantidad de agua residual es vertida cruda a los cuerpos receptores de agua limpia, y únicamente el 57% de aguas municipales colectadas son tratadas. El informe también sugiere poner en

---

<sup>8</sup> (COMUNICADO DE PRENSA DEL IPCC, 2021)

obra nuevos diseños para elevar la eficiencia del manejo de aguas residuales, en particular en ciudades en crecimiento.<sup>9</sup>

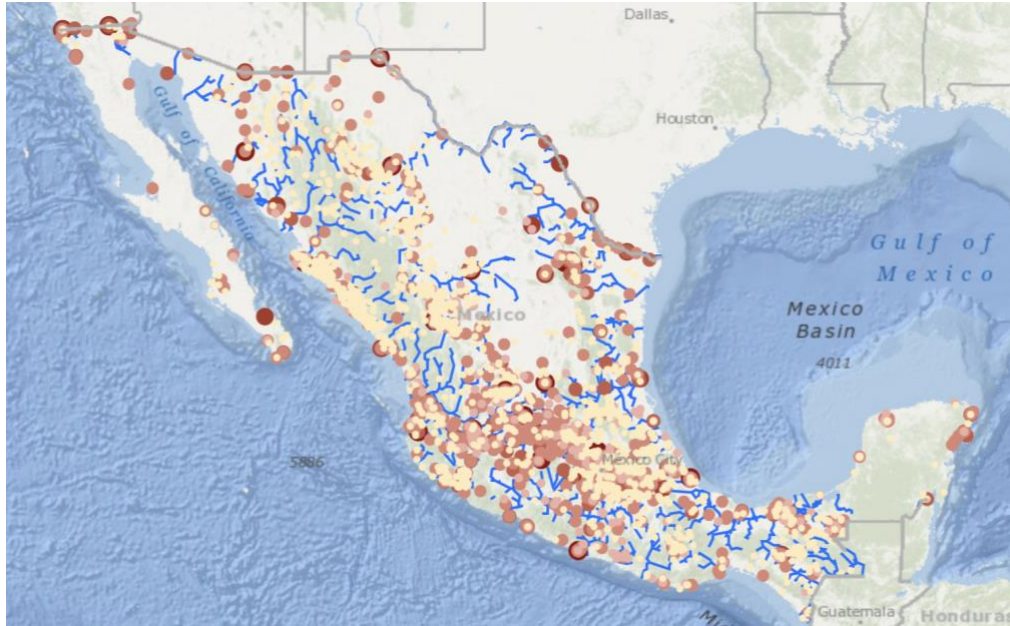


Imagen 1-3. Plantas de tratamiento de agua residual en México<sup>10</sup>

Las PTAR son imprescindibles, pues con estos tratamientos de transformación se busca degradar la materia orgánica y cubrir la necesidad de conseguir la seguridad hidráulica para la sociedad. De acuerdo con el Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación, a finales del 2019 el registro de plantas en operación aumentó a 979 unidades (respecto al año anterior), con una capacidad instalada conjunta de 151,266.87 l/s y un caudal potabilizado de 115,636.5 l/s.<sup>11</sup>

Año con año se destina presupuesto para proyectos que impliquen ampliación o mejoren la infraestructura en materia de saneamiento de agua, por lo que existe una amplia área de oportunidad para implementar mejoras, que si se aplican cada vez en más proyectos representarían ahorros extensos.

<sup>9</sup> (AGENDA AMBIENTAL 2018 Diagnóstico y propuestas, 2018)

<sup>10</sup> (CONAGUA, 2021)

<sup>11</sup> (CONAGUA, 2019)

Haciendo más específica la aplicación del presente estudio, los sistemas de difusión de aire son indispensables en una PTAR. Usualmente los reactores aeróbicos utilizados no son diseñados en conjunto con los expertos en sistemas de difusión y por esta razón se pueden omitir criterios que influyen en la transferencia de oxígeno de los sistemas de difusión de aire; esto lleva a tener procesos menos eficientes, y por lo tanto un desperdicio energético.

Realizando un análisis desde la construcción y diseño del reactor, se podrían incluir todos esos factores, teniendo como resultado un sistema más eficiente, y con esto, impactos ambientales positivos, así como un ahorro en gastos operativos derivados del consumo de energía eléctrica.



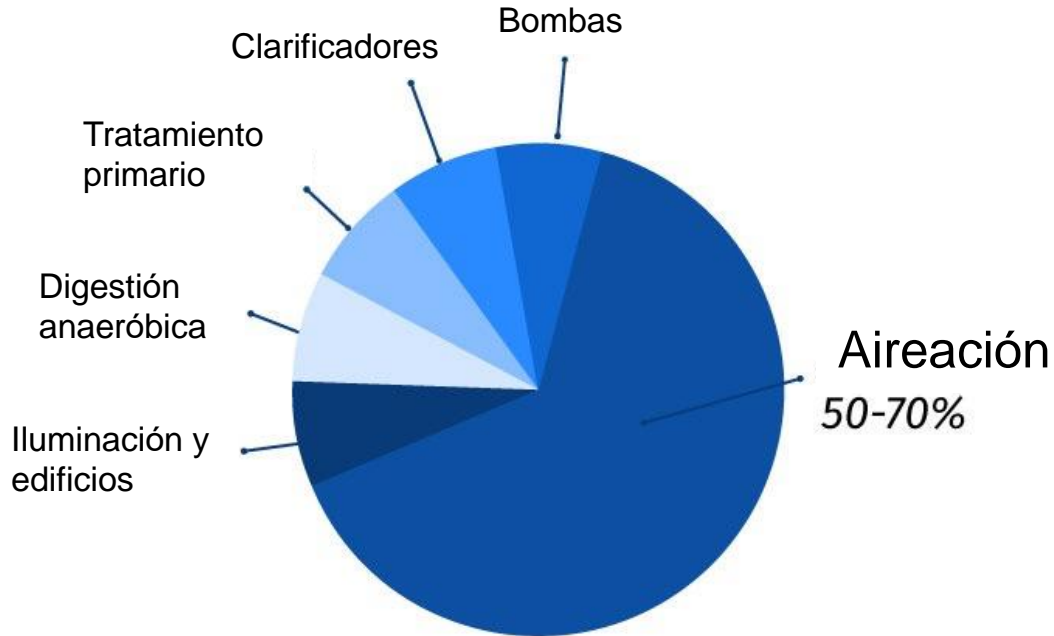
Imagen 1-4. Sistema de aireación en un proceso biológico.<sup>12</sup>

La etapa de aireación para la transferencia de oxígeno y así degradar la materia orgánica es un proceso continuo, es decir, se debe dar las 24 horas del día en los reactores biológicos en aplicaciones de lodos activados, razón por la cual, en esta etapa del tratamiento de agua se tiene un consumo energético aproximadamente

---

<sup>12</sup> (Environmental Dynamics International, 2020)

del 50%-70% del total de todo el proceso<sup>13</sup>. El costo capital de construcción de la etapa de aireación representa típicamente un 2% del total de la inversión total en una PTAR, por lo que hay un gran potencial de oportunidad de ahorro energético a largo plazo siempre y cuando se realice una evaluación completa de los factores que influyen en la eficiencia de la fuente de aireación.



Gráfica 1-1. Distribución del consumo eléctrico en una PTAR.<sup>14</sup>

Abordando los gastos operativos, en la actualidad las PTAR incorporan sistemas de control, como medidores de oxígeno que están vinculados a los sopladores para tener variaciones en el flujo de aire proporcionado al sistema, en condiciones pico o condiciones promedio. Por otro lado, en el mercado se puede encontrar una amplia gama de sopladores que contribuyan a la mejora de la eficiencia del sistema biológico en conjunto con el sistema de aireación, y aunque la inversión de procura se eleva cotizando sopladores más eficientes; haciendo estudios económicos

<sup>13</sup> (EPA, 1999)

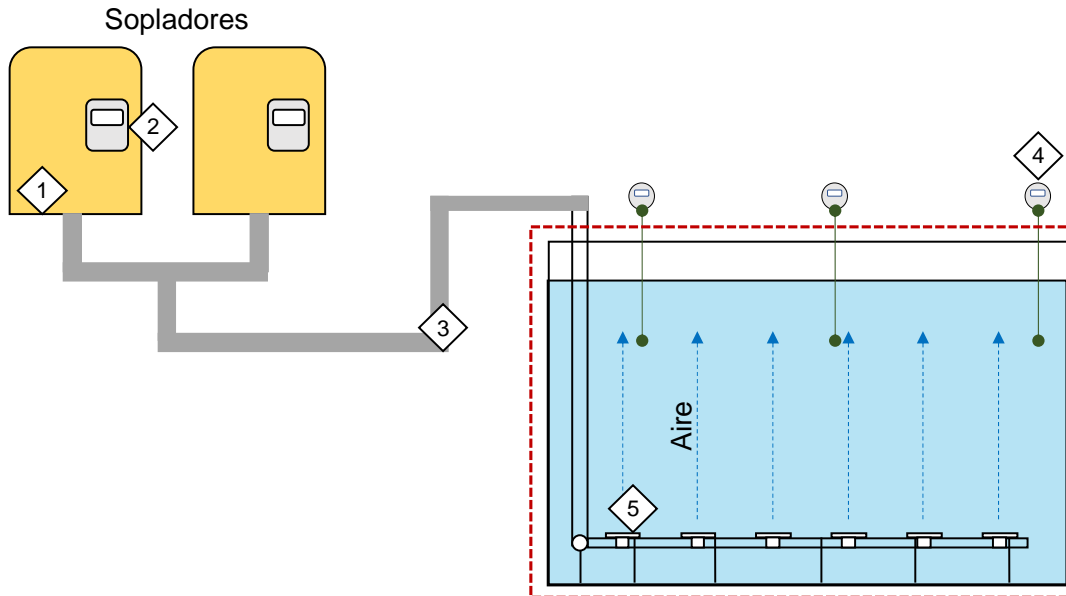
<sup>14</sup> (Environmental Dynamics International, 2019)

correspondientes se esperaría que la inversión a largo plazo se recuperé generando ahorros importantes.

Conforme a lo anterior se entiende que los componentes primordiales en un proceso biológico son:

1. Control: que pueden ser medidores de oxígeno, variadores de flujo, entre otros.
2. Sopladores
3. Aireadores

Los estudios de eficiencia y mejora pueden ser evaluados en cada una de las categorías anteriores. La presente tesis se enfoca en la evaluación de los factores que influyen en la eficiencia de los aireadores.



- 1 Sopladores
- 2 Variadores de flujo (Control)
- 3 Tubería que transporta aire de los sopladores al tanque de aireación
- 4 Medidores de oxígeno (Control)
- Objeto de la investigación (Sistema de aireación)

Diagrama 1-1. Componentes principales de un proceso biológico.



## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

- Estudiar los factores que definen la transferencia de oxígeno (SOTE) en un sistema de difusión de aire en un reactor aeróbico para tener como resultado un diseño eficiente que represente un ahorro energético.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Estudiar los diferentes factores que influyen en la transferencia de oxígeno (SOTE).
- Comparar los diferentes factores que influyen en el SOTE para encontrar los parámetros óptimos y maximizar la eficiencia. El indicador cuantitativo será flujo de aire requerido para la remoción de  $\text{DBO}_5$  de un reactor biológico.
- Diseñar un sistema optimizado que considere los parámetros óptimos y elaborar un análisis de los impactos energéticos y ambientales, así como de los costos operativos y de procura por el equipo con el fin de obtener evidencia de los ahorros generados.

### 3. Marco teórico

#### 3.1 Aguas Residuales

Las aguas residuales son aguas contaminadas desechadas y derivadas de actividades domésticas, industriales, entre otras. Estas pueden acarrear desechos orgánicos, desperdicios caseros, descargas pluviales, infiltraciones de aguas subterráneas y desechos industriales, es decir, los contaminantes en las aguas residuales normalmente son una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos.

Es importante la clasificación de las aguas residuales, pues se encuentra directamente relacionada con el diseño del proceso requerido para su tratamiento. La clasificación de las aguas residuales puede ser según su procedencia, características bacteriológicas, contaminantes químicos, pero para el fin de este estudio se agruparán como se describe a continuación:

- Agua residual doméstica: Procedente de la utilización del agua en las actividades del hogar o zonas comerciales, están principalmente contaminadas de sólidos, jabones o detergentes, grasas y aceites y desechos orgánicos.



- Agua Residual industrial: Es resultado de procesos industriales, y su composición incluye contaminantes químicos orgánicos y/o inorgánicos.



### 3.2 Medida de Concentración de Contaminantes

Debido a que las aguas residuales contienen un sin fin de contaminantes orgánicos e inorgánicos difícilmente se puede obtener un análisis completo; por lo que se han desarrollado métodos empíricos que agrupan contaminantes y estiman su concentración, en los cuales no se necesita un conocimiento de la composición química específica de cada contaminante.

Algunos de estos métodos son: Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Biológica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>).

- **DQO - Demanda Química de Oxígeno:** Es la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica por medios químicos.
- **DBO<sub>5</sub>-Demanda Biológica de Oxígeno:** Es la cantidad de oxígeno que los microorganismos consumen durante la degradación de las sustancias orgánicas contenidas en la muestra en un periodo de 5 días. Es realizada en un ambiente oscuro para evitar la fotosíntesis que aportan cantidades de O<sub>2</sub> a la muestra y arrojando mediciones erróneas.<sup>15</sup>

---

<sup>15</sup> (Ramis Cirujeda, 2019)

De acuerdo con la CONAGUA, con la medida de la DBO<sub>5</sub> se puede clasificar la calidad del agua de la siguiente manera:

No contaminada o Excelente	DBO <sub>5</sub> ≤ 3 mg/L	
Buena calidad	DBO <sub>5</sub> > 3 mg/L y ≤ 6 mg/L	Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable.
Aceptable	DBO <sub>5</sub> > 6 mg/L y ≤ 30 mg/L	Con indicios de contaminación, aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente.
Contaminada	DBO <sub>5</sub> > 30 mg/L y ≤ 120 mg/L	Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal.
Fuertemente contaminada	DBO <sub>5</sub> > 120 mg/L	

Tabla 3-1. Clasificación del agua de acuerdo con su DBO<sub>5</sub>.

### 3.2.1 Relación entre la DQO y la DBO<sub>5</sub>

La relación de estos índices dependerá de la procedencia de agua, siendo el valor de la DQO superior a la DBO<sub>5</sub>, debido a que muchas sustancias orgánicas pueden oxidarse químicamente pero no biológicamente. Esta relación (DBO<sub>5</sub>/DQO) da un

índice de contaminación de las aguas y el método que es recomendable utilizar para el tratamiento, razón por la cual es un parámetro de suma importancia.

Valor de DBO <sub>5</sub> / DQO	Tipo de agua residual
< 0.2	Indica agua procedente de procesos industriales y sus componentes son poco biodegradables.
> 0.5	Indica agua proveniente de uso doméstico. Sus componentes son más biodegradables conforme aumente esta relación

Tabla 3-2. Relación entre la DQO y la DBO<sub>5</sub>.

A bajos valores de esta relación es recomendable optar por métodos no biológicos, mientras que para valores altos de la relación DBO<sub>5</sub> / DQO debe ser seleccionado un proceso biológico de saneamiento.

### 3.3 Tratamiento de Aguas Residuales

En una Planta Tratadora de Aguas Residuales (PTAR) se llevan a cabo procesos de depuración en sistemas, utilizados para remover los contaminantes del agua y hacer apta su composición final, según la forma en que esta se desee reutilizar. El agua producto de las PTAR puede ser reutilizada en diversas actividades tales como la agricultura, la industria y la recreación.

Principalmente el proceso de una PTAR consiste en una serie de etapas físicas, químicas y biológicas que tienen como fin eliminar los contaminantes presentes en el agua. Cada paso tiene un objetivo y para cumplir este se pueden utilizar distintos tipos de equipos.

Los tratamientos requeridos para la depuración del agua en una PTAR se agrupan de la manera general en el Diagrama 3-1:

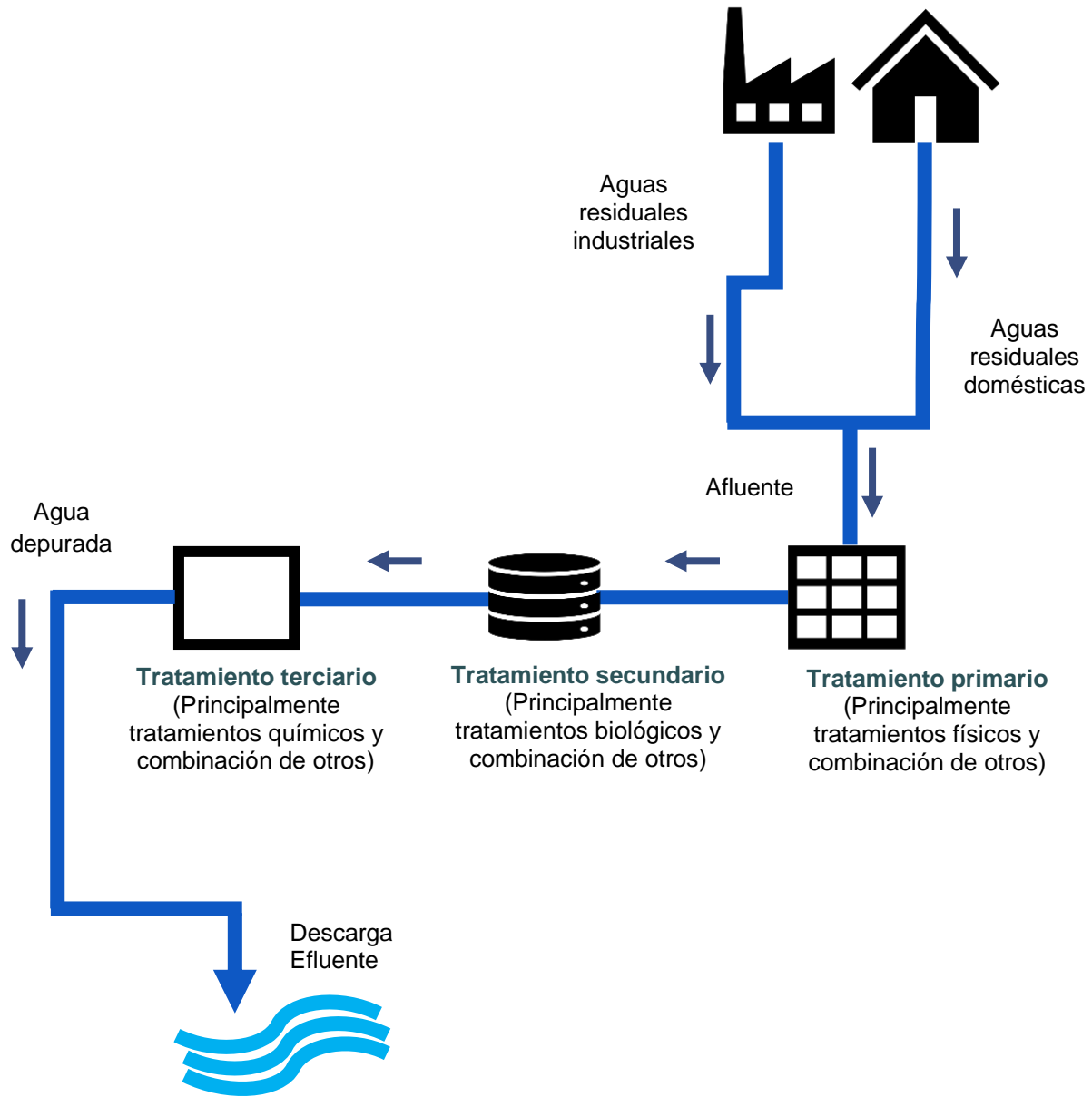


Diagrama 3-1. Etapas de tratamiento de aguas residuales

Los objetivos del tratamiento de aguas residuales son:

- Eliminar la materia suspendida.
- Erradicar microorganismos patógenos.
- Depurar de nutrientes como el fósforo y nitrógeno.
- Separación de compuestos químicos tóxicos.

La selección de los tratamientos de aguas residuales o la serie de procesos de tratamiento depende de diversos factores, algunos de ellos son:

- a) Características del agua residual: DBO<sub>5</sub>, materia en suspensión, pH, productos tóxicos.
- b) Calidad del efluente requerido.
- c) Costo y disponibilidad, por ejemplo, algunos tratamientos biológicos son económicamente más viables.
- d) Consideración de las futuras ampliaciones o la previsión de límites de calidad de efluente más estrictos, que necesiten el diseño de tratamientos más sofisticados en el futuro.

### 3.3.1 Tratamiento Primario

El tratamiento primario en una PTAR consiste en la reducción de los sólidos en suspensión o el acondicionamiento de agua para tener una correcta descarga en los receptores del tratamiento secundario. Existen una variedad de operaciones unitarias que cumplen con este objetivo entre las que destacan:

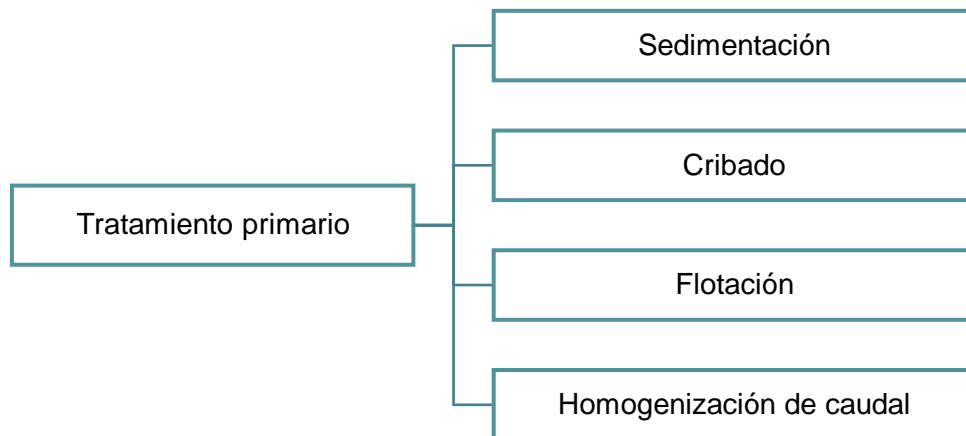


Diagrama 3-2. Operaciones unitarias en el tratamiento primario.

Un tratamiento primario puede abarcar uno o varias operaciones unitarias de este tipo, las rejillas fijas para cribado de la Imagen 3-1 son ejemplos de estas operaciones.



Imagen 3-1. Ejemplo de tratamiento primario. (Rejillas fijas para cribado)<sup>16</sup>

[Video de funcionamiento de una criba.](#)<sup>17</sup>

Dirección URL: [https://www.youtube.com/watch?v=swmPuwZI\\_18](https://www.youtube.com/watch?v=swmPuwZI_18)

---

<sup>16</sup> (CONAGUA, 2022)

<sup>17</sup> (You Tube, 2022)



### a) Sedimentación

La eliminación de los sólidos por sedimentación se basa en la diferencia de peso específico entre estas partículas y el líquido donde se encuentran. Es un método primario muy efectivo, pues su índice de separación de sólidos va de un 40% a 60%, también puede ser utilizado como complemento en otras operaciones unitarias, algunos ejemplos son apreciados en la Imagen 3-2.

La sedimentación puede hacerse en una o varias etapas, en una planta típica de lodos activados este método es utilizado en tres fases de todo el proceso:

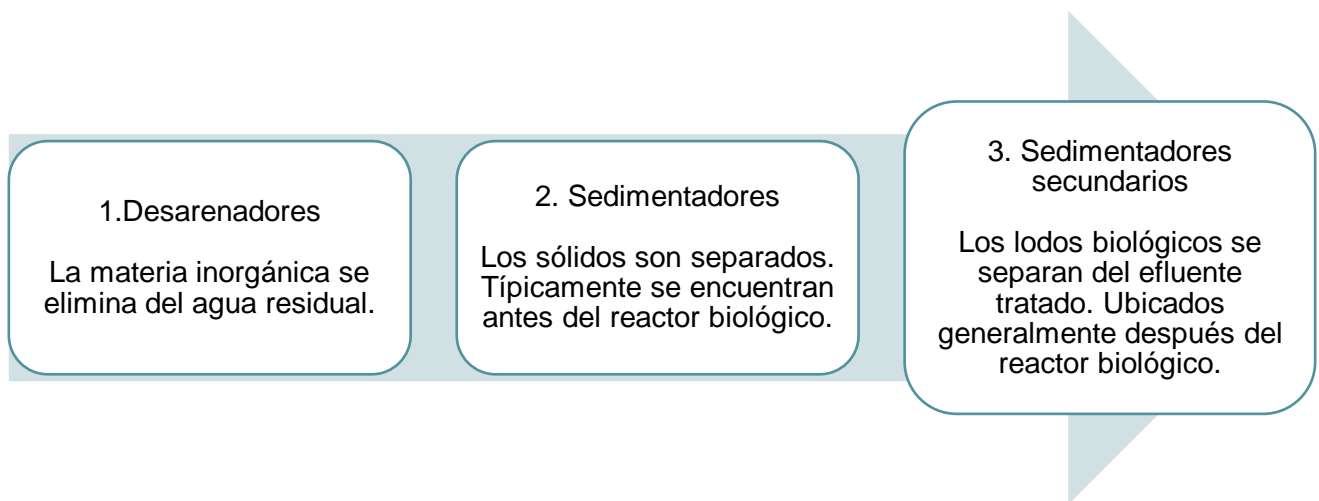


Diagrama 3-3. Etapas de la Sedimentación en una PTAR.

Existen 3 grupos en lo que se clasifica la sedimentación de acuerdo la naturaleza de los sólidos presentes en suspensión:

- i. **Sedimentación discreta:** No se somete a un proceso de coalescencia con otras partículas. Las propiedades físicas de las partículas (tamaño, forma, peso específico) no cambian durante el proceso. La deposición de partículas de arena en los desarenadores es un ejemplo típico de sedimentación discreta.
- ii. **Sedimentación con floculación:** La aglomeración de las partículas va acompañada de cambios en la densidad y en la velocidad de sedimentación o precipitación. Ejemplo de esto es la sedimentación que se lleva a cabo en los clarificadores o sedimentadores primarios.

- iii. **Sedimentación por zonas:** Las partículas forman una especie de manta que sedimenta como una masa total, presentando una interfase distinta con la fase líquida. Este proceso incluye la sedimentación de lodos activados en los clarificadores secundarios y la de los flóculos de alúmina en los procesos de tratamientos de aguas.



a)



b)



c)



d)

Imagen 3-2. Sedimentadores primarios a) Rastras b) Sedimentador circular c) Sedimentador rectangular d) Vertedores triangulares.<sup>18</sup>

### b) Cribado

Este método de separación físico es utilizado para reducir la cantidad de sólidos en suspensión de distintos tamaños (Diagrama 3-4). La abertura de las rejillas depende del objeto en suspensión. Los sólidos separados comúnmente son clasificados en finos y gruesos.

---

<sup>18</sup> (CONAGUA, 2022)

Las rejillas de sólidos finos tienen abertura de 5 mm y generalmente están fabricadas a base de una malla metálica de acero, placas o chapas de acero perforado. Las cribas de sólidos gruesos tienen aberturas que van de los 4 - 9 cm. Este tipo de criba es utilizada como elementos de protección para evitar que sólidos de grandes dimensiones dañen las bombas y otros equipos.

En algunas PTAR las rejillas de sólidos gruesos son sustituidas por trituradoras que permiten desgarrar los sólidos en suspensión, para posteriormente eliminarlos por sedimentación.

Mediante este procedimiento la eliminación de sólidos puede ser de un 5% a un 25%, por lo cual el uso de rejillas finas es poco común. Los desechos sólidos generados por la separación pueden ser tratados mediante digestores anaeróbicos.

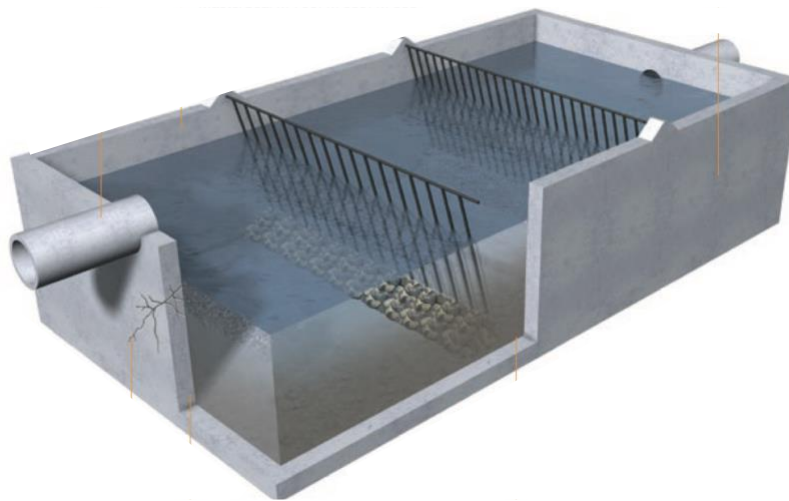


Diagrama 3-4. Esquema típico del cribado.<sup>19</sup>

### c) Flotación

La flotación es un proceso para separar sólidos de baja densidad o partículas líquidas de una fase líquida. Esta separación es lograda introduciendo un gas (normalmente aire) en la fase líquida, en forma de burbujas. La fase líquida se

---

<sup>19</sup> (BASF)

somete a un proceso de presurización para alcanzar una presión de funcionamiento que oscila entre 2 y 4 atm.

Este líquido saturado de aire se somete a un proceso de despresurización llevándolo hasta la presión atmosférica, a través de una válvula reductora de presión. Los sólidos en suspensión o las partículas líquidas (por ejemplo, aceites o petróleo) flotan, debido a que estas pequeñas burbujas, asociándose a los mismos, les obligan a elevarse hacia la superficie. La flotación se usa para los siguientes objetivos:

- Separación de grasas, aceites, fibras, y otros sólidos de baja densidad, de las aguas residuales.
- Espesado de los lodos procedentes de los procesos de lodos activos.
- Espesamiento de los lodos floculados químicamente resultantes de los tratamientos de coagulación química.

Los componentes básicos en un sistema de flotación son especificados en el diagrama 3-5:

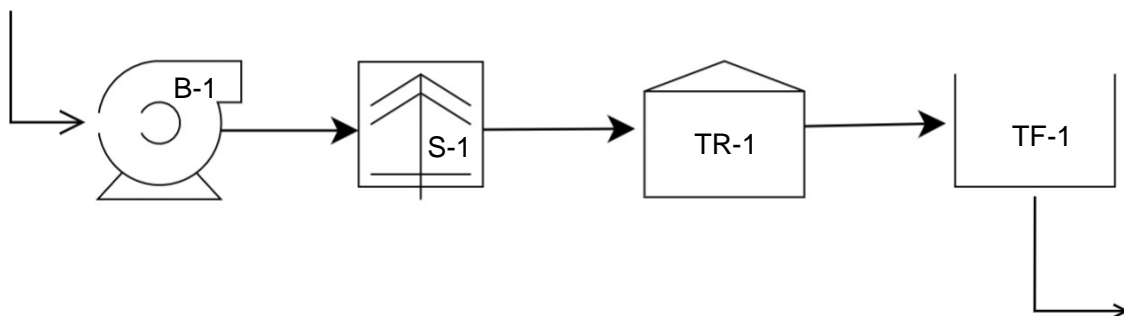


Diagrama 3-5. Elementos típicos de un sistema de flotación.

Notas del D:

B-1: Bomba de presurización

S-1: Sistema para inyección de aire

TR-1: Tanque de retención

TF-1: Tanque de flotación

#### **d) Homogenización del Caudal**

Este tipo de tratamiento primario puede incluir la neutralización y se utiliza principalmente en los siguientes casos:

- Antes de la descarga de aguas residuales en un medio receptor. La justificación para la neutralización es que la vida acuática es muy sensible a variaciones de pH fuera de un intervalo cercano a  $\text{pH} = 7$ .
- Antes del tratamiento químico o biológico. Para los tratamientos biológicos el pH del sistema se mantiene en un intervalo comprendido entre 6.5 y 8.5 para asegurar una actividad biológica óptima.

El método de neutralización de aguas residuales incluye principalmente dos pasos:

- i. Homogenización: consiste en mezclar las corrientes, algunas de las cuales son ácidas y otras alcalinas, disponibles en la planta.
- ii. Métodos de control directo de pH, que consisten en la adición de ácidos o bases para neutralizar las corrientes alcalinas o ácidas.

La homogenización se utiliza a menudo para otros objetivos aparte de la neutralización, por ejemplo:

- i. Aminorar las variaciones de ciertas corrientes de aguas residuales, intentando conseguir una corriente mezclada con un caudal relativamente constante que sea el que llegue a la planta de tratamiento.
- ii. Aminorar las variaciones de la  $\text{DBO}_5$  del afluente a los sistemas de tratamiento. Con este propósito se utilizan tanques de homogenización de nivel constante o variable.

#### **Métodos para la homogenización**

- Estanques de homogenización de nivel constante (Diagrama 3-6): El nivel del depósito de homogenización se mantiene constante. En consecuencia, si

el caudal de entrada varía el caudal de salida también. Por lo tanto, no se trata de una técnica de homogenización de caudal, sino simplemente un método de neutralización. Es mostrado en el siguiente diagrama:

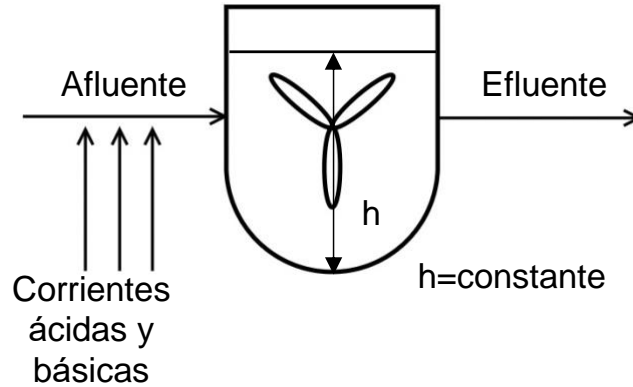


Diagrama 3-6. Estanques de homogenización de nivel constante.

- Depósitos de homogenización de nivel variable (Diagrama 3-7): En este método de neutralización, el efluente sale con un caudal constante, y teniendo en cuenta que el caudal de entrada varía con el tiempo, el nivel del estanque debe hacerse variable.

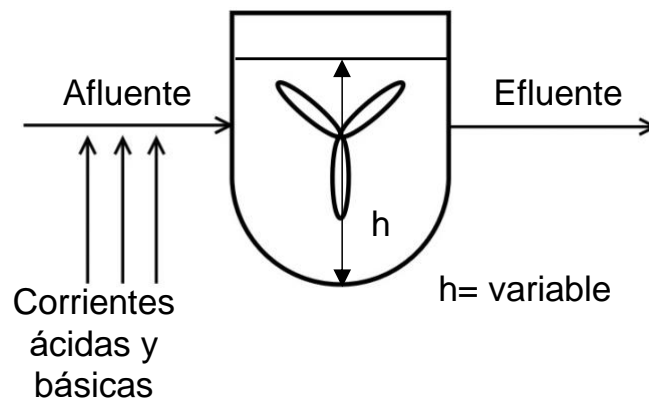


Diagrama 3-7. Depósitos de homogenización de nivel variable.

Otro método de homogenización consiste en extraer el exceso de la corriente de entrada a un depósito de retención, del cual sale una purga que va alimentando al

tanque de homogenización (Diagrama 3-8). Este método no se utiliza con objetivos de neutralización, sino solamente para el mantenimiento de la DBO<sub>5</sub> o caudal. El diagrama general de este proceso es ilustrado a continuación:

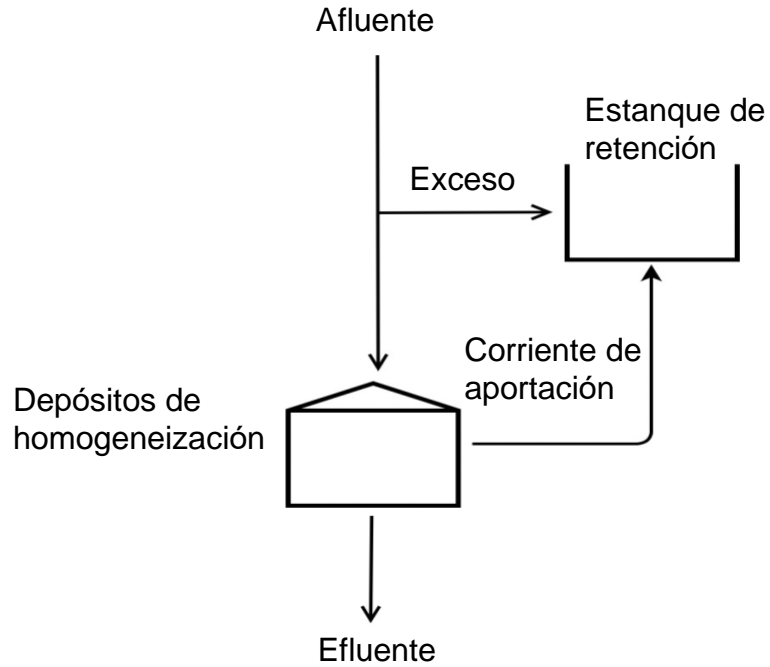


Diagrama 3-8. Método del estanque de retención para homogenización.

### 3.3.2 Tratamiento Secundario

Son referidos a los procesos de tratamiento biológico de las aguas residuales tanto aeróbicos como anaeróbicos, estos tratamientos tienen en común la utilización de microorganismos para llevar a cabo la eliminación de materia orgánica biodegradable (Diagrama 3-9).



**Bacterias + Materia Orgánica + Oxígeno = Dióxido de carbono + Agua**

Diagrama 3-9. Degradación de la materia orgánica.<sup>20</sup>

En la mayoría de los casos, la materia orgánica constituye la fuente de energía y de carbono que necesitan los microorganismos para su crecimiento; en el caso de un sistema aeróbico, la presencia de oxígeno disuelto en el agua es indispensable. Este último aspecto será clave a la hora de elegir el proceso biológico más conveniente.

Los procesos aeróbicos se basan en la eliminación de los contaminantes orgánicos por su transformación en biomasa bacteriana, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. Los procesos anaeróbicos transforman la sustancia orgánica en biogás, mezcla de metano y CO<sub>2</sub>. Algunos ejemplos de tratamientos secundarios son presentados en el Diagrama 3-10:

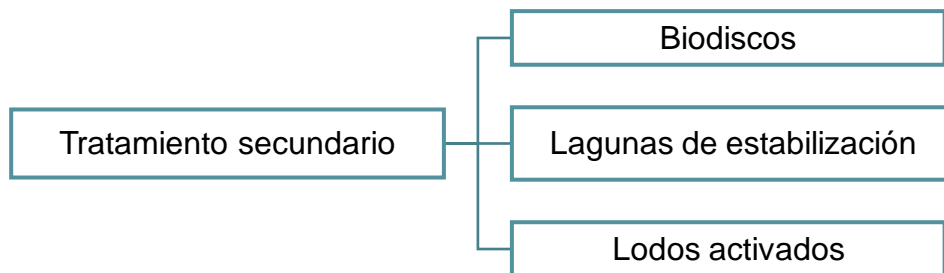


Diagrama 3-10. Operaciones unitarias en el tratamiento secundario.

<sup>20</sup> Iconos de (Freepik Company, 2022)



a) Biodiscos

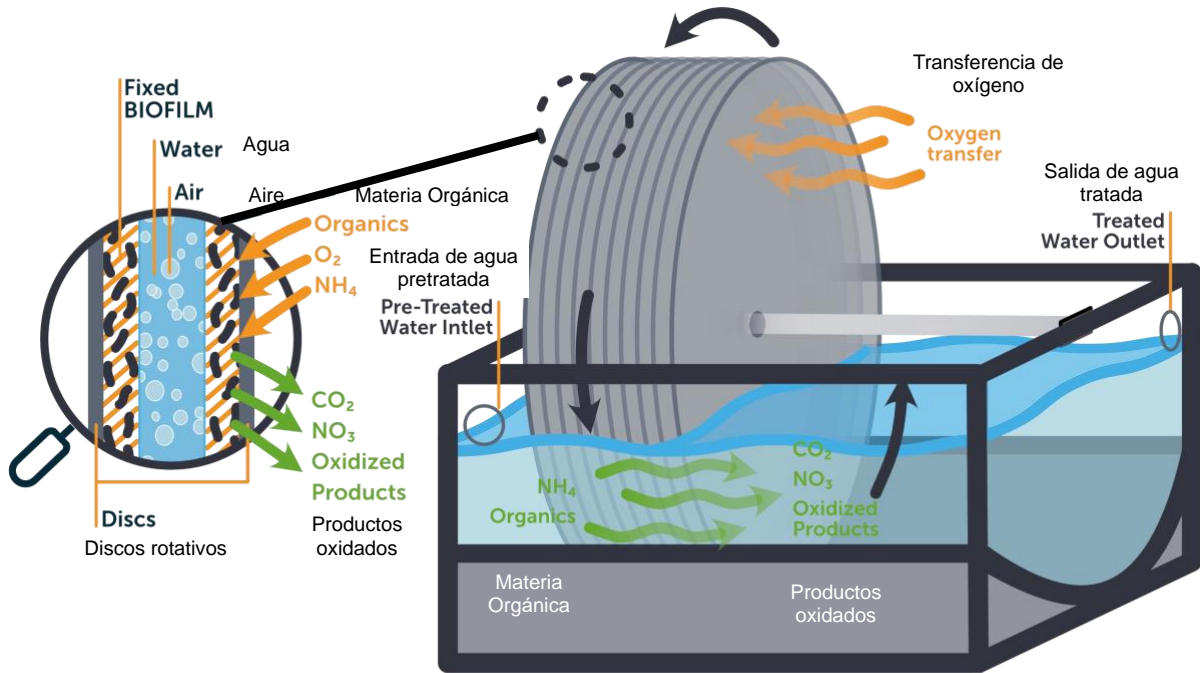


Diagrama 3-11. Arreglo de un biodisco.<sup>21</sup>

[Video de funcionamiento de un biodisco.](https://www.youtube.com/watch?v=lgWJKQyTwkk)

Dirección URL: <https://www.youtube.com/watch?v=lgWJKQyTwkk>

Son un conjunto de discos de un material determinado (Diagrama 3-11), tienen un soporte en el que se desarrolla gradualmente una película de biomasa bacteriana que emplea como sustrato para su metabolismo la materia orgánica soluble presente en el agua residual. Algunas ventajas y desventajas son enumeradas en la Tabla 3-3.

Ventajas	Desventajas
Altas eficiencias de remoción.	Altos costos.
Efluente parcialmente nitrificado y para uso agrícola.	Mayor capacitación para operadores.

<sup>21</sup> (Biorotor, 2022)

Ventajas	Desventajas
Disminución de requerimiento de uso mecánico.	Producción de lodos inestables.

Tabla 3-3. Ventajas y desventajas de los biodiscos.

### b) Lagunas de estabilización

Cuando las aguas residuales son descargadas en lagunas de estabilización se realiza en estas de forma espontánea un proceso conocido como autodepuración o estabilización natural en el que ocurren fenómenos de tipo físico, químico, bioquímico y biológico. La Tabla 3-4 contiene las ventajas y desventajas de las lagunas de estabilización, mientras que el Diagrama 3-12 ilustra de forma general a una laguna de estabilización.

Ventajas	Desventajas
Bajos costos por obra civil, operación y mantenimiento.	Requiere grandes extensiones de terreno.
Capacitación nula de los operadores.	Despide olores indeseables. Dependencia del sol y temperaturas constantes para tener buen funcionamiento.

Tabla 3-4. Ventajas y desventajas de las lagunas de estabilización.

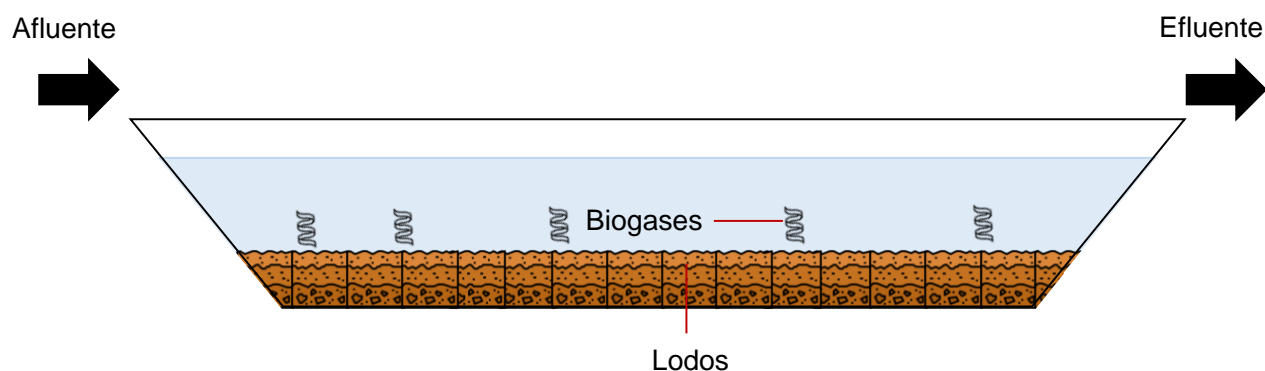


Diagrama 3-12. Laguna de estabilización.

### a) Lodos Activados

Este proceso se basa partiendo de que el agua residual, urbana o industrial, se somete a aireación y durante un período de tiempo se reduce su contenido de materia orgánica, formándose a la vez un lodo flocculante (Diagrama 3-13). En la Tabla 3-5 se enlistan algunas ventajas y desventajas que deben ser tomadas a consideración en el caso de esta operación unitaria.

Ventajas	Desventajas
Altas eficiencias de remoción.	Altos costos por obra civil y equipamiento.
Lodos parcialmente estabilizados.	Requiere un área de depósito por los residuales.
Menos requerimiento de terreno.	

Tabla 3-5. Ventajas y desventajas de lodos activados.

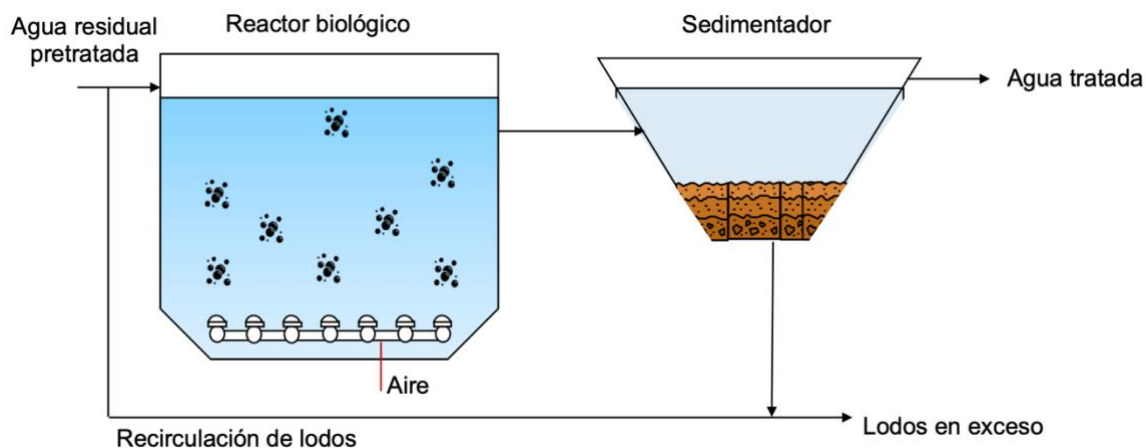


Diagrama 3-13. Arreglo de lodos activados.

### 3.3.3 Tratamiento Terciario

El tratamiento terciario es una serie de procesos destinados a conseguir la calidad del efluente superior a la del tratamiento secundario. Su principal objetivo es eliminar

la carga orgánica residual y aquellas otras sustancias contaminantes no eliminadas en etapas previas del tratamiento.

Algunos ejemplos de tratamientos terciarios en el Diagrama 3-14:

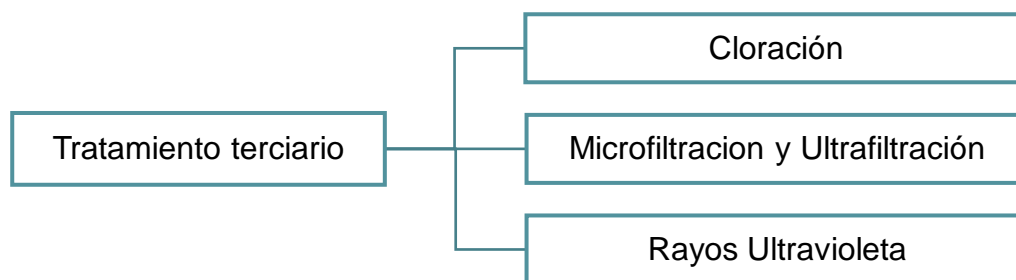


Diagrama 3-14. Operaciones unitarias utilizadas en el tratamiento terciario.

### a) Cloración

El cloro es el desinfectante más usado para el tratamiento del agua residual doméstica porque destruye los organismos al ser inactivados mediante la oxidación del material celular. El cloro puede ser suministrado en muchas formas que incluyen el gas de cloro, las soluciones de hipoclorito y otros compuestos clorados en forma sólida o líquida. Las ventajas y desventajas consideradas para la cloración son descritas en la Tabla 3-6.

Ventajas	Desventajas
En la actualidad la cloración es más eficiente en términos de costo.	Todas las formas de cloro son muy corrosivas y tóxicas.
El cloro residual que permanece en el efluente del agua residual puede prolongar el efecto de desinfección aún después del tratamiento inicial.	El cloro residual es inestable en presencia de altas concentraciones de materiales con demanda de cloro.

Tabla 3-6. Ventajas y desventajas del tratamiento de cloración.

---

## b) Microfiltración y Ultrafiltración

Su principio es una separación física partiendo del tamaño de poro de la membrana, lo que determina hasta qué punto son eliminados los sólidos disueltos, la turbidez y los microorganismos, por lo tanto, sustancias de mayor tamaño que los poros de la membrana son retenidas totalmente. La imagen 3-3 muestra un ejemplo de un equipo de ultrafiltración.



Imagen 3-3. Equipo de ultrafiltración.<sup>22</sup>

**Microfiltración:** Se utilizan membranas con un tamaño de poro de 0.1 y 10  $\mu\text{m}$ . La microfiltración puede ser aplicada a diferentes tipos de tratamientos de agua cuando se necesita retirar de un líquido las partículas de un diámetro superior a 0.1 mm.

**Ultrafiltración:** Permite retener moléculas cuyo tamaño oscila entre 0.001 y 0.1  $\mu\text{m}$ . Ventajas y desventajas de este equipo en la tabla 3-7.

---

<sup>22</sup> (REDA, s.f.)

Ventajas	Desventajas
Separación de los sólidos restantes muy efectiva.	Los costos de estos tratamientos son muy elevados.

Tabla 3-7. Ventajas y desventajas del tratamiento de microfiltración y ultrafiltración.

### c) Desinfección de Agua mediante luz Ultravioleta (UV)

Funcionan mediante la "radiación" o "iluminación" del flujo de agua con una o más lámparas de silicio cuarzo, con unas longitudes de onda de 200 a 300 nanómetros. Por lo tanto, el agua fluye sin detenerse por el interior de los purificadores, que contienen estas lámparas (Diagrama 3-15). La luz UV no cambia las propiedades del agua o aire, es decir, no altera químicamente la estructura del fluido tratado. Ventajas y desventajas de la desinfección mediante luz UV en la tabla 3-8.

Ventajas	Desventajas
Desinfección instantánea y eficiente. Ambientalmente adecuada. Garantizan la eliminación de entre el 99.90% y el 99.99% de los agentes contaminantes.	Altos costos de equipamiento y mantenimiento.

Tabla 3-8. Ventajas y desventajas del tratamiento mediante luz UV.

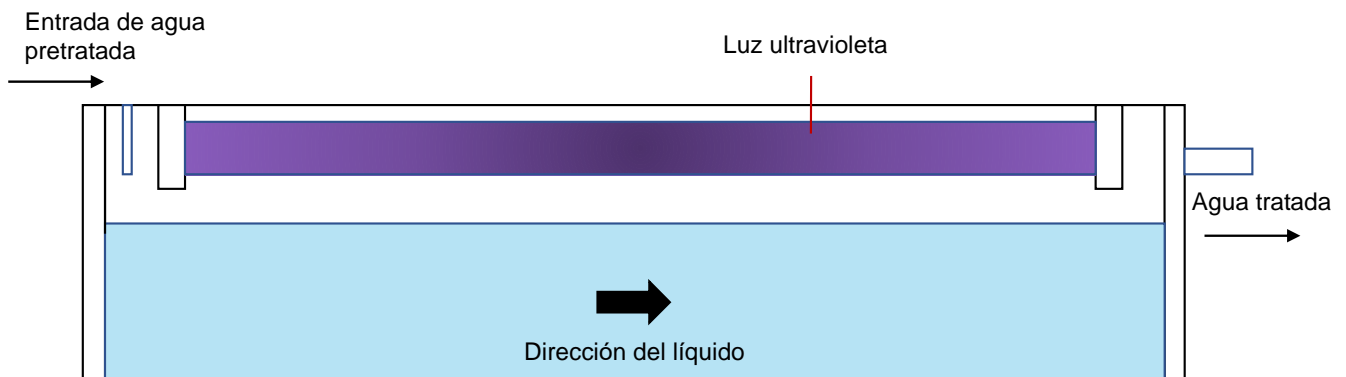


Diagrama 3-15. Arreglo de la desinfección por luz ultravioleta.

### 3.4 Normas Oficiales Mexicanas aplicables al tratamiento de aguas residuales

El principal objetivo de una PTAR es degradar la materia orgánica de las aguas residuales y hacer apta su composición final, según la forma en que esta se desee reutilizar. Ya sea para el caso que serán devueltas a los cuerpos de agua y de esta manera completen el ciclo natural del agua, o para ser reusadas en fines distintos, sin embargo, para garantizar que el efluente tenga las características requeridas para su siguiente uso existen entidades que se encargan de establecer normas y regularlas.

En el caso de México, la Comisión Nacional del Agua mediante el Comité Consultivo Nacional del Sector Agua tienen como tarea elaborar las Normas Oficiales Mexicanas *sobre la conservación, seguridad y calidad en la explotación, uso, aprovechamiento y administración de las aguas nacionales y de los bienes nacionales enunciados en el artículo 113 de la Ley de Aguas Nacionales, a fin de que sean expedidas por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, y así garantizar el derecho que toda persona tiene al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible, consagrado en el artículo 4° Constitucional.*<sup>23</sup>

Las Normas Oficiales Mexicanas dictan los estándares a cumplir en el proceso de saneamiento de una PTAR. El contenido de las Normas es de suma importancia, pues indica los límites máximos permisibles de diversos contaminantes y microorganismos nocivos para la salud. En muchos casos las especificaciones que indican las normas serán el objetivo por cumplir en el diseño del proceso de una PTAR.

---

Las Normas Oficiales Mexicanas vigentes en materia hídrica son diversas, pero para la presente investigación serán utilizadas las siguientes 3 , que son las aplicables al tratamiento de aguas residuales:

- **Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021**, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.<sup>24</sup>
- **Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996**, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. <sup>25</sup>
- **Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997**, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. <sup>26</sup>

De estas Normas se extraen los cuadros de las siguientes páginas (Tabla 3-9 y 3-10), que incluyen los parámetros que posteriormente serán utilizados como las concentraciones objetivo para cumplir en el proceso de aireación diseñado.

---

<sup>21, 22, 23 y 24</sup> (Comisión Nacional de Agua)



Parámetros (*) (miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	Ríos, arroyos, canales, drenes			Embalses, lagos y lagunas			Zonas marinas mexicanas			Suelo								
	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	Riego de áreas verdes			Infiltración y otros riegos			Cárstico		
										P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.
Temperatura (°C)	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
Grasas y Aceites	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21
Sólidos Suspendidos Totales	60	72	84	20	24	28	20	24	28	30	36	42	100	120	140	20	24	28
Demanda Química de Oxígeno	150	180	210	100	120	140	85	100	120	60	72	84	150	180	210	60	72	84
Carbono Orgánico Total*	38	45	53	25	30	35	21	25	30	15	18	21	38	45	53	15	18	21
Nitrógeno Total	25	30	35	15	25	30	25	30	35	NA	NA	NA	NA	NA	NA	15	25	30
Fósforo Total	15	18	21	5	10	15	15	18	21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	5	10	15
Huevos de Helminthos (huevos/litro)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1								
<i>Escherichia coli</i> , (NMP/100 ml)	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	600	50	100	200
Enterococos fecales* (NMP/100 ml)	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	50	100	200
pH (UpH)	6-9																	
Color verdadero	Longitud de onda									Coeficiente de absorción espectral máximo								
	436 nm									7,0 m <sup>-1</sup>								
	525 nm									5,0 m <sup>-1</sup>								
	620 nm									3,0 m <sup>-1</sup>								
Toxicidad aguda (UT)	2 a los 15 minutos de exposición																	
N.A: No Aplica P.M: Promedio Mensual P.D: Promedio Diario V.I: Valor Instantáneo NMP: Número más probable UpH: Unidades de pH UT: Unidades de Toxicidad * Si Cloruros es menor a 1000 mg/L se analiza y reporta DQO. * Si Cloruros es mayor o igual a 1000 mg/L se analiza y reporta COT. * Si la conductividad eléctrica menor a 3500 µS/cm se analiza y reporta <i>E. coli</i> . * Si la conductividad eléctrica es mayor o igual a 3500 µS/cm se analiza y reporta Enterococos fecales. Las determinaciones de Conductividad eléctrica y de Cloruros no requieren la acreditación y aprobación de la entidad correspondiente.																		

Tabla 3-9. Límites permisibles.<sup>27</sup>

<sup>27</sup> (SEGOB, 2022)

Parámetros (miligramos por litro)	Ríos, arroyos, canales, drenes			Embalses, lagos y lagunas			Zonas marinas mexicanas			Suelo								
										Riego de áreas verdes			Infiltración y otros riegos			Cárstico		
	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.
				0,1	0,15	0,2	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,4	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2
			0,4	0,1	0,15	0,2	0,2	0,3	0,4	0,05	0,075	0,1	0,1	0,15	0,2	0,05	0,075	0,1
			3	1	1,5	2	2	2,50	3	2	2,5	3	1	1,50	2	1	1,5	2
			6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6
			1,5	0,5	0,75	1	1	1,25	1,5	0,5	0,75	1	0,5	0,75	1	0,5	0,75	1
			0,02	0,005	0,008	0,01	0,01	0,015	0,02	0,005	0,008	0,01	0,005	0,008	0,01	0,005	0,008	0,01
			4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4
			0,4	0,2	0,3	0,4	0,5	0,75	1	0,5	0,75	1	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,4
			20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20
Parámetros medidos de manera total	<b>P.M: Promedio Mensual</b> <b>P.D: Promedio Diario</b> <b>V.I: Valor Instantáneo<sup>28</sup></b>																	

Tabla 3-10. Límites permisibles para metales y cianuros. <sup>26</sup>

<sup>28</sup> (SEGOB, 2022)

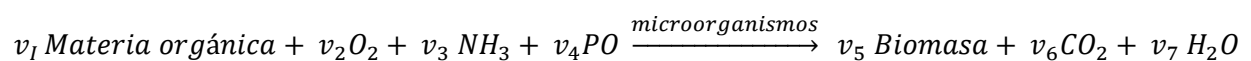
### 3.5 Oxidación biológica aeróbica

Una de las tecnologías más usadas en el mundo para el tratamiento de aguas residuales es la degradación de la materia orgánica mediante lodos activados, con propósito de remover el  $DBO_5$  existente en el afluente.

Este paso se categorizará en los procesos secundarios, por lo cual es precedido por algunos métodos físicos como el cribado. Una vez que el agua a tratar finaliza su paso por el procesamiento primario, está listo para ingresar en el tratamiento secundario, en este caso a los lodos activados. Este es un proceso biológico y en este paso se busca transformar las partículas biodegradables, mediante una reacción de oxidación y remover nutrientes como el nitrógeno y el fósforo.

Para que la oxidación de la materia orgánica sea posible, las aguas residuales son sometidas a un tanque aireado lleno de microorganismos degradadores. Con presencia de oxígeno los microorganismos transforman la materia orgánica en biomasa,  $CO_2$  y  $H_2O$ .

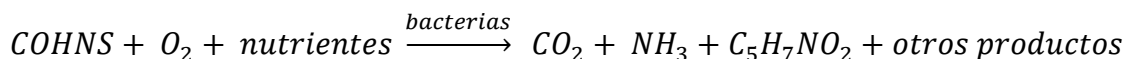
En la oxidación aeróbica de materia orgánica se logra mediante cultivos bacterianos mixtos, el proceso biológico llevado a cabo se resume en las siguientes ecuaciones:



Ecuación 3-1

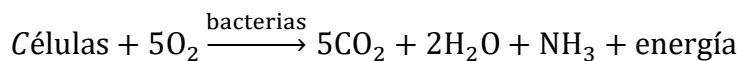
Donde  $v_x$  = Coeficientes estequiométricos.

### Oxidación y síntesis



Ecuación 3-2

### Respiración endógena



Ecuación 3-3

En la ecuación 3-2, *COHNS* representa la materia orgánica en el agua a tratar y al mismo tiempo funcionan como donador de un electrón, mientras que el oxígeno funciona como un receptor de electrón. Aunque se muestra que la reacción de respiración endógena (Ecuación 3) da como resultado productos finales y energía relativamente simples, también se forman productos finales orgánicos estables.

Es diversa la variedad de microorganismos usados para remover la materia orgánica de los afluentes a tratar, entre ellos están los microorganismos aeróbicos heterotróficos encargados de producir biopolímeros extracelulares. Los protozoarios que consumen bacterias y partículas coloidales, a diferencia de los microorganismos heterotróficos, prefieren disolverse en concentraciones de oxígeno de más de 1 g/mL y son sensibles a materias tóxicas. Los rotíferos también se encuentran en el tratamiento por lodos activados, estos organismos existen en tiempos de retención altos.

La remoción de  $DBO_5$  requiere suficiente tiempo de contacto entre el agua a tratar y los microorganismos heterotróficos, al igual que suficiente oxígeno y nutrientes. Durante la absorción inicial de materia orgánica más de la mitad de esta es oxigenada y el resto será nueva biomasa, que puede oxidarse aún más por la respiración endógena. La biomasa diaria excedente es separada por gravedad del efluente tratado para mantener las condiciones de operación adecuadas.

## Nitrificación- Desnitrificación Biológica

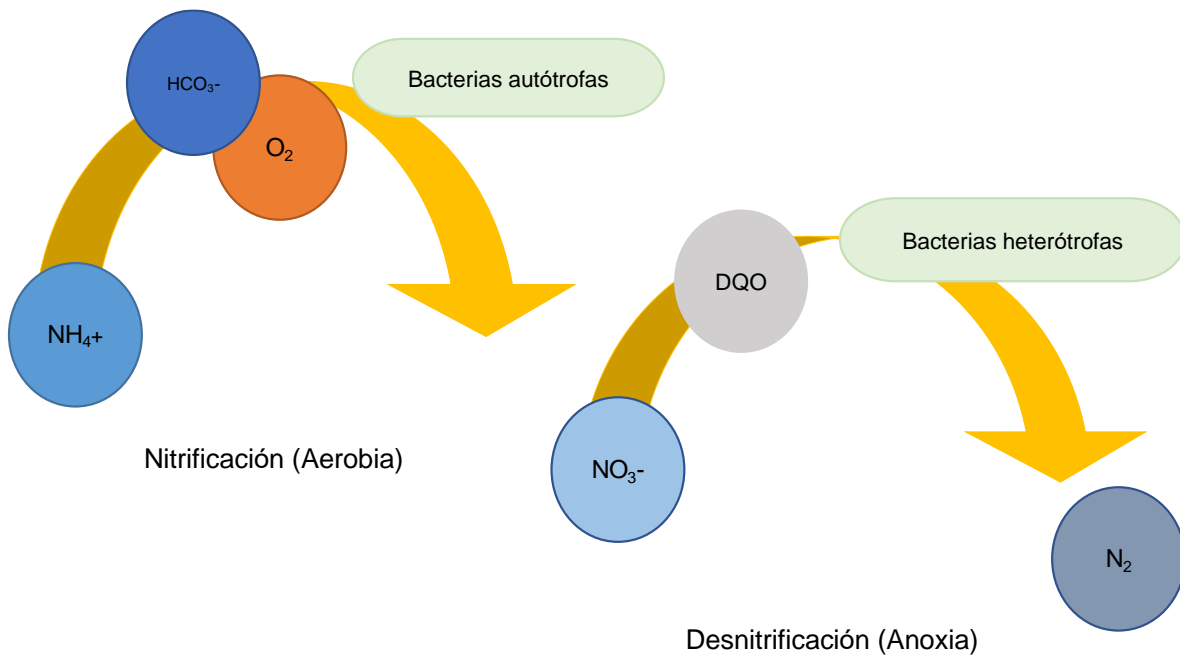


Diagrama 3-16. Nitrificación y desnitrificación.

La nitrificación describe los dos pasos de proceso biológico en donde el amonio ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) es oxidado a nitrito ( $\text{NO}_2\text{-N}$ ) y este a su vez es oxidado a nitrato ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) (Diagrama 3-16).

La concentración total de nitrógeno amoniacal y nitrógeno orgánico en PTAR municipales se encuentra en el rango típico de 25 a 45 mg/L.

La desnitrificación es la reducción biológica del nitrato, de óxido nítrico, óxido nitroso y gas nitrógeno.

### 3.6 Conceptos básicos de difusión de aire

El enfoque de la presente investigación consiste en hacer un estudio en las diferentes variables que influyen en la eficiencia del sistema de aireación para la etapa secundaria del tratamiento de aguas residuales, específicamente para la aplicación de lodos activados.

De acuerdo con el capítulo anterior el sistema de aireación es requerido para proporcionar aire, contar con oxígeno disuelto en el agua a tratar y con esto oxidar la materia orgánica y cumplir las especificaciones finales del tratamiento.

Dicho lo anterior, el sistema de aireación para un tanque de lodos activados debe cumplir con las siguientes características:

1. Cumplir con la demanda química de oxígeno.
2. Satisfacer la respiración aeróbica de la biomasa.
3. Satisfacer la demanda de oxígeno para la nitrificación.
4. Proveer la suficiente energía para mantener el mezclado.
5. Mantener la concentración de oxígeno requerido en el tanque. Se recomienda que el equipo debe ser dimensionado para proveer una concentración de 2 mg/L en el tanque para la carga promedio y 1 mg/L para condiciones pico.
6. Es sabido que podrían existir condiciones pico en una PTAR, para lo cual es recomendado usar un factor pico de 1.5 a 2 veces la carga de DBO<sub>5</sub> promedio.
7. Provisionar la flexibilidad de alcanzar la demanda mínima y máxima de oxígeno, previniendo una aireación excesiva.
8. Proporcionar un ahorro de energía.

El sistema de aire para el tratamiento de aguas residuales puede variar dependiendo de la función, la geometría del tanque, costos, necesidades de instalación y operación. A continuación, las principales categorías:

1. Aireadores sumergidos.
2. Aireadores superficiales.

Actualmente se considera que los aireadores superficiales son una tecnología obsoleta que provee menor eficiencia y mayores costos energéticos de consumo. En las PTAR municipales generalmente son utilizados los sistemas de

difusión (aireadores sumergidos). Algunas desventajas y ventajas de esta categoría de aireación se abordan en la tabla 3-11:

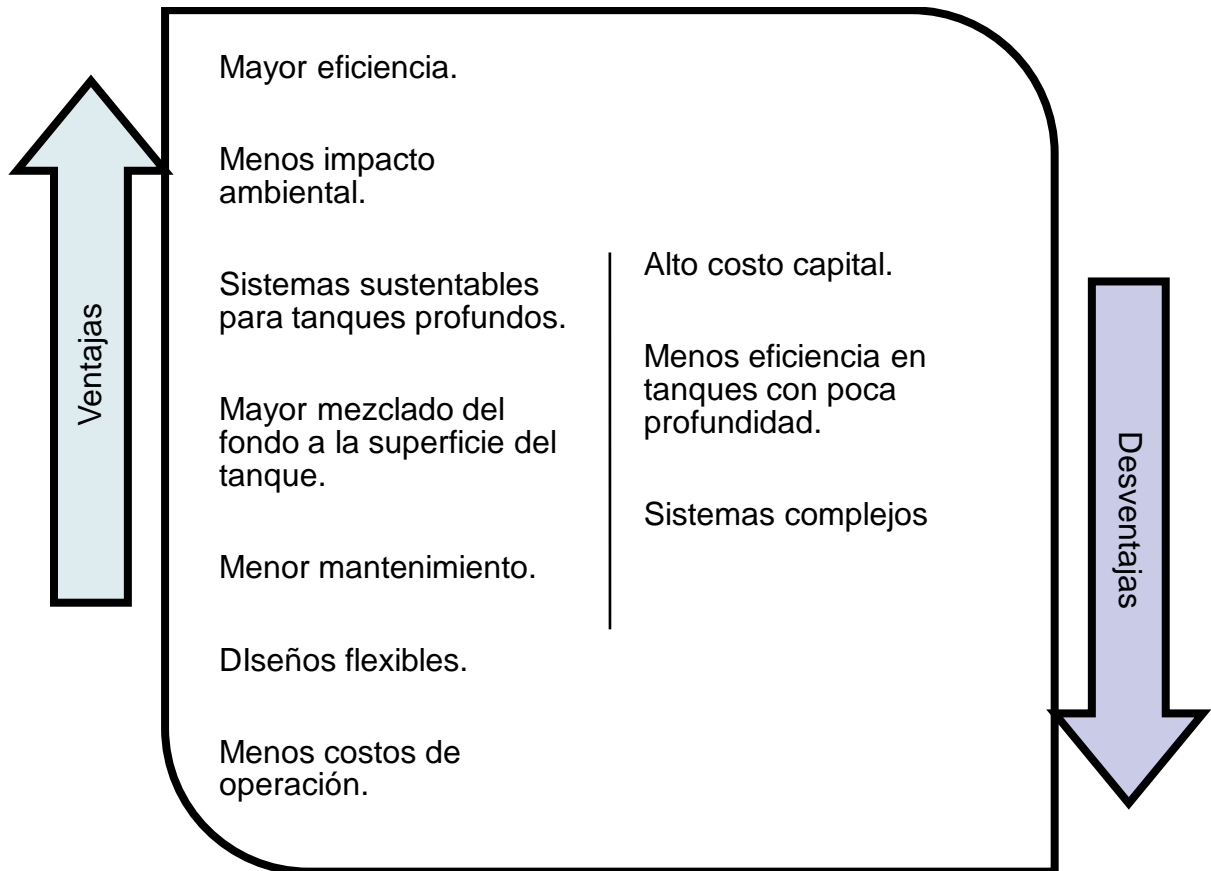


Tabla 3-11. Ventajas y desventajas de sistemas de difusión<sup>29</sup>.

El diagrama 3-17 contiene la clasificación, descripción, y aplicación de la aireación sumergida y la aireación superficial a manera de síntesis.

<sup>29</sup> (SSI Aeration, 2019)



Diagrama 3-17. Clasificación de aireación en el tratamiento de aguas residuales. (Metcalf & Eddy, Inc. , 2003)



Se estima que utilizando un sistema de difusión (Imagen 3-4) se podría ahorrar de un 30% a un 70% de energía en comparación con los aireadores superficiales. Los aireadores superficiales (Imagen 3-5) suelen ser seleccionados ya que requieren un costo inicial más bajo que la mayoría de los sistemas a comparar, sin embargo, evaluando los costos operativos que se presentaran a largo plazo se podría encontrar una diferencia considerable en sistemas sumergidos de difusión de aire.



Imagen 3-4. Sistema sumergido de difusión de aire.<sup>30</sup>



Imagen 3-5. Aireador superficial.<sup>31</sup>

<sup>30</sup> (Environmental Dynamics International, 2022)

<sup>31</sup> (Aeration Industries International, 2021)

### 3.6.1 Diseño de sistemas de Aireación

El diseño de un sistema de aire consiste en suplir la cantidad adecuada de oxígeno que requiere el tratamiento biológico. En esta sección se hace un listado de la metodología para calcular el flujo de aire (Diagrama-18):



Diagrama 3-18. Pasos para el cálculo de flujo de aire requerido.

#### I. AOR

El primer punto por determinar es la demanda de oxígeno requerida para degradar la materia orgánica. La demanda de oxígeno requerida será llamada **AOR** (Actual Oxygen Requirement o en español: requerimiento de oxígeno actual), sus unidades de medición son en términos de masa por tiempo. En el listado siguiente se enumeran los factores para calcular el AOR:

- **Flujo de diseño y carga de afluente a tratar:** El sistema de aireación debe ser capaz de proveer suficiente oxígeno para las condiciones de diseño, pueden ser flujos promedio o flujos pico.
- **Requerimientos de remoción de DBO<sub>5</sub>:** La demanda de oxígeno requerida para satisfacer la oxidación carbonácea va de un rango de 0.9 a 1.4 lb O<sub>2</sub> / lb de DBO<sub>5</sub> removida. Esta relación dependerá del tiempo de retención de los sólidos en el proceso o por sus siglas en inglés **SRT** (Solids Retention Time).

Un proceso con un STR prolongado requerirá mayor oxígeno por unidad de masa de  $DBO_5$ , debido a la respiración endógena que muestra en la Ecuación 3-3 de la sección 3.5.

- **Requerimientos para la reducción del Nitrógeno total:** En caso de que el sistema este diseñado para la remoción de amonio, debe ser considerada la demanda de oxígeno requerida para cumplir con la nitrificación adicional al considerado en el punto anterior. Generalmente se puede considerar 4.6  $lb/O_2$  por libra de amoníaco oxidado a nitrato.

De acuerdo con lo anterior tendremos que:  $AOR_{Total} = AOR_{DBO} + AOR_{NH_3-N}$

Ecuación 3-4

## II. SOR

Al tener calculado el AOR, seguirá determinar el **SOR** (Standard Oxygen Requirement o en español: requerimiento de oxígeno estándar) que es la cantidad de oxígeno necesario para suplir el AOR calculado después de hacer el ajuste a las condiciones ambientales del sitio en donde se encontrará el tanque de aireación. Las consideraciones estándar que incluye el SOR son:

- a) Agua potable
- b) Oxígeno disuelto = 0 g/mL
- c) Temperatura del agua= 20 °C
- d) Presión atmosférica= 1 atm

La relación entre el AOR y SOR es expresada en la siguiente ecuación:

$$\frac{AOR}{SOR} = \alpha \theta^{T-20} \frac{\tau \beta \Omega C_{20}^* - C}{C_{20}^*}$$

Ecuación 3-5

Donde:

T= Temperatura de agua a tratar.

C= Concentración de oxígeno disuelto.

$C_{20}^*$  = Valor de estado estacionario de la saturación de oxígeno disuelto en un tiempo infinito a 20 °C y una presión barométrica de 100 kPa (1,0 atm).

Los términos que componen la ecuación son factores de corrección, a continuación, su detalle (Tabla 3-12):

Factor de corrección	Nombre	Descripción	Valor típico
$\alpha$	Factor de corrección del oxígeno transferido	El factor $\alpha$ (alfa) es el ajuste de transferencia de oxígeno, las variaciones que influyen como las características del agua a tratar, y la configuración en el tanque de aireación. La transferencia de oxígeno que brindarán los difusores de un equipo de aireación es típicamente probada en agua limpia, entonces se entiende que el factor alfa es la relación entre la transferencia de oxígeno en agua a tratar respecto a agua limpia.	0.3 -1.0
$\theta$	Factor de corrección de temperatura para la transferencia de oxígeno.	Este factor considera las variaciones de la transferencia de oxígeno como resultado de la temperatura del líquido a tratar.	1.024
$\tau$	Factor de corrección para la saturación de oxígeno.	Este valor permite tener una corrección en la eficiencia de transferencia de oxígeno para considerar las fluctuaciones en la concentración de oxígeno que resultan de la variación de la temperatura de las aguas residuales. Es calculado dividiendo la saturación de oxígeno a la temperatura actual por la saturación de oxígeno a 20°C.	0.7 - 1.6

Factor de corrección	Nombre	Descripción	Valor típico
$\beta$	Factor de corrección de la solubilidad del oxígeno.	La solubilidad de $O_2$ en el agua residual está relacionada con la concentración de sales y partículas en el líquido a tratar. El factor $\beta$ representa la reducción de la eficiencia de transferencia de oxígeno que resulta de la presencia de estos compuestos en el agua.	0.95-0.98
$\Omega$	Factor de corrección de presión para la saturación de oxígeno.	Con este factor se consideran las variaciones de la eficiencia de transferencia de oxígeno a causa de la presión del aire atmosférico. La presión barométrica está en función de la elevación y la temperatura promedio comparada con la presión estándar.	$\frac{P_b}{14.7 \text{ psi}}$

Tabla 3-12. Factores de corrección en la relación SOR-AOR.<sup>32</sup>.

### III. Flujo de aire requerido

El flujo de aire requerido para cumplir con la demanda de oxígeno puede ser determinado si se especifica la eficiencia de transferencia o SOTE (de sus siglas en inglés Standard Oxygen Transfer Efficiency o en español: eficiencia de transferencia de oxígeno estándar). El SOTE se entiende como la relación entre la cantidad de oxígeno que se proporciona al agua a tratar y lo que realmente se transfiere:

$$SOTE = \frac{SOTR}{w_0}$$

Ecuación 3-6

Donde  $w_0$  indica la fracción másica de oxígeno en aire seco:

$$\frac{w_0}{w} = 0.2095 \frac{\text{mol de } O_2}{\text{mol de aire}} \times 32 \frac{\text{g de } O_2}{\text{mol de } O_2} \times \frac{\text{mol de aire}}{28.964 \text{ g de aire}} = 0.23 \frac{\text{g de } O_2}{\text{g de aire}}$$

Ecuación 3-7

---

<sup>32</sup> (Water Environmental Federation, 2017)

Donde:

$$w = p_s G_s$$

Ecuación 3-8

Donde:

$p_s$  = Densidad del gas.

$G_s$  = Flujo volumétrico del gas.

Combinando la ecuación 3-6, 3-7 y 3-8:

$$w_0 \frac{kg}{hora} = 0.2315 \times 1.293 G_s = 0.30 G_s \frac{m_n^3}{hora}$$

$$w_0 \frac{lb}{hora} = 0.2315 \times 0.075 G_s \times \frac{60min}{1 hora} = 1.04 G_s SCFM$$

$$SOTE = \frac{SOTR \frac{lh}{hora}}{1.04 G_s SCFM} = \frac{SOTR \frac{kg}{hora}}{0.30 G_s \frac{m_n^3}{hora}}$$

33

Ecuación 3-9

El aire necesario para mantener la biomasa en suspensión también debe ser considerado en los cálculos de la demanda de aire. El volumen de aire que se requiere para proveer la suficiente energía de mezclado depende de diversos factores como son: la concentración de la biomasa y la geometría del tanque de aireación. Usualmente el aire requerido para mezcla es menor al requerido para oxidar la biomasa y cumplir con el proceso biológico, sin embargo, es importante y recomendado hacer la verificación en el cálculo, hacer la comparación entre las

---

<sup>33</sup> (Ríos Cavazos, 2009)

demandas de aire y seleccionar la variable determinante para hacer el diseño de la red de difusión de aire.

La eficiencia de transferencia de oxígeno es un factor clave en el diseño, pues al ser un proceso que requiere la aportación de oxígeno las 24 horas del día, los 365 días del año, este paso en el proceso representa el mayor aporte de consumo de energía en las PTAR. Es cierto que existirán variaciones en los flujos y cargas a lo largo del día, pero se debe evitar sobredimensionar los equipos de aireación. Algunas consideraciones para evitar el sobredimensionamiento y optimizar el consumo energético son:

- Seleccionar sopladores con variedad de capacidades de regulación.
- Definir zonas flexibles en los tanques de aireación que puedan alternar su operación entre condiciones aeróbicas y anaeróbicas.
- Definir estrategias de control que ajusten la salida del soplador para satisfacer las demandas de oxígeno en tiempo real.

### **3.7 Factores que influyen en el SOTE**

El SOTE es el parámetro más usado para hacer comparaciones entre diferentes opciones de sistemas de difusión y siempre se buscará tener un valor más alto. Este es presentado en porcentaje y puede ser establecida por la profundidad específica o por unidad de profundidad del tanque.

#### **3.7.1 Sistemas de difusión de aire vs aireación superficial.**

Previamente se desarrolló información sobre los tipos de sistemas para proveer oxígeno al proceso biológico en el tratamiento de aguas residuales y las ventajas y desventajas de estos. Entre las principales ventajas de los sistemas de difusión son su eficiencia, es decir, la cantidad de oxígeno que proveen al proceso con respecto

a su consumo energético. Esta ventaja está completamente relacionada con el SOTE.

En la tabla 3-13 se muestra una lista con características más específicas:

Sistemas de difusión de aire

Aireadores superficiales

Energía de mezclado	
Utilización total del área del tanque para distribución del oxígeno.	Están limitados a la ubicación del aireador, ofreciendo una deficiente distribución del aire.
Ahorro energético	
Aproximadamente un 40% de ahorro energético contra otro tipo de sistema.	Altos costos de energía.
Flexibilidad del proceso	
Facilidad de modificar el sistema.	Sin capacidad de modificar la carga de aire.
Electricidad reducida	
Se requiere un soplador con menor potencia.	Es necesaria mayor carga de potencia.
No se utilizan cables eléctricos en el tanque.	Cables eléctricos a cada unidad, costosos y por lo cual incrementa la presencia de futuros riesgos.



Sistemas de difusión de aire	Aireadores superficiales
<b>Costo capital</b>	
Económico para tanque profundos. Competitivo para tanques poco profundos. Formación de espuma reducida. Mantenimiento reducido. Sistemas con tiempo de vida de 10-20 años.	Genera espuma o aerosoles. Requieren mayor mantenimiento de elementos mecánicos. Es necesario protección del piso del tanque o control de erosión. Tiempo de vida de 10 años aproximadamente.

Tabla 3-13. Sistemas de difusión vs aireadores superficiales.<sup>34</sup>

Se han documentado diversos casos de estudio en donde se reflejan los ahorros energéticos al sustituir alguna opción de aireación superficial por un sistema de difusión, a continuación, se presenta la comparativa al sustituir un aireador tipo Jet (aireador superficial) por un sistema de aireación difusa en una planta con operación de Alliance Water Resources (AWR) en MO, EUA (Environmental Dynamics International, 2020).

Analizando los consumos energéticos, se encontró un ahorro de más del 40%, los retornos de inversión al hacer el remplazo total por su tecnología eran positivos y de esta manera consiguieron un subsidio por parte de la compañía eléctrica local.

Se hizo una instalación de difusores de esta marca y fueron aprovechados los sopladores existentes, ya que estos contaban con variadores de frecuencia que se ajustaban a los resultados de medidores de oxígeno que estaban vinculados a los mismos, brindando un ajuste eficiente a los sopladores para proveer la carga de oxígeno requerido por el proceso de la planta.

---

<sup>34</sup> (Environmental Dynamics International, 2022)

Con este remplazo del equipo de aireación y ajuste a los sopladores, el consumo eléctrico se redujo a más del 40% por mes en promedio. El consumo mensual antes de las mejoras correspondía a 117,480 kWh contra un 68,394kWh al completar el proyecto. Se reportó que el retorno de inversión fue menor a tres años, tiempo que duró el proyecto. Los datos de estudio de caso se muestran en la sección siguiente (Tabla 3-14 - 3-16 y Gráfica 3-1 y 3-2):

**Electricidad usada por mes**

Datos base	
kW hora promedio / mes	117,490.00
\$ promedio / mes	\$ 6,215.11 <sup>1</sup>

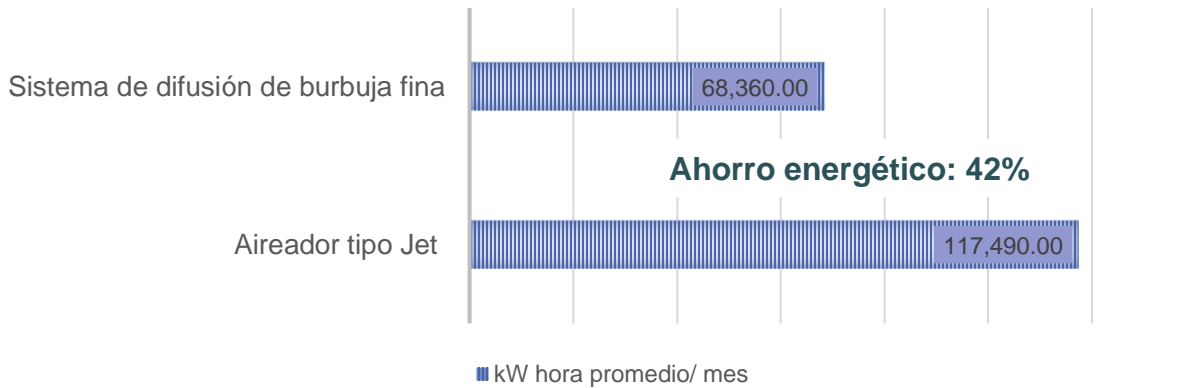
Tabla 3-14. Consumos del aireador tipo Jet.<sup>35</sup>

Datos posteriores <sup>2</sup>	
kW hora promedio / mes	68,394.00
\$ promedio / mes	\$ 4,910.28 <sup>1</sup>

Tabla 3-15. Consumos del sistemas de difusión de burbuja fina. <sup>36</sup>

Nota 1: Costos en dólares estadounidenses.

Nota 2: 20 meses después del remplazo de equipo.

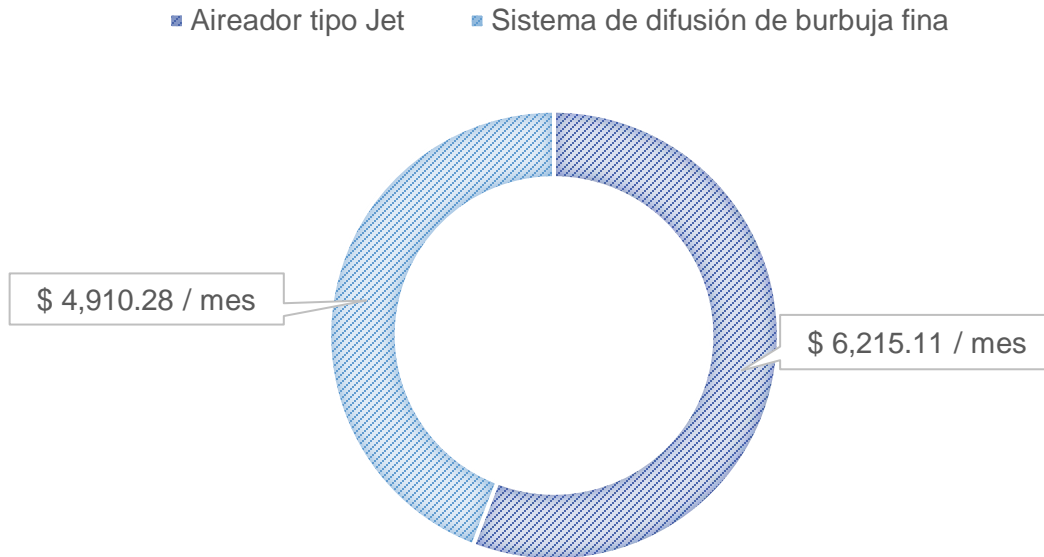


Gráfica 3-1. Consumo eléctrico del aireador Jet vs el consumo del sistema de difusión.

<sup>35,37</sup> (Environmental Dynamics International, 2020)

Ahorro energético promedio / mes (USD)	\$ 1,304.82
20 meses de ahorros de energía eléctrica	<b>\$ 26,096.45</b>

Tabla 3-16. Ahorro económico.<sup>37</sup>



Gráfica 3-2. Consumo económico mensual de cada tecnología.

### 3.7.2 Tamaño de burbuja

Tratándose particularmente de los sistemas de aireación de difusión, se clasifican en dos tipos de burbuja: difusores de burbuja fina y difusores de burbuja gruesa, ambos presentan ventajas y desventajas y la selección de esta categoría se realiza basándose en el tipo de difusor que mejor se adapte a las necesidades de proceso, geometría de tanque y aplicación requerida.

No obstante, es importante identificar las características y funciones de cada tipo de difusor para hacer una selección adecuada. Esta investigación está enfocada a una

<sup>37</sup> (Environmental Dynamics International, 2020)

PTAR municipal, puntualmente para un reactor biológico con un proceso de lodos activados. Conociendo las características del proceso se considerará ese enfoque para la selección. Previo a indagar entre las características de los dos tipos de burbuja en un difusor se realizará un análisis de los fundamentos de la transferencia de oxígeno.

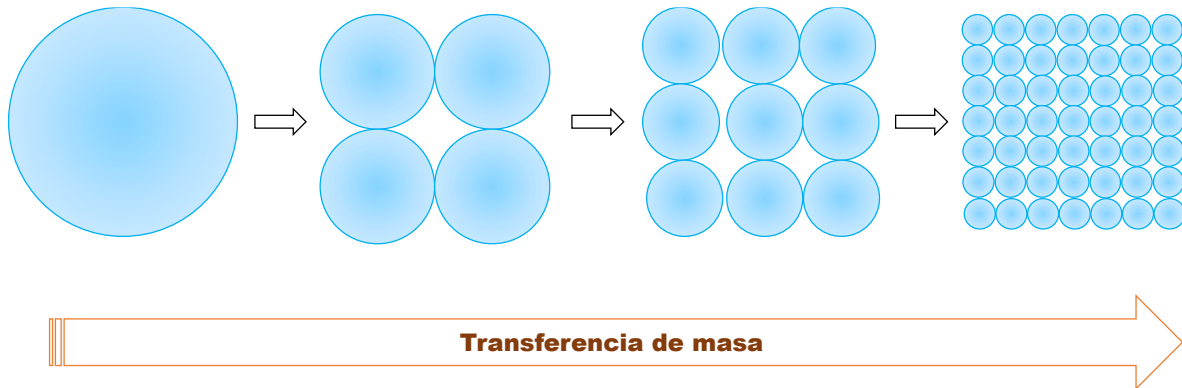


Diagrama 3-19. Transferencia de masa con diferentes diámetros de burbuja.

Los sistemas de difusión proveen oxígeno al agua mediante burbujas de aire y bajo un principio de transferencia de masa. El área de contacto para la transferencia de masa será mayor mientras las burbujas sean de menor diámetro, favoreciendo así la velocidad de transferencia de oxígeno<sup>38</sup> que esté contenido en el aire inyectado (Diagrama 3-19). En otros términos, el factor de transferencia de masa está expresada en función del área:  $f(k_{La})$ .

El tamaño de burbuja del difusor definirá entonces las características de este, así como su capacidad para transferir oxígeno, las tablas 3-17 y 3-18 ilustran los difusores más comunes en la industria de saneamiento tanto en burbuja fina como gruesa.

<sup>38</sup> (Deckwer W. D., 1998)

Difusores de burbuja fina	
<p>Tipo: Disco</p>  <p><a href="#">Video de patrón de aireación de difusor de disco.</a><sup>39</sup> Dirección URL: <a href="https://www.youtube.com/watch?v=y6mhg-NK2no">https://www.youtube.com/watch?v=y6mhg-NK2no</a></p>	<p>Tubular</p>  <p><a href="#">Video de patrón de aireación de difusor tubular. (Burbuja gruesa vs burbuja fina)</a><sup>40</sup> Dirección URL: <a href="https://www.youtube.com/watch?v=K2DNbpRD2Fg">https://www.youtube.com/watch?v=K2DNbpRD2Fg</a></p>
Ventajas	Desventajas
<p><b>Aireación eficiente:</b> Dispersan más oxígeno en la columna de agua para lograr una aireación más eficiente y normalmente producen al menos el doble de masa de oxígeno que los difusores de burbuja gruesa.</p> <p><b>Eficiencia en transferencia de energía:</b> Una gran cantidad de burbujas diminutas, transfieren más oxígeno a la columna de agua en diferencia con una cantidad de burbujas más grandes.</p> <p><b>Eficiencia energética:</b> A menor cantidad de aire comprimido que se necesita para los difusores de burbuja finas, menos exigencia tienen los sopladores que alimentan el sistema de aireación.</p>	<p><b>Energía de mezclado menor:</b> Las burbujas finas producidas por estos difusores, si bien son eficientes para la transferencia de oxígeno, tienden a generar una energía de mezclado débil.</p> <p><b>Instalación y limpieza compleja:</b> Para hacer mantenimiento se debe vaciar por completo el tanque, esto requiere mucho tiempo y costos.</p>

Tabla 3-17. Ventajas y desventajas de difusores de burbuja fina.<sup>41</sup>

<sup>39</sup> (You Tube, 2022)

<sup>40</sup> (You Tube, 2022)

<sup>41</sup> (SSI Aeration, 2019)

Difusores de burbuja gruesa	
Tipos:	
<p>Disco</p> 	<p>Banda ancha</p> 
<p><a href="https://www.youtube.com/watch?v=LH92vk40RV8">Video de patrón de burbuja gruesa.</a><sup>42</sup></p> <p>Dirección URL:  <a href="https://www.youtube.com/watch?v=LH92vk40RV8">https://www.youtube.com/watch?v=LH92vk40RV8</a></p>	
Ventajas	Desventajas
<p><b>Buena energía de mezclado:</b> Las burbujas gruesas al ser de mayor volumen desplazan más líquido.</p> <p><b>Requieren menos mantenimiento:</b> Los orificios más grandes de estos difusores hacen que tiendan a obstruirse menos, igualmente porque no tienen membrana a diferencia de los difusores de burbuja fina. Esto implica ahorro de dinero y tiempo en cuestiones de mantenimiento.</p> <p><b>Durabilidad:</b> La resistencia al ensuciamiento significa que se desgastarán menos y requerirán remplazo nula o con menor frecuencia.</p>	<p><b>Menor transferencia de oxígeno:</b> Al producir burbujas más grandes que viajan más rápido a través de la columna de agua se transfiere menor oxígeno.</p> <p><b>Aireación menos eficiente:</b> La cantidad de aire comprimido necesaria para que funcione un difusor de burbujas gruesas demanda mayores exigencias a los sopladores y un mayor consumo al sistema eléctrico.</p>

Tabla 3-18. Ventajas y desventajas de difusores de burbuja gruesa.<sup>43</sup>

<sup>42</sup> (You Tube, 2022)

<sup>43</sup> (SSI Aeration, 2019)

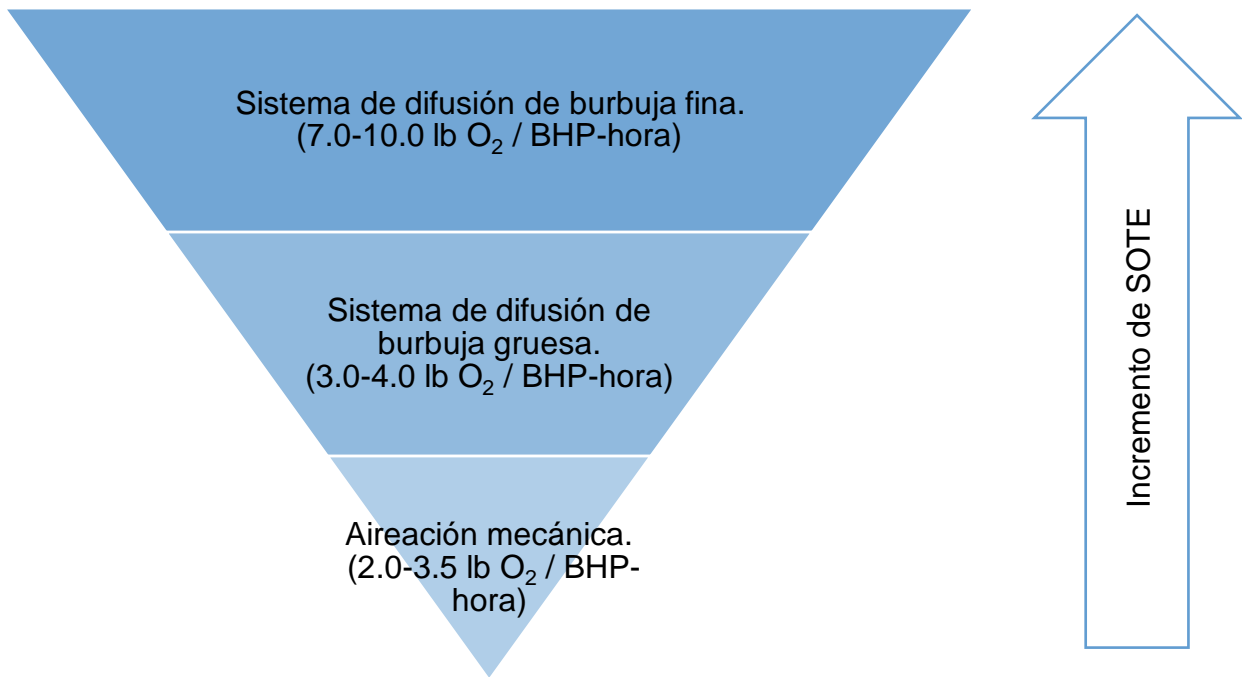
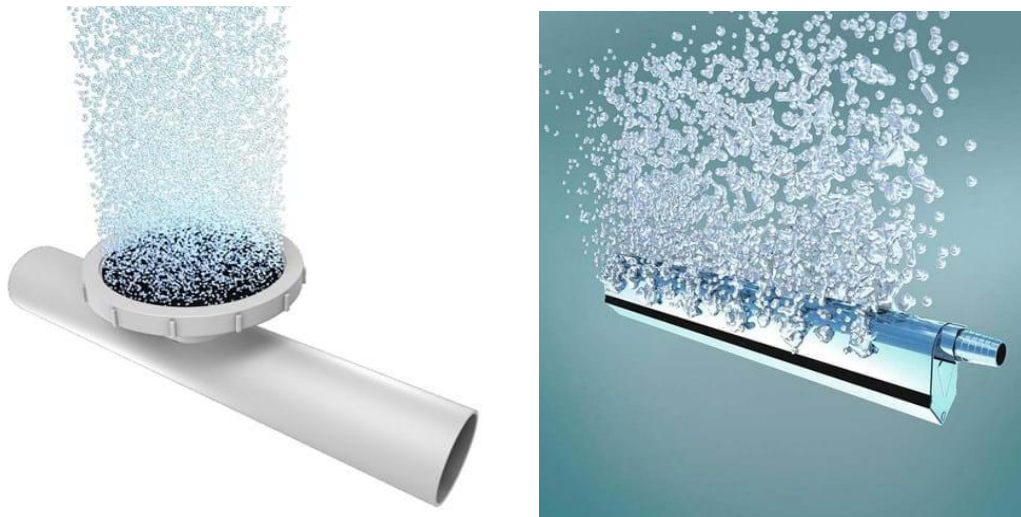


Diagrama 3-20. Eficiencia de equipos de aireación.<sup>44</sup>



<sup>44</sup> (SSI Aeration, 2019)

<sup>45</sup> (Xylem, 2022)

### 3.7.3 Densidad de difusión (difusores/área del tanque)

Es importante mencionar que el diseño de una red de difusión procura tener un espaciamiento óptimo entre difusores manteniendo una distribución uniforme que cubra el área del tanque y evitando tener espacios muertos que carezcan de aireación, y de esta manera evitar sufrir una afectación en el tratamiento biológico.

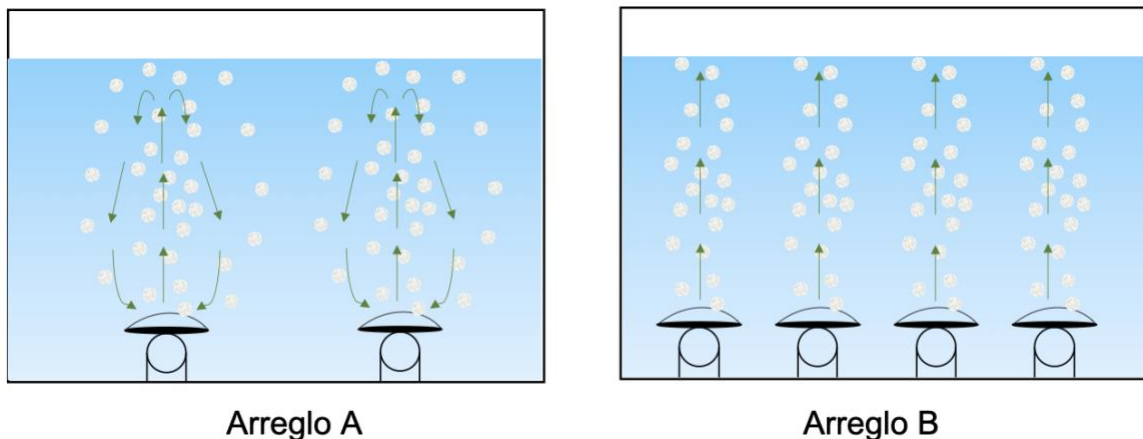


Ilustración 3-1. Baja densidad de difusión vs alta densidad de difusión.

El impacto que tiene una adecuada densidad de difusión en un tanque radica en que disminuye el efecto “Slip” que se puede apreciar en la Ilustración 3-1 en el arreglo A, es decir, la recirculación de las burbujas de aire ocasiona que colisionen entre sí y se formen burbujas más grandes reduciendo el área total de transferencia. El ejemplo que se ilustra en el arreglo B minimiza este efecto y además reduce la velocidad del agua, maximizando el tiempo de retención de las burbujas.

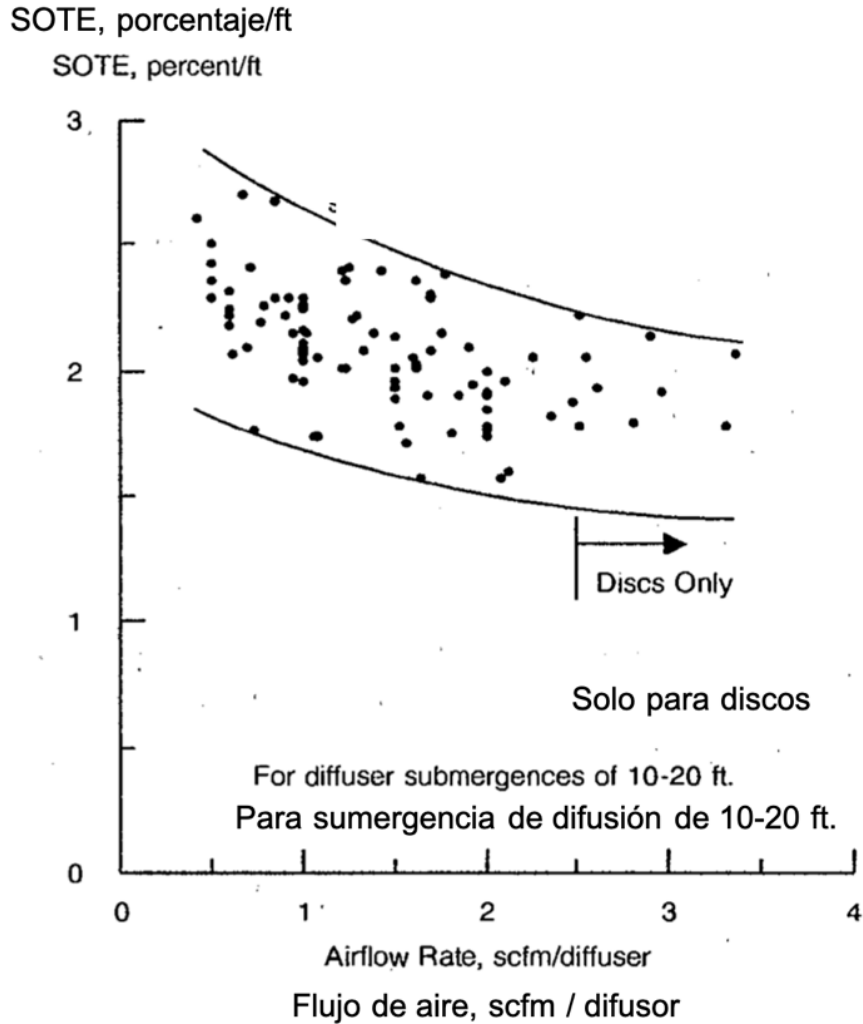
### 3.7.4 Flujo de aire por difusor

Los difusores van acompañados con una ficha técnica en donde se puede encontrar el rango de flujo de aire al cual es capaz de operar. Usualmente se recomienda que los difusores trabajen al 50% del rango de flujo especificado, sin embargo, se pueden tener diversos escenarios dependiendo las condiciones mínimas, promedio y máximas de una PTAR. En otras palabras, evitando el sobre



diseño del sistema se podría considerar 50% de la capacidad de aire a manejar a condiciones promedio y exceder este flujo a condiciones pico.

Además del impacto que tiene el flujo de aire por difusor, es fundamental dar cuidado a las membranas de los difusores y con esto prolongar el tiempo de vida útil del sistema. Las membranas tienen perforaciones que tienden a inflarse mientras están en operación y podrían reventarse como un globo por estar sometidas a un flujo de aire alto.



Gráfica 3-3. Efecto del flujo por difusor en el SOTE. <sup>46</sup>

<sup>46</sup> (EPA, 1999)

Cada fabricante de difusores pone a disposición de los usuarios curvas SOTE, que son indicadores de este factor a las condiciones específicas de un tanque.

La tendencia de estas curvas en difusores de burbuja fina es que se alcanza mayor SOTE a menor flujo de aire por difusor, como se observa en el ejemplo de la Gráfica 3-3.

El efecto que ocurre con las burbujas en la variación de flujo de aire por difusor se explica con el efecto “Slip”, pues en el caso que se opera a un alto flujo por difusor, (imagen derecha a continuación) hay mayor presión, ocasionando mayor velocidad en las burbujas y con esto el tiempo de retención para transferir el oxígeno al agua es reducido. Caso contrario con el ejemplo de bajo flujo por difusor, la velocidad de las burbujas del aire es baja incrementando el tiempo de retención, favoreciendo al SOTE y decreciendo el efecto “Slip”(Ilustración 3-2).

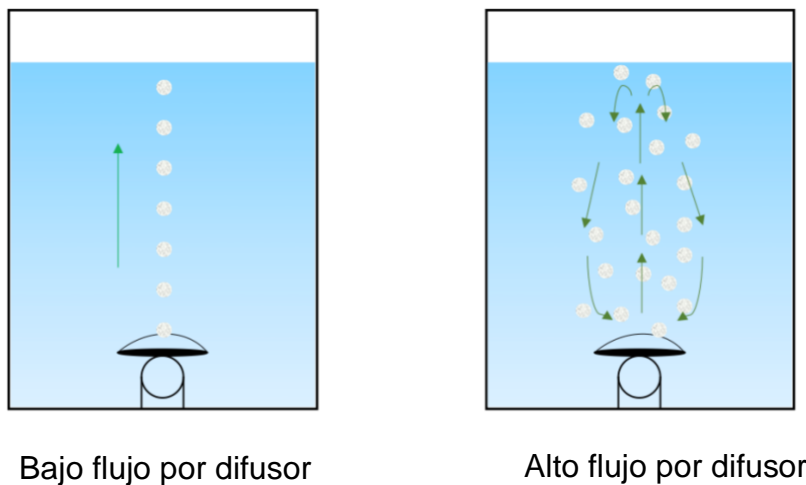


Ilustración 3-2. Bajo flujo por difusor vs alto flujo por difusor.

### 3.7.5 Columna de agua del tanque

En las curvas SOTE es posible variar la columna de agua en el eje “y”. En la Ilustración 3-3 se observa de manera gráfica como influye la columna de agua favoreciendo el SOTE a mayor altura de esta variable. El efecto que se produce con esta variación es que las burbujas cuentan con mayor distancia para su

trayectoria promoviendo que el tiempo de retención sea mayor y favoreciendo la transferencia ente el oxígeno-agua y al mismo tiempo el SOTE.

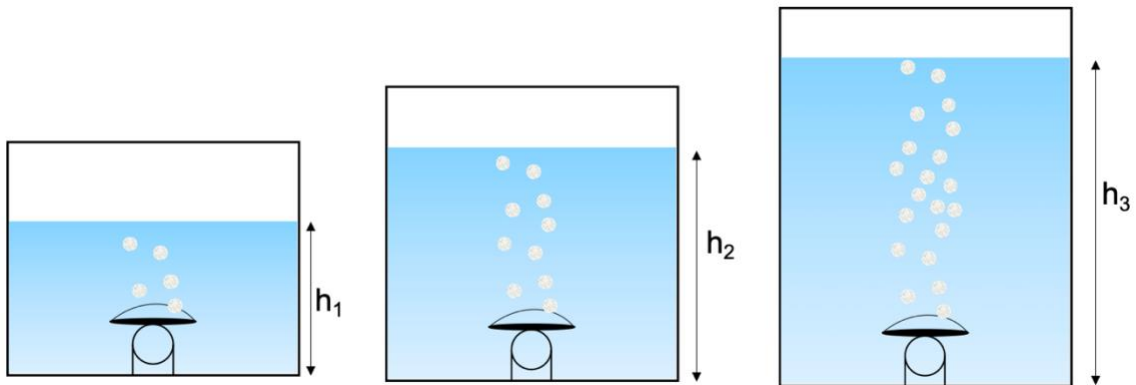
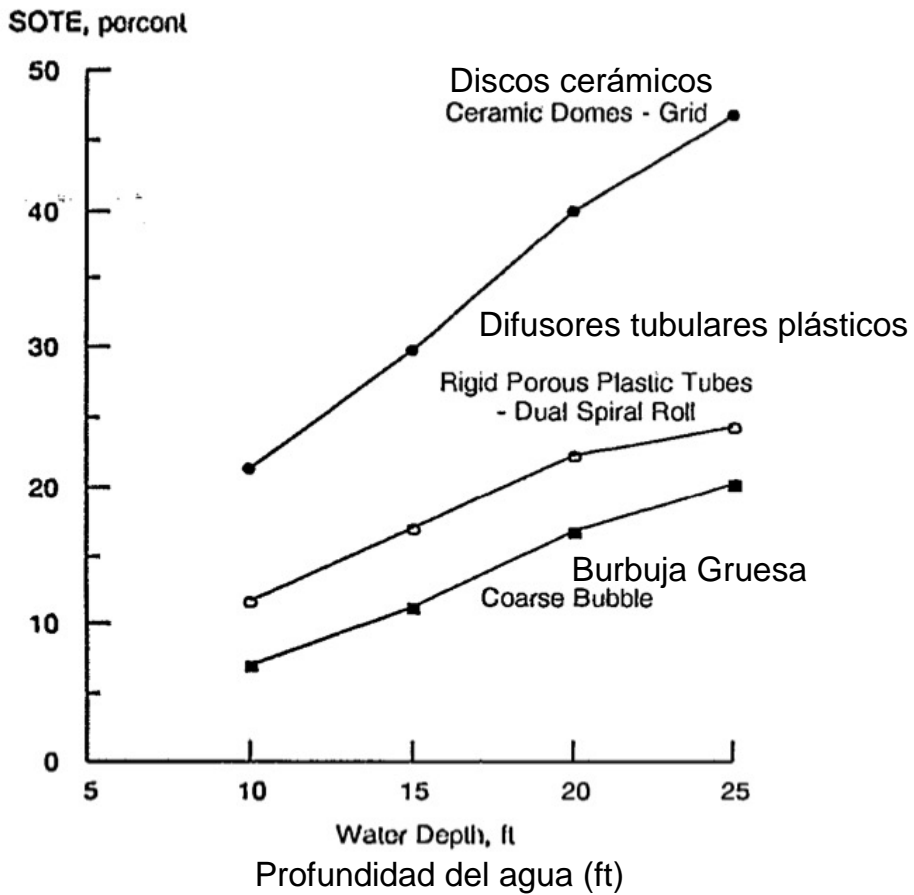


Ilustración 3-3. Efecto de la columna de agua.

Este efecto es apreciado igualmente en la Gráfica 3-4.

SOTE porcentaje



Gráfica 3-4. SOTE (%) vs profundidad del agua.

Se debe tener cautela en la variación de la altura del tanque, pues fijarla en una distancia muy alta sería contraproducente, es decir, generaría una caída de presión extensa y esto impactaría en la selección del soplador. Aunque se tendría un SOTE favorable y en consecuencia un flujo de aire para el proceso bajo, la caída de presión requeriría un soplador con mayor potencia aumentando así el gasto energético para su operación.

La caída de presión es consecuencia de las fuerzas de fricción que se ejercen en un flujo al interior de un sistema de tuberías, ejemplos son, el trayecto de la red que suministra aire del soplador al tanque y una mala elección en la profundidad del tanque. A mayor caída de presión la energía requerida de los sopladores aumentará. La siguiente ecuación expresa matemáticamente este efecto:

$$h_f = \frac{fLv^2}{2gD}$$

Ecuación 3-10. Caída de presión.

Donde:

$h_f$  = Pérdida de presión.

$f$  = Factor de fricción.

$L$  = Longitud de la trayectoria de la tubería.

$g$  = Aceleración de la gravedad.

$D$  = Diámetro interno de la tubería.

### 3.7.6 Tecnología del soplador

Dentro de las opciones de sopladores existe una amplia variedad en cuanto características y precios, si bien, no tiene un efecto directo en el SOTE, es una pieza del sistema importante debido a que un soplador eficiente en conjunto con un sistema de difusión que cuente con las características que favorezcan la eficiencia serían excelentes componentes para un proceso biológico.

El soplador es requerido usualmente para proporcionar el aire a la PTAR que opere procesos de lodos activados promoviendo la digestión anaeróbica, manteniendo los

sólidos en suspensión en los tanques y además también son utilizados en la etapa primaria en los desarenadores.

Los sopladores son clasificados principalmente en tres grupos:

- **Soplador de desplazamiento positivo:** Esta clasificación se usa principalmente en aplicaciones pequeñas. Son máquinas de capacidad constante y presión variable, funcionan mediante elementos rotatorios que desplazan un volumen constante con cada revolución, en otras palabras, logran un desplazamiento de cantidad constante de aire sin modificar la presión del sistema.

Para su selección en una PTAR se debe considerar que, si se cuentan con variables de operación, mínimas, promedio y pico, no sería de gran utilidad pues, los flujos inyectados al sistema no podrían ser variados. Una desventaja de los sopladores de desplazamiento positivo es que son ruidosos, razón por la cual es necesario la instalación de silenciadores.

- **Sopladores centrífugos:** Son utilizados en aplicaciones medianas o grandes de PTAR.

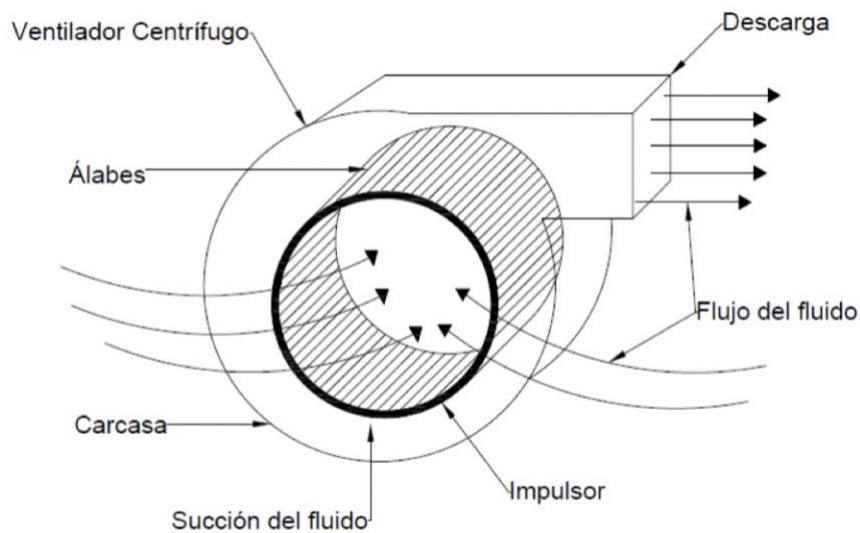


Imagen 3-7. Soplador centrífugo.<sup>47</sup>

<sup>47</sup> (Ballesteros Hernández, 2015)

Los sopladores centrífugos típicamente funcionan a velocidad constante y permiten variar la salida del flujo de aire acelerando la válvula de entrada del soplador (Imagen 3-7). Como su nombre lo indica funciona bajo el principio de la fuerza centrífuga.

El aire entra de forma axial cambiando su dirección a la entrada para continuar su trayectoria de forma radial sobre los álabes y finalmente ser expulsado de forma transversal.

- **Sopladores de alta eficiencia:** Buscan ahorros energéticos que beneficien los impactos ambientales porque reducir los requerimientos de energía de los sopladores de aireación promueve la reducción de emisiones de contaminantes y también los gastos de operación. La tecnología de los sopladores ha avanzado, logrando tener opciones con rodamientos magnéticos, característica que los hace extremadamente eficientes. Estas tecnologías resultan atractivas porque proporcionan al usuario diversas ventajas, desde mayores rendimientos o mayor vida útil (Imagen 3-8).

El enfoque innovador de los sopladores con rodamientos magnéticos logra niveles de rendimientos que anteriormente no eran posibles. En el funcionamiento de estos sopladores no hay contacto, por lo tanto, la fricción es casi nula. Se estima que existe un espacio de aire de entre 0.5 mm - 1 mm entre el rotor y el estator, además tienen mayor control de vibraciones y menor desgaste.

Su funcionamiento se basa en los componentes listados a continuación:

1. Los rodamientos constan de elementos estacionarios y componentes giratorios, estator y rotor respectivamente. En conjunto estos elementos crean un campo magnético que controlará la opción del rotor.

2. En esta tecnología se incluyen un sensor de posición que constantemente monitorea la posición del rotor del rodamiento en relación con la posición del estator.
3. Controlador de rodamientos magnéticos que es el “cerebro” del sistema y almacena los datos de los sensores de posición y determina cuánta potencia debe entregar a cada rodamiento magnético para mantener el sistema estable y bajo control.

Estos sopladores suelen ser recomendados para aplicaciones que requieren alto volumen de aire, pues se estima que usa del 10% al 40% menos energía comparada con los otros tipos de sopladores y niveles de ruido 30% menores.



Imagen 3-8. Soplador con rodamientos magnéticos.<sup>48</sup>

---

<sup>48</sup> (Kaeser Sopladores, 2022)

### 3.8 Memoria de cálculo del flujo de aire para la remoción de DBO<sub>5</sub> en un proceso de lodos activados

#### 3.8.1 Modelo de la teoría de las dos películas

Para llegar a estos cálculos y describir la transferencia oxígeno-agua se parte del modelo de la teoría de las dos películas aplicado a la transferencia de masa gas-líquido. Se explica estableciendo que el flujo es un término utilizado para la transferencia de masa por tiempo a través de un área específica siendo función de la fuerza impulsora de la difusión. La fuerza impulsora en el aire es la diferencia entre la concentración de volumen y la concentración de interface.

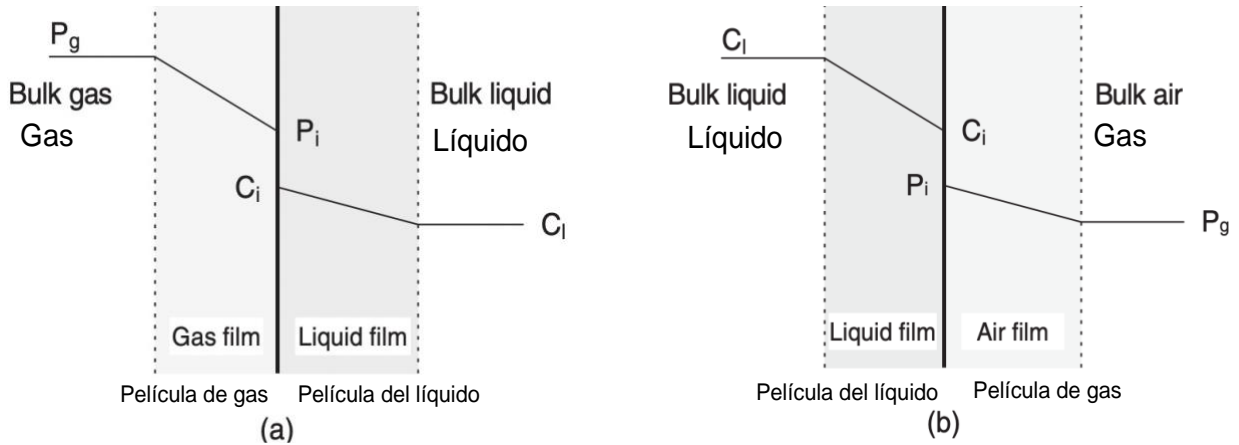


Diagrama 3-21. Teoría de dos películas para a) Absorción de gas y b) Extracción de gas.<sup>49</sup>

El flux del gas a través de la película de gas debe ser el mismo que el flux a través de la película del líquido (Diagrama 3-21). La relación de flujo para cada fase es expresada de la siguiente manera:

$$F = \frac{dW}{dtA} = k_g (P_g - P_i) = k_l (C_i - C_l)$$

Ecuación 3-11

<sup>49</sup> (Dar Lin, 2007)



Donde:

$F$ = Flux.

$W$ = Transferencia de masa.

$A$ = Un área dada de transferencia de gas-líquido.

$t$ = Tiempo.

$k_g$ = Coeficiente de transferencia del gas en una interface local.

$P_g$ = Concentración del gas en el área de estudio o en la fase del aire.

$P_i$ = Concentración del gas en la interface.

$k_l$ = Coeficiente de transferencia de interface para el líquido.

$C_i$ = Concentración local en la interface al equilibrio.

$C$ = Concentración líquido-fase en el líquido.

### 3.8.2 Cálculo del AOR

Muchos factores son importantes en el diseño apropiado de un sistema de aireación, pero lo más importante es conocer los datos de diseño establecidos o los más apegados a las condiciones reales en que opera la planta en caso de que el cálculo sea un remplazo para un proceso existente.

El AOR es la tasa de transferencia de oxígeno real del sistema de difusión a condiciones del sitio y este valor debe ser igual o superior al oxígeno teórico. Para llegar a este valor es necesario contar con la información básica del afluente a tratar, que es:

- Dimensiones del tanque.
- Flujo de diseño y cargas.
- Carga de  $DBO_5$  a la entrada del proceso.
- Concentración de nitrógeno.
- Concentración requerida de oxígeno disuelto (DO).
- Temperatura del agua a tratar.
- Ubicación geográfica de la PTAR.

La fórmula básica para el cálculo de AOR es la siguiente:

$$AOR = x_1 DBO + x_2 NH_3 - N$$

Ecuación 3-12

Donde:

$x_1$ = Oxígeno requerido para la oxidación de  $DBO_5$ .

$x_2$ = Oxígeno requerido para la nitrificación.

$$\left[ \frac{lb O_2}{día} \right] = \underbrace{\left[ \frac{lb O_2}{lb DBO} \right] \times \left[ \frac{lb DBO}{día} \right]}_{\text{Carga}} + \underbrace{\left[ \frac{lb O_2}{lb NH_3} \right] \times \left[ \frac{lb NH_3}{día} \right]}_{\text{Carga}}$$

Como lo indica la ecuación 3-12 el AOR se encuentra multiplicando el  $DBO_5$  por la cantidad requerida de oxígeno por libra de  $DBO_5$  para la demanda carbonácea. Estos factores usualmente son seleccionados por el SRT (Solids Retention Time o en español: tiempo de retención de los sólidos) o tiempo de residencia, que se refiere a la relación entre la masa total de sólidos en el reactor y la masa de sólidos extraídos diariamente del sistema.

El STR es determinado con la siguiente fórmula:

$$STR = \frac{V_{TA}}{Q_{EF}} \quad \text{Ecuación 3-13}$$

Donde:

$V_{TA}$ = Volumen del tanque de aireación.

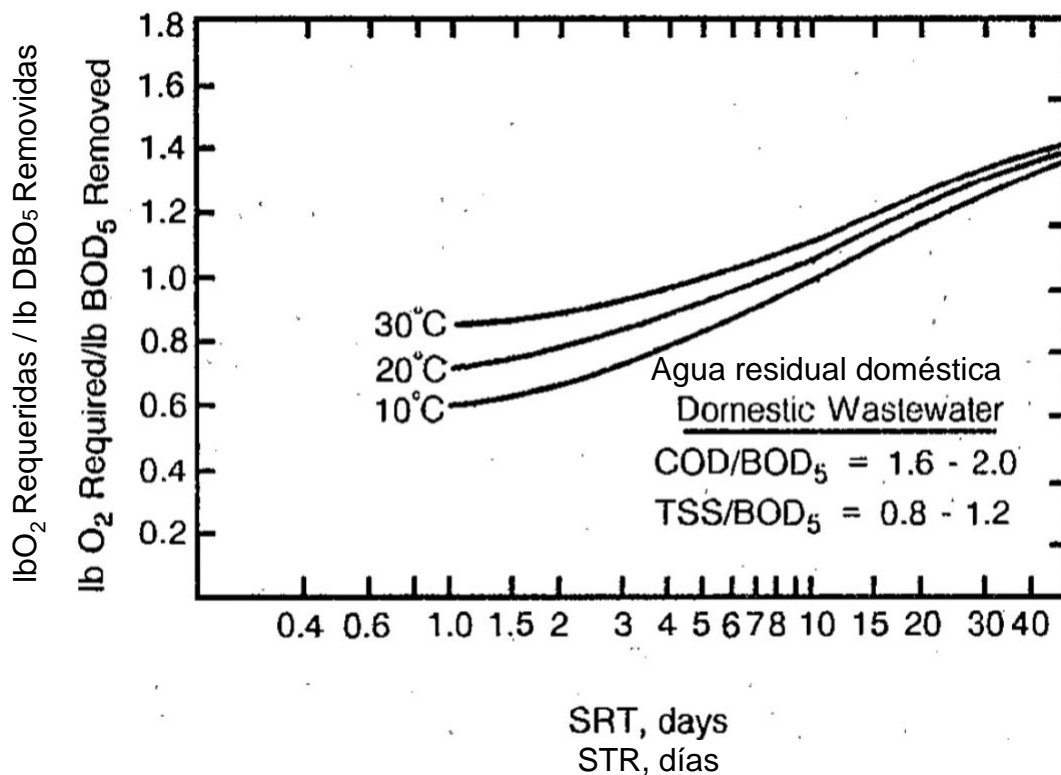
$Q_{EF}$ = Flujo de diseño.

Los requerimientos de oxígeno para la demanda carbonácea generalmente son expresados como la unidad de masa de oxígeno requerido por unidad de masa de  $DBO_5$  removida del sistema. La clasificación de valores típicos la indica la tabla 3-19:

SRT	lb O <sub>2</sub> / lb de DBO <sub>5</sub> para la demanda carbonácea
Menos de 10 días	1.10 lb
Más de 10 días	1.55- 1.80 lb

Tabla 3-19. Ejemplo de consumos de oxígeno por demanda de oxígeno carbonácea.<sup>50</sup>

De acuerdo con el documento *Fine Pore Aeration Design Manual* de la EPA, 1.1 lb O<sub>2</sub>/ lb de DBO<sub>5</sub> removido debe ser aplicado para todos los tanques de aireación con tratamiento de lodos activados, excepto los procesos con aireación extendida para los cuales este valor debe ser considerado como 1.8 lb O<sub>2</sub>/ lb de DBO<sub>5</sub> removido. Para diseños más sofisticados se presenta una curva que varía el valor dependiendo del SRT y temperatura (Gráfica 3-5).



Gráfica 3-5. O<sub>2</sub> Requerido/ DBO<sub>5</sub> removido vs STR.

51

<sup>50</sup> (Stephenson & Blackburn, 1998)

<sup>51</sup> (EPA, 1999)

### 3.8.3 Cálculo de SOR

$$SOR = \frac{AOR}{\alpha \left[ \frac{\beta C_w - C_L}{C_{20}} \right] \theta^{(T-20)}}$$

Ecuación 3-14

52

Donde:

AOR= Actual Oxygen Requirement [lb O<sub>2</sub>/ h].

(Traducido al español: Requerimiento de Oxígeno Actual)

SOR= Standard Oxygen Requirement [lb O<sub>2</sub>/ h].

(Traducido al español: Requerimiento de Oxígeno Estándar)

$\alpha$ = Factor de corrección del oxígeno transferido.

$\beta$ = Factor de corrección de la solubilidad del oxígeno = 0.98.

$C_w$ = Concentración máxima de saturación superficial de oxígeno disuelto en agua limpia a la temperatura del agua residual y altitud del tanque de aireación. [mg/ L]

$C_L$ = Concentración de oxígeno en el tanque de aireación [mg/L] = generalmente 2 mg/L.

$C_{20}$ = Máxima concentración de saturación superficial de oxígeno disuelto en agua limpia a 20°C, y al nivel del mar = 9.17 mg/L.

$\theta$ = Factor de corrección de temperatura para la transferencia de oxígeno = 1.24.

$T$ = Temperatura del agua residual [°C].

#### Cálculo de $\alpha$

En la literatura se encuentran diversos modelos para determinar este factor de corrección. El  $\alpha$  en palabras simples es la diferencia de transferencia de oxígeno que se daría en agua limpia con respecto a la transferencia real que se lleva en el agua residual o agua contaminada, por lo que un valor requerido para determinarlo son los MLSS (por sus siglas en inglés Mixed Liquor Suspended Solids o en español: sólidos en suspensión del licor mezclado). A continuación, se realizará un cálculo con las principales ecuaciones para su estimación y será seleccionada

---

<sup>52</sup> (Stephenson & Blackburn, 1998)

aquella que presente un valor más conservador, tomando en cuenta que los valores van de 0 a 1, siendo 1 el alfa para agua limpia.

$$\alpha = \frac{K_L a_{ww}}{K_L a_{cw}} \quad 53$$

Ecuación 3-15

Donde:

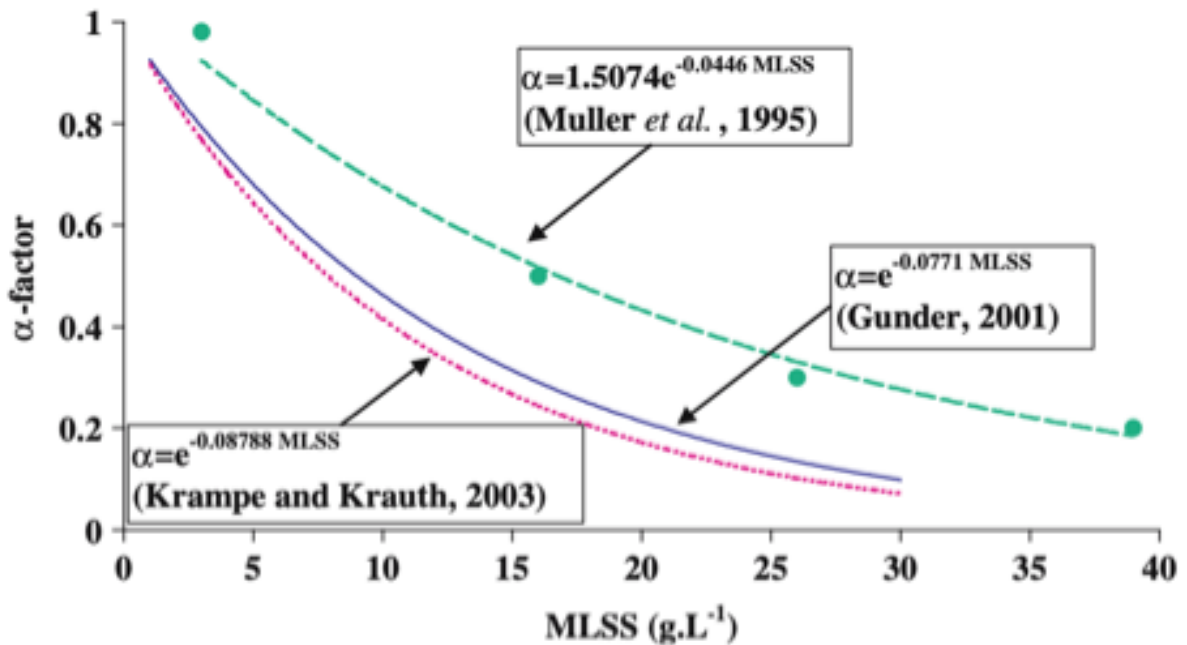
$K_L a_{ww}$  = Valor de  $K_L a$ , el coeficiente global de transferencia de masa, en el agua residuales que se están considerando.

$K_L a_{cw}$  = El valor de  $K_L a$  en agua limpia.

Ejemplo:

Suponiendo un agua residual con concentración de MLSS= 6 g/L, los resultados de los cálculos considerando la Gráfica 3-6 se obtiene lo siguiente:

- Modelo 1: Krampe and Krauth  $\alpha = e^{-0.08788 \times 6} = 0.5902$
- Modelo 2: Gunder  $\alpha = e^{-0.0771 \times 6} = 0.6296$
- Modelo 3: Muller  $\alpha = 1.5074 e^{0.00446 \times 6} = 0.6296$



Gráfica 3-6. Factor alfa vs concentración de MLSS.<sup>54</sup>

<sup>53</sup> (Woodard, 2001)

<sup>54</sup> (Germain & Stephenson, 2005)

Siguiendo los resultados anteriores del cálculo alfa será utilizado el modelo 1 de Krampe and Krauth para el desarrollo de esta investigación.

### 3.8.4 Cálculo de aire requerido a condiciones estándar

$$Q = \frac{SOR}{SOTE \times \rho_{\alpha} \times f_{\alpha} \times 60} (100)$$

Ecuación 3-16

Donde:

$Q$  = Cálculo de aire requerido para proceso biológico a condiciones estándar.

$SOR$  = Standard Oxygen Requirement.

$SOTE$  = Standard Oxygen Transfer Efficiency.

$\rho_{\alpha}$  = Densidad del aire a condiciones estándar = 0.075 lb/ ft<sup>3</sup>.

$f_{\alpha}$  = Fracción de peso del oxígeno en el aire = 0.0231.

60 = Minutos por hora.

100 = Conversión de porcentaje a decimal.

Simplificando la ecuación 3-16:

$$Q = \frac{96.62 \times SOR}{SOTE *}$$

Ecuación 3-17

\*Dato que se obtendrá de las curvas SOTE de la página web del fabricante SSI Aeration. (SSI Aeration, 2022)

### Requerimientos de mezclado

El aire que se difunde a través de una red de difusión en un tratamiento biológico debe ser el suficiente para transferir oxígeno al proceso y además cumplir las siguientes funciones:

---

<sup>55</sup> (Woodard, 2001)

- Mezclar el volumen de agua a tratar en el tanque para obtener niveles de oxígeno homogéneos.
- Dispersar los reactivos.
- Suministrar energía para mantener una mezcla completa.

El criterio de mezclado de un tanque es muy importante y será calculado en las mismas unidades que el flujo de aire requerido para la oxigenación. En la Tabla 3-20 se encuentran los lineamientos para calcular el aire requerido para mezclado:

Arreglo de la red de aireación	Aire requerido para mezclado
Patrón "rollo" o en espiral. Típicamente utilizado en burbuja gruesa. (Ilustración 3-4)	20-30 scfm/ 1000 m <sup>3</sup>
Patrón de parrilla fija. Típicamente utilizado en burbuja fina. (Ilustración 3-5)	10-15 scfm/ 1000 m <sup>3</sup>

Tabla 3-20. Lineamientos de aire requerido para mezclado.<sup>56</sup>

Finalmente resultaran dos valores de aire requerido:

- Aire requerido para proceso biológico. Ecuación 3-17
- Aire requerido para mezclado. Tabla 3-20

Será seleccionado aquel que sea mayor para el diseño de la red de aireación.

<sup>56</sup> (Celenza, 2001)

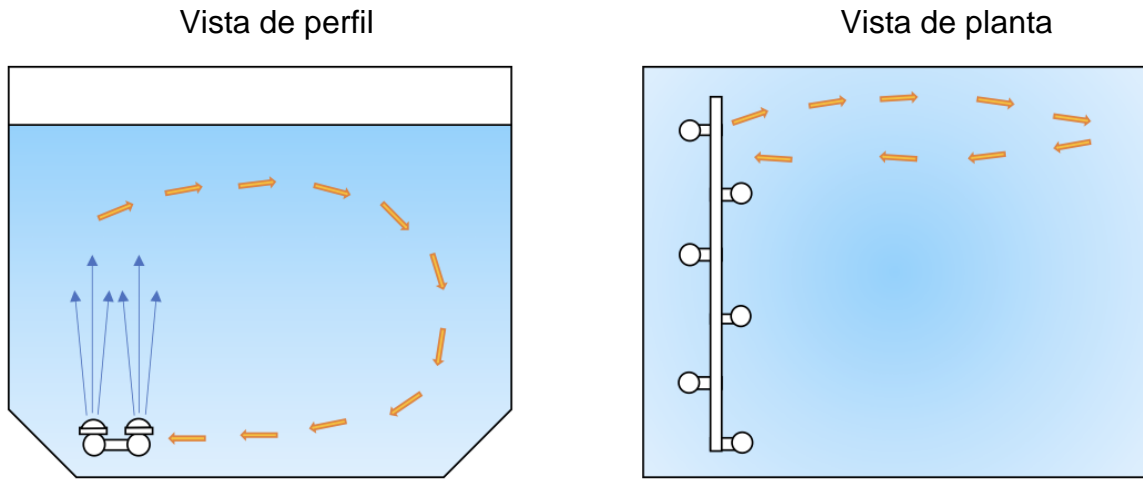


Ilustración 3-4. Arreglo "rollo" o en espiral.

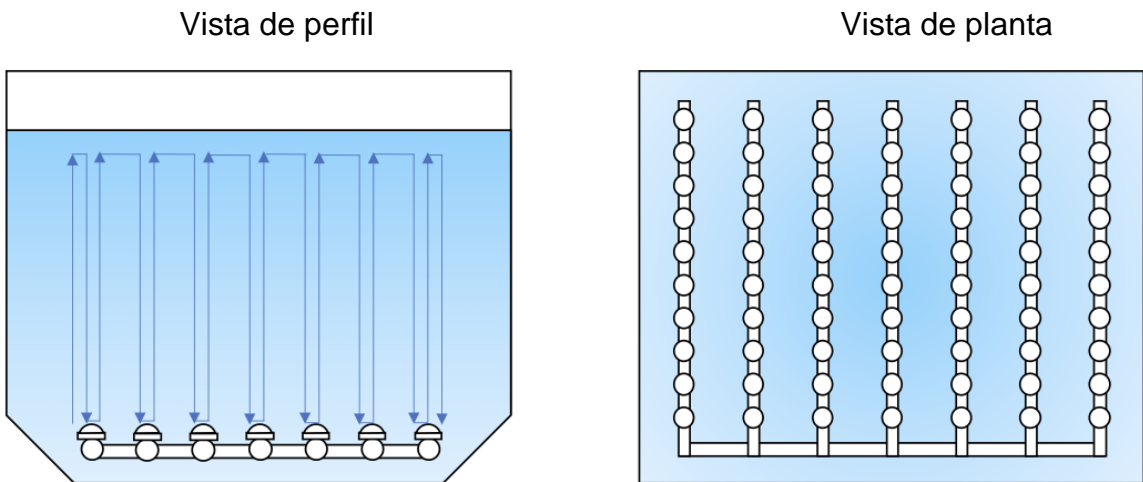


Ilustración 3-5 . Arreglo parrilla fija.



---

### 3.9 Diseño de la red de aireación

#### i. Selección del difusor

En este caso serán seleccionados difusores tipo disco de 9 pulgadas pues, son los más utilizados en las PTAR domésticas y al ser comunes, existen diversos fabricantes que proveen estos difusores, permitiendo acceder a precios más competitivos.

#### ii. Calcular la cantidad de difusores requeridos

$$C_d = \frac{Q_{AR}}{F_D}$$

Ecuación 3-18

Donde:

$C_d$  = Cantidad de difusores requeridos teóricos (cantidad redondeada).

$Q_{AR}$  = Aire requerido para proceso (oxigenación/mezclado).

$F_D$  = Flujo seleccionado de operación de los difusores. Usualmente se recomienda que operen a flujo medio del rango proporcionado por el fabricante. La EPA recomienda para difusores tipo disco de 28 cm (9 in) rangos de operación de 0.2- 1.2 L/s (0.5-2.5 scfm) <sup>57</sup>.

#### iii. Diseño del arreglo de la red de aireación

El área disponible es una consideración importante para definir el arreglo. Para el proceso biológico de agua residual doméstica es utilizado el arreglo tipo parrilla fija (Ilustración 3.5). Se debe procurar hacer una distribución uniforme buscando reducir el uso de tubería en laterales y cabezales con fines de disminución de los costos de la red de aireación.

---

<sup>57</sup> (Fine Pore Aeration Systems Design Manual, 1989)

En la ilustración 3-6<sup>58</sup> se muestra un esquema general de un sistema de aireación de burbuja fina y los nombres de sus diferentes componentes.

La justificación de tener un área total cubierta de difusores es porque generar la energía óptima de mezclado no tiene sentido si los difusores no están ubicados en un patrón de distribución efectivo, evitando así espacios muertos o áreas de sobreactividad en puntos localizados.

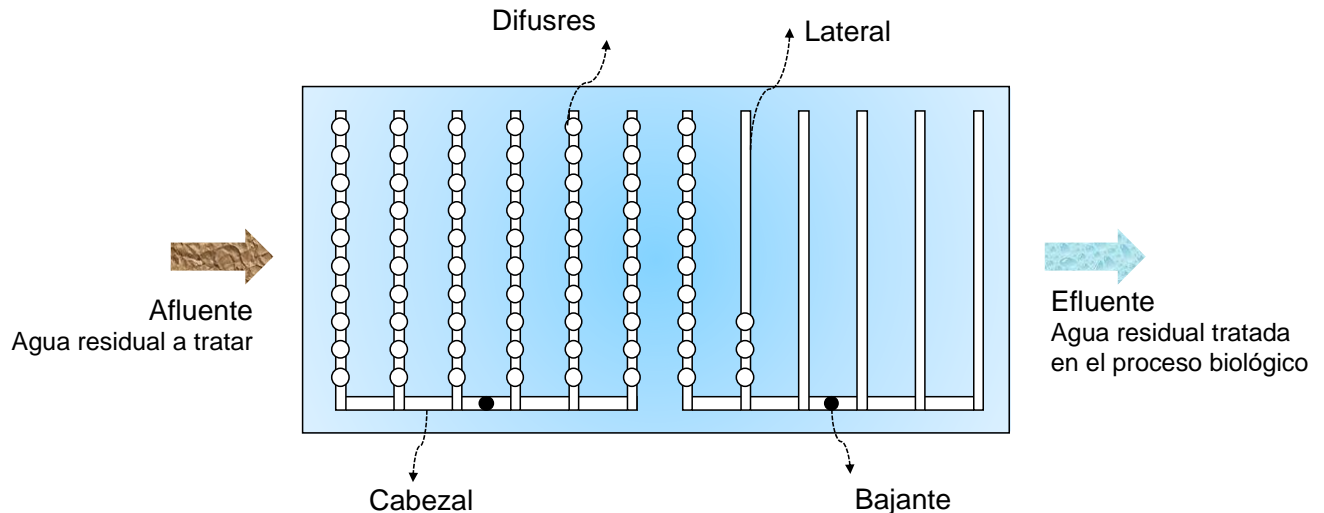


Ilustración 3-6. Esquema de un sistema de aireación de burbuja fina.

Como referencia se citan las siguientes pautas para el diseño óptimo de un arreglo de cobertura del área total con parrilla fija:

- Se sugiere instalar los cabezales de la red a lo largo de un lado del tanque en dirección del flujo del afluente.
- Si el diámetro del cabezal lo permite el diseño se realizará con un solo componente de este tipo pues el aumento de cabezales complica la construcción y mantenimiento.
- Las laterales deben tener un espaciamiento generalmente de 30.0 cm a 91.0 cm (12 in- 36 in).

<sup>58</sup> (Metcalf & Eddy, Inc. , 2003)

- d) El espaciamiento recomendado para los difusores es de 30.6 cm (12 in).
- e) Los difusores usualmente son instalados tan cerca como sea posible del fondo del tanque. Es recomendado un espaciamiento entre el fondo del tanque y el difusor de 23.0 cm (9 in). Esta distancia debe ser considerada en el SOTE, por ejemplo, para un tanque con altura total de 6.0 m con un borde libre de 0.5 m, el SOTE para ese tanque será a la altura de:

$$6.0 \text{ m} - 0.5 \text{ m} - 0.23 \text{ m} = 5.27 \text{ m} \approx \underline{5.3 \text{ m}}$$

- f) Los espaciamientos hacia los muros del tanque deben ser los adecuados para contar con el espacio suficiente para caminar y acceder a la red, requisito necesario tanto para la instalación como para el mantenimiento. Usualmente es recomendado un espacio de 51.0 cm (20 pulgadas).

Nota: a), b), c) y d) (Celenza, 2001), e) (EPA, 1985) y f) (EPA, 1999).

En la página siguiente es encontrado un diagrama que resume de manera gráfica las pautas de espaciamiento enlistadas anteriormente para el diseño de la red de aireación considerando las dimensiones específicas de un reactor biológico (Diagrama 3-22).

Notas:

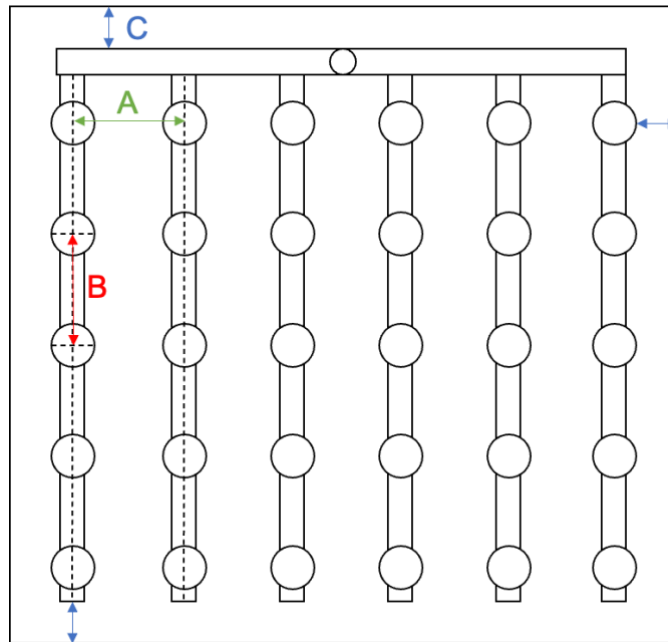
**A= 30 cm – 91 cm (12 in- 36 in)**

**B= 30.6 cm (12 in)**

**C= 51 cm (20 in)**

**D= 23 cm (9 in)**

Vista de planta



Vista lateral

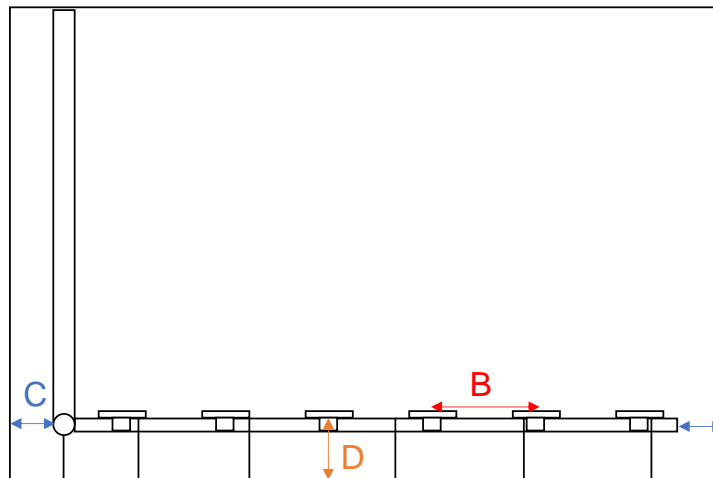


Diagrama 3-22. Pautas de espaciado para el diseño de una red de aireación.

#### iv. Determinación de elementos de la red de aireación

- **Bajantes:** El diseño debe inclinarse a la mínima cantidad de bajantes. Se propondrá siempre una a la mitad de la longitud del cabezal, a menos que el diámetro requerido para la bajante se encuentre fuera de la oferta de los proveedores o el tanque se divida en varias secciones de aireación, por ejemplo, el arreglo de la ilustración 3-6.
- **Cabezales:** Teniendo la recomendación de bajantes:  $C_c = C_b$  Ecuación 3-19  
Donde:  
 $C_c$ = Cantidad de cabezales.  
 $C_b$ = Cantidad de bajantes.
- **Laterales:** La cantidad de este componente del sistema de aireación será determinado considerando las distancias descritas en las pautas de la sección c) *Diseño del arreglo de la red de aireación*. Resultando las siguientes fórmulas:

Laterales mínimas

$$C_{lm} = \frac{L_t - 2C}{0.91 m}$$

Ecuación 3-20

Donde:

$C_{lm}$  = Cantidad de laterales mínima.

$L_t$ = Longitud total del tanque perpendicular al flujo.

Laterales máximas

$$C_{lmx} = \frac{L_t - 2C}{0.30 m}$$

Ecuación 3-21

Donde:

$C_{lmx}$  = Cantidad de laterales máxima.

$L_t$ = Longitud total de tanque perpendicular al flujo.

2C = 2 veces la distancia de espaciamiento de la red hacia el muro del tanque.

2C = 2 veces la distancia de espaciamiento de la red hacia el muro del tanque.

0.91 m = Longitud máxima de espaciamiento entre laterales.

0.30 m = Longitud mínima de espaciamiento entre laterales.

- **Cantidad de difusores en la red**

a) Cálculo de difusores ajustados por lateral.

$$C_a = \frac{C_d}{C_{lm}} \quad \text{Ecuación 3-22}$$

Donde:

$C_a$  = Cantidad de difusores ajustados por lateral (valor redondeado).

$C_d$  = Cantidad de difusores requeridos teóricos.

$C_{lm}$  = Cantidad de laterales mínimas.

b) Verificación de espaciamiento entre difusores

$$E_d = \frac{L_l}{C_a} \quad L_l = L_p - 2C$$

Ecuación 3-24

Ecuación 3-23

Donde:

$E_d$  = Espaciamiento entre difusores.

$L_l$  = Longitud de la lateral.

$C_a$  = Cantidad de difusores ajustados por lateral.

$L_p$  = Longitud del tanque paralela al flujo.

2C = 2 veces la distancia de espaciamiento de la red hacia el muro del tanque

\*Si la distancia de los difusores resulta mayor o igual a 30.6 cm (12 in) continuar al inciso c).

\*Si la distancia es menor a 30.6 cm regresar al inciso a) con la modificación de la fórmula siguiente:

Ecuación 3-25

$$C_a = \frac{C_d}{C_{lm} + 1}$$

Así sucesivamente se deberán aumentar la cantidad de laterales hasta encontrar la distancia óptima entre los difusores.

c) Cantidad de difusores reales

$$C_r = C_a \times C_{ld} \quad \text{Ecuación 3-26}$$

Donde:

$C_r$  = Cantidad de difusores reales (valor redondeado).

$C_a$  = Cantidad de difusores ajustados por lateral (valor redondeado).

$C_{ld}$  = Cantidad de laterales determinadas (cantidad de laterales a las cuales se obtuvo el óptimo espaciamiento entre difusores).

Teniendo la cantidad de discos reales, es necesario hacer el recálculo del aire requerido a condiciones estándar de la sección 3.8.4, pues el SOTE será otro valor que corresponderá a la nueva densidad de difusión.

#### v. Cálculo de flujos por componente y selección de diámetros.

Flujo de la bajante:  $Q_b = \frac{Q_T}{N_b}$  Ecuación 3-27

Donde:

$Q_b$  = Flujo de operación de la bajante.

$Q_T$  = Flujo total en el proceso de aireación.

$N_b$  = Número de bajantes.

$$\text{a) Flujo del cabezal: } Q_c = \frac{Q_b}{2} \quad \text{Ecuación 3-28}$$

Donde:

$Q_c$ = Flujo de operación del cabezal.

2= División del flujo en 2 direcciones.

$$\text{b) Flujo de las laterales: } Q_l = \frac{Q_T}{C_{ld}} \quad \text{Ecuación 3-29}$$

Donde:

$Q_l$ = Flujo de operación de laterales.

$Q_T$ = Flujo total en el proceso de aireación.

$C_{ld}$ = Cantidad de laterales determinadas.

Finalmente en la tabla 3-21 se encuentra la relación para realizar la selección del diámetro dependiendo de aire manejado por las tuberías componentes de la red de aireación.

Diámetro Nominal in (cm)	Máximo flujo sugerido (scfm)
2 (5.08)	20
3 (7.62)	100
4 (10.2)	250
6 (15.2)	500
8 (20.3)	1350

Tabla 3-21. Flujo de aire máximo sugerido por diámetro.<sup>59</sup>

<sup>59</sup> (D.W. , S.E., J.H., D.K., & H.L. , 1991)



## vi. Selección de materiales de la tubería

Las consideraciones en la selección de materiales son la resistencia y posible deterioro a causa de la corrosión, resistencia hacia HCl (ácido clorhídrico, sustancia utilizada para el mantenimiento de la red de difusión), así como los efectos térmicos. Los materiales sugeridos se encuentran en el listado siguiente:

- **Tubería del soplador al tanque de aireación:** El acero al carbono y el hierro dúctil son los materiales que se usan comúnmente para enviar aire desde los sopladores a los tanques de aireación debido a su resistencia y durabilidad.
- **Bajante:** Ya que esta tubería se encontrará sumergida y recibirá el aire a altas temperaturas proveniente directo de los sopladores es recomendado optar por acero inoxidable. A su vez esta tubería funcionará como un intercambiador de calor, disminuyendo la temperatura del aire en su trayectoria.
- **Cabezales y laterales:** Los materiales que tienen mejor resistencia a la corrosión son el acero inoxidable, PVC o CPVC. El más utilizado es el PVC, este material mantiene sus propiedades mecánicas inalteradas máximo a 60 °C. Cuando la temperatura es mayor se prefiere usar el CPVC.

## 4. Marco metodológico

En este capítulo se estudiarán los factores descritos anteriormente que influyen en el SOTE mediante la realización de cálculos que funcionarán como parámetros cuantitativos para comprobar su impacto en un caso propuesto, y así cumplir con los objetivos planteados de la investigación.

El punto de partida para este capítulo será el planteamiento de todos los datos del efluente del tratamiento primario para desarrollar el cálculo y diseño de una red de aireación a la que se nombrará *sistema preliminar*. Para este caso se omitirá la evaluación e incorporación de las mejoras planteadas en la sección 3.7 *Factores que influyen en el SOTE*. Teniendo el diseño de la red del *sistema preliminar* resaltaremos los siguientes datos, mismos que funcionarán para hacer la comparativa de las variaciones realizadas para favorecer el SOTE:

- Flujo de aire requerido.
- SOTE.
- Energía requerida para los sopladores.
- Análisis económico.

Posteriormente se modificarán uno a uno los factores promotores del SOTE del *sistema preliminar* para continuar con la comparativa, generando evidencia del aumento de la eficiencia de la red de aireación. Los factores por evaluar son:

- Tamaño de burbuja de los difusores de aireación.
- Densidad de difusión (difusores/área del tanque).
- Flujo de aire por difusor.
- Columna de agua del tanque.

El sistema con las modificaciones será el *sistema optimizado*, en el cual serán implementadas las mejoras de diseño y finalmente se resaltarán los resultados de los cálculos de diseño para hacer la comparación con el *sistema preliminar*.

## 4.1 Definición de condiciones de diseño del proyecto preliminar

### 4.1.1 Planteamiento del problema

Se requiere el diseño de una red de aireación para un proceso de lodos activados para un reactor biológico con un volumen de 1500 m<sup>3</sup>. El propósito de la implementación de esta PTAR es tratar el agua residual proveniente de un complejo residencial ubicado en una ciudad costera de la República Mexicana a una altura de 10 m sobre el nivel del mar. Se estima que el agua a tratar tenga una temperatura en el invierno de 22 °C y en el verano de 30 °C. Los datos propuestos para el tanque y concentraciones de salida de la etapa de tratamiento primario están listados en la tabla 4-1:

Altura del tanque (m)	4.0
Borde libre (m)	0.5
Largo del tanque (m)	17.5
Ancho del tanque (m)	24.5
Flujo a tratar (m <sup>3</sup> /h)	4500
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	350
MLSS (g/L)	6.7

Tabla 4-1. Datos de diseño.

Las condiciones objetivo del proceso deben satisfacer los datos presentados en las Normas Oficiales Mexicanas aplicables, considerando que el agua tratada en el proceso será reutilizada para el riego de áreas verdes.

#### 4.1.2 Normas Mexicanas Oficiales aplicables al problema

Con la información descrita en el último párrafo del planteamiento podemos definir que la regulación aplicable a este proceso es la “NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación”, específicamente la sección de suelo que considera la reutilización del riego de áreas verdes.

Con la información anterior, el listado de la tabla 4-2 muestra un extracto de las condiciones aplicables que debe cumplir el proceso secundario de la PTAR:

Parámetro	Promedio mensual
Temperatura (°C)	35
DQO (mg/L)	60
Nitrógeno total (mg/L)	25
Fósforo total (mg/L)	10
DBO <sub>5</sub> (mg/L)*	30

Tabla 4-2. Condiciones objetivo del proceso.

Nota\*: El valor de la DBO<sub>5</sub> es obtenido indirectamente ya que este parámetro no es considerado en la última versión de la NOM 001 de la SEMARNAT, la cual fue actualizada en el presente año (2022). La importancia de este parámetro en el presente estudio radica en que el valor de la DBO<sub>5</sub> obtenido por la caracterización del agua a tratar es considerada en el cálculo del diseño de una red de difusión. Esta concentración multiplicada por el caudal a tratar estima la carga de materia orgánica a remover.

Para fines del presente estudio se calcula el valor objetivo de la  $DBO_5$  partiendo de la DQO (parámetro que si es reportado en la actualización de la Norma) y con la información de la sección del Marco Teórico 3.2.1 *Relación entre la DQO y la  $DBO_5$* , que indica que este cociente es  $> 0.5$  para agua desechada del uso doméstico. Con la información anterior se llegó al valor desarrollado a continuación, concentración que se utilizó como objetivo en los diseños posteriores.

Considerando:

$$\frac{DBO_5}{DQO} = 0.5$$

Ecuación 4-1

Despejando  $DBO_5$  de la ecuación 4-1:

$$DBO_5 = \frac{DQO}{0.5} = \frac{60 \frac{mg}{L}}{0.5} = 30 \frac{mg}{L}$$

Ecuación 4-2

Se obtuvo una concentración objetivo de  $DBO_5$  de 30 mg/L. Entendiendo que para una remoción del 100% existiría una  $DBO_{5 \text{ final}} = 0$  mg/L. A continuación, se calcula el porcentaje real de remoción requerido, el cual será aplicado al cálculo de AOR, debido a que es una mejora para no sobredimensionar el equipo y realizar gastos innecesarios de energía.

El cálculo de porcentaje de remoción es:

$$100\% - \left( 30 \frac{mg}{L} \times \left( \frac{100\%}{350 \frac{mg}{L}} \right) \right) = 91.4 \%$$

Ecuación 4-3

El paso siguiente para el diseño de la red preliminar son el cálculo de flujo de aire requerido detallado en la tabla 4-3 y la estimación del costo del equipo, estos últimos resultados los contiene la tabla 4.4.

## 4.2 Cálculo de flujo de aire requerido para el sistema preliminar

Información de diseño del sistema preliminar		
Columna del agua	3.50	m
Sumergencia de los difusores	3.27	m
Largo del tanque	17.50	m
Ancho del tanque	24.50	m
Volumen	1500.63	m <sup>3</sup>
Condiciones del sitio		
Elevación sobre el nivel del mar	10.00	m
Temperatura del afluente (invierno)	22.00	°C
Temperatura del afluente (verano)	30.00	°C
Cálculo de AOR		
Flujo de diseño	4500.00	m <sup>3</sup> /h
Concentración de DBO <sub>5</sub> a la entrada del reactor	350.00	mg/L
Concentración de DBO <sub>5</sub> a la salida del reactor	35.00	mg/L
Carga de DBO <sub>5</sub>	1575.00	kg/día
	3472.28	lb/día
STR	8.00	h
Porcentaje de remoción	91.40	%
Carga de DBO <sub>5</sub> a remover	3125.05	lb/día
AOR	5000.08	lb/día
Cálculo de SOR		
MLSS	6.70	g/L
$\alpha$	0.55	
$\beta$	0.98	
$\theta$	1.02	
SOR	12149.78	lb/día

Cálculo del flujo de aire requerido para oxigenación		
SOTE	10.19	%
Fracción de peso del oxígeno en el aire	0.231	
Flujo de aire requerido para oxigenación	5163	scfm

### 4.3 Diseño de la red de aireación preliminar

Difusor	Disco burbuja gruesa	
Flujo de aire por difusor	9.0	scfm
Difusores ajustados	576	
Cantidad de cabezales	2	
Flujo de aire por bajante	2582	scfm
Flujo de aire por cabezal	1291	scfm
Cantidad de laterales ajustadas	24	
Flujo de aire por lateral	215	scfm
Selección de diámetros de la red de aireación		
Diámetro de la bajante	10	in
Diámetro del cabezal	8	in
Diámetro de las laterales	3	in

Tabla 4-3. Cálculos de diseño del sistema preliminar.

El plano del diseño para el sistema preliminar es encontrado en el Anexo D.

#### 4.4 Determinación de costo del sistema preliminar

Estimación del costo del SP (sistema preliminar)									
Ítem	Material	Diámetro	Cantidad Unitaria	Longitud unitaria (ft)	Material total (tramos)	Costo unitario		Subtotal	
Bajantes	SS SCH10	10	2	11.5	2	\$6,714.00	USD/ 20 ft <sup>60</sup>	\$13,428.00	
Cabezales	PVC SCH 40	8	2	39.4	4	\$493.67	USD/ 20 ft <sup>61</sup>	\$1,974.68	
Laterales	PVC SCH 40	3	24	49.2	60	\$123.60	USD/ 20 ft <sup>62</sup>	\$7,416.00	
Difusores de disco de burbuja gruesa	---	---	576	---	---	\$11.00	USD/difusor <sup>63</sup>	\$6,336.00	
								Subtotal de tubería y difusores	\$29,154.68
								Accesorios	\$9,718.23
								TOTAL (USD)	\$38,872.91
								<b>TOTAL (MXN)<sup>64</sup></b>	<b>\$789,897.46</b>

Tabla 4-4. Estimación del costo del sistema preliminar.

#### NOTAS:

<sup>60</sup> (Metals Depot, 2022)

<sup>61</sup> (PVC Supplies, 2022)

<sup>62</sup> (PVC Supplies, 2022)

<sup>63</sup> (USA Blue Book, 2022)

<sup>64</sup> (BANXICO, 2022)



- <sup>60, 61, 62</sup> y <sup>63</sup> costos en dólares estadounidenses disponibles en catálogos abiertos en internet en abril del 2022.
- Conversión de dólares a pesos mexicanos con el tipo de cambio del 13 de mayo del 2022.
- Tipo de cambio 1 USD = 20.32 MXN.
- Se estima que típicamente tuberías y difusores abarca el 75% del costo total de la red de difusión en proyectos, mientras que los accesorios aportan el 25% restante. Considerando esos porcentajes se determinó el costo estimado total partiendo del costo por los ítems de tubería y difusores.

#### 4.4.1 Costo de energía mensual del sistema preliminar

Siguiendo la siguiente fórmula se obtiene el costo de la energía mensual:

$$WP = \frac{0.0115QP_b}{e} \frac{P_b + P_d^{0.283}}{P_b} - 1 \quad \text{Ecuación 4-4}$$

Donde:

WP = Consumo eléctrico del sistema.

e = Eficiencia constante del soplador.

P<sub>b</sub> = Presión atmosférica del sitio (psia), para simplificar la fórmula  
= columna del agua x 0.443.

P<sub>d</sub> = Presión de descarga del soplador (psia).

0.0115 = Factor de conversión para las unidades kW-sq in min/(ft-lb)-sq ft.

El consumo energético mensual en kWh es calculado multiplicando la ecuación 4-2 por 720 hr/mes para finalmente tener la ecuación 4-3:

$$WP = \frac{8.2668QP_b}{e} \frac{P_b + P_d^{0.283}}{P_b} - 1 \quad \text{Ecuación 4-5}$$

Estimación del costo energético		
Columna de agua	11.5	ft
Presión estimada del sistema	5.6	psig
Flujo de operación	5163	scfm
Presión del sitio	14.7	psia
Consumo mensual de energía del sistema	86308	kWh
Cargo CFE	\$1.2 <sup>66</sup>	\$(MXN)/kWh
Costo mensual de energía del sistema	\$101,671	\$(MXN)

Tabla 4-5. Consumo energético del sistema preliminar.

<sup>65</sup> (EPA, 1999)

<sup>66</sup> (CFE, 2022) Considerando tarifa Industrial- Gran Demanda.

## 4.5 Evaluación de condiciones de mejora del diseño del sistema preliminar

### 4.5.1 Tamaño de burbuja de los difusores de aireación

Para el sistema preliminar fueron seleccionados difusores de burbuja gruesa. En esta sección se hará el remplazo de estos por difusores de disco de 9" de burbuja fina. En la tabla 4-6 se resumen los resultados de diseño con el fin de tener una comparación en cuanto a SOTE y flujo de aire requerido:

Ensayo	1	2
<b>Datos</b>	<b>Sistema preliminar</b>	<b>Remplazo a difusores de burbuja fina de 9"</b>
Columna del agua (m)	3.5	3.5
Largo del tanque (m)	17.5	17.5
Ancho del tanque (m)	24.5	24.5
Difusores	Disco burbuja gruesa	Disco de burbuja fina 9 in
SOTE (%)	10	22
Flujo de aire requerido (scfm)	5163	2393
Difusores ajustados	576	638
Flujo de aire por difusor (scfm)	9.0	3.8
Cantidad de bajantes y cabezales	2	1
Cantidad de laterales ajustadas	24	22
Incremento del SOTE	116%	
Disminución del flujo de aire	-54%	

Tabla 4-6. Resultados burbuja gruesa vs burbuja fina.

Esta variación para mejora del sistema preliminar será denominada *ensayo 2* y es notorio el impacto en el SOTE. De acuerdo con los resultados del cálculo que se

encuentran resumidos en la tabla 4-6 este incrementó un 116%, mientras que el flujo requerido disminuyó poco más de la mitad. (Para detalle del cálculo completo consultar el Anexo A).

#### 4.5.2 Flujo de aire por difusor y densidad de difusión (difusores/área del tanque)

El aire por difusión y densidad de difusión están relacionados directamente, ya que a medida que se disminuya el flujo unitario por difusión serán requeridas más unidades y, por ende, aumentará la densidad. Los resultados de esta variación son resumidos en la tabla 4-7, este escenario es denominado como ensayo 3 y es comparado con el ensayo 2:

Ensayo	2	3
<b>Datos</b>	<b>Reemplazo a difusores de burbuja fina de 9"</b>	<b>Flujo por difusor y densidad de difusión</b>
Columna del agua (m)	3.5	3.5
Largo del tanque (m)	17.5	17.5
Ancho del tanque (m)	24.5	24.5
Difusores	Disco de burbuja fina 9 in	Disco de burbuja fina 9 in
SOTE (%)	22	23
Flujo de aire requerido (scfm)	2393	2250
Difusores ajustados	638	946
Flujo de aire por difusor (scfm)	3.8	2.4
Cantidad de bajantes y cabezales	1	1
Cantidad de laterales ajustadas	22	22
Ensayo	2	3

Datos	Reemplazo a difusores de burbuja fina de 9"	Flujo por difusor y densidad de difusión
Ensayo	2	3
Costo energético mensual estimado (kWh)	43373	38608
Costo mensual de energía del sistema (\$ MXN)	\$51,094	\$45,480
Disminución del flujo de aire	-6%	
Ahorro energético mensual (kWh)	4765	

Tabla 4-7. Resultados ensayo 2 vs 3.

Haciendo la comparación del ensayo 2 y 3 se podría afirmar que la mejora no es significativa, pues el SOTE aumenta una unidad, sin embargo, traduciendo esa mejora a ahorro energético corresponde a -4,765 kWh consumidos mensualmente. (Para detalle del cálculo completo consultar el Anexo B).

### 4.5.3 Columna de agua del tanque

Para este ensayo será modificada la columna de agua del reactor biológico siguiendo las especificaciones de la *sección 4.1.1 Planteamiento del problema*, en donde se indica las dimensiones sugeridas resultantes del volumen necesario del reactor (1500 m<sup>3</sup>). Manteniendo el volumen y considerando que la tubería de acero inoxidable, material de la bajante, es proveída en secciones de 20 ft≈6.0 m, son propuestas las dimensiones indicadas en la columna del ensayo 4 de la siguiente tabla:

Ensayo	3	4
<b>Datos</b>	<b>Flujo por difusor y densidad de difusión</b>	<b>Aumento de columna de agua</b>
Columna del agua (m)	3.5	<u>6.00</u>
Largo del tanque (m)	17.5	<u>13.90</u>
Ancho del tanque (m)	24.5	<u>18.00</u>
Difusores	Disco de burbuja fina 9 in	Disco de burbuja fina 9 in
SOTE (%)	23	37
Flujo de aire requerido (scfm)	2250	1426
Difusores ajustados	946	592
Flujo de aire por difusor (scfm)	2.4	2.4
Cantidad de bajantes y cabezales	1	1
Cantidad de laterales ajustadas	22	16
Densidad de difusión (difusor/ m <sup>2</sup> )	2.21	2.37
Costo energético mensual estimado (kWh)	38608	37034
Costo mensual de energía del sistema (\$ MXN)	\$45,480	\$43,626
Incremento del SOTE	58%	
Disminución del flujo de aire	-37%	

Tabla 4-8. Resultados ensayo 3 vs 4.

Los cálculos nos revelan que se ha maximizado el SOTE en mayor porcentaje, por lo tanto, las condiciones de diseño del ensayo 4 serán definidas como la base de cálculo para el *sistema optimizado*.

## 4.6 Cálculo de flujo de aire requerido del proyecto optimizado

Información de diseño: Sistema optimizado		
Columna del agua	6.00	m
Sumergencia de los difusores	5.77	m
Largo del tanque	13.90	m
Ancho del tanque	18.00	m
Volumen	1501.20	m <sup>3</sup>
Condiciones del sitio		
Elevación sobre el nivel del mar	10.00	m
Temperatura del afluente (invierno)	22.00	°C
Temperatura del afluente (verano)	30.00	°C
Presión	14.70	psia
Cálculo de AOR		
Flujo de diseño	4500.00	m <sup>3</sup> /h
Concentración de DBO <sub>5</sub> a la entrada del reactor	350.00	mg/L
Concentración de DBO <sub>5</sub> a la salida del reactor	35.00	mg/L
Carga de DBO <sub>5</sub>	1575.00	kg/día
	3472.28	lb/día
STR	8.01	h
Porcentaje de remoción	91.40	%
Carga de DBO <sub>5</sub> a remover	3125.05	lb/día
AOR	5000.08	lb/día
Cálculo de SOR		
MLSS	6.70	g/L
$\alpha$	0.55	
$\beta$	0.98	
$\theta$	1.02	

SOR	12149.78	lb/día
Cálculo del flujo de aire requerido para oxigenación		
SOTE	37	%
Fracción de peso del oxígeno en el aire	0.231	
Flujo de aire requerido para oxigenación	1425.56	scfm
<b>4.7 Diseño de la red de aireación del sistema optimizado</b>		
Difusores	Disco de burbuja fina 9 in	
Flujo de aire por difusor	2.4	scfm
Difusores ajustados	592	
Densidad de difusión	2.37	unidad/m <sup>2</sup>
Cantidad de cabezales	1	
Flujo de aire por bajante	1426	scfm
Flujo de aire por cabezal	713	scfm
Cantidad de laterales ajustadas	16	
Flujo de aire por lateral	65	scfm
Selección de diámetros de la red de aireación		
Diámetro de la bajante	8	in
Diámetro del cabezal	8	in
Diámetro de las laterales	3	in

Tabla 4-9. Cálculos de diseño del sistema optimizado.

El plano del diseño para el sistema optimizado es encontrado en el Anexo E.



## 4.8 Determinación de costo del proyecto optimizado

Estimación del costo del SO (Sistema Optimizado)								
Ítem	Material	Diámetro	Cantidad Unitaria	Longitud unitaria (ft)	Material total (tramos)	Costo unitario		Subtotal
Bajantes	SS SCH10	8	1	19.7	1	\$4,824.00	USD/ 20 ft <sup>67</sup>	\$4,824.00
Cabezales	PVC SCH 40	8	1	55.7	3	\$493.67	USD/ 20 ft <sup>68</sup>	\$1,481.01
Laterales	PVC SCH 40	3	16	39.4	32	\$123.60	USD/ 20 ft <sup>69</sup>	\$3,955.20
Difusores de burbuja fina 9"	---	---	592	---	---	\$21.00	USD/difusor <sup>70</sup>	\$12,432.00
							Subtotal de tubería y difusores	\$22,692.21
							Accesorios	\$7,564.07
							TOTAL (USD)	\$30,256.28
							<b>TOTAL (MXN)</b>	<b>\$614,807.61</b>

Tabla 4-10. Estimación del costo del sistema optimizado.

<sup>67</sup> (Metals Depot, 2022)

<sup>68</sup> (PVC Supplies, 2022)

<sup>69</sup> (PVC Supplies, 2022)

<sup>70</sup> (USA Blue Book, 2022)

NOTAS:

- <sup>67, 68, 69</sup> y <sup>70</sup> costos en dólares estadounidenses disponibles en catálogos abiertos en internet en abril del 2022.
- Conversión de dólares a pesos mexicanos con el tipo de cambio del 13 de mayo del 2022.
- Tipo de cambio 1 USD = 20.32 MXN.
- Se estima que típicamente tuberías y difusores abarca el 75% del costo total de la red de difusión en proyectos, mientras que los accesorios aportan el 25% restante. Considerando esos porcentajes se determinó el costo estimado total partiendo del costo por los ítems de tubería y difusores.

#### 4.8.1 Costo de energía mensual del sistema optimizado

Estimación del costo energético:		
Columna de agua	19.7	ft
Presión estimada del sistema	9.4	psig
Flujo de operación	1426	scfm
Presión del sitio	14.7	psia
Consumo mensual de energía del sistema	37034	kWh
Cargo CFE	\$1.2 <sup>71</sup>	\$(MXN)/kWh
Costo mensual de energía del sistema	\$43,626	\$(MXN)

Tabla 4-11. Consumo energético del sistema optimizado.

### 4.9 Análisis de ahorro energético y económico

El desarrollo e implementación de tecnologías para promover la eficiencia energética son un punto clave en la actualidad. Los estudios de la viabilidad energética y económica son una herramienta esencial en la implementación de nuevas alternativas pues las proyecciones de estos estudios indicarán el costo beneficio. En el caso de una PTAR, dichos análisis son la base para la selección de las diversas tecnologías que ofrece el mercado para sus distintas etapas y específicamente, en este proyecto, indican la mejor combinación de valores de diseño que conformarán al sistema más eficiente de aireación para un proceso biológico.

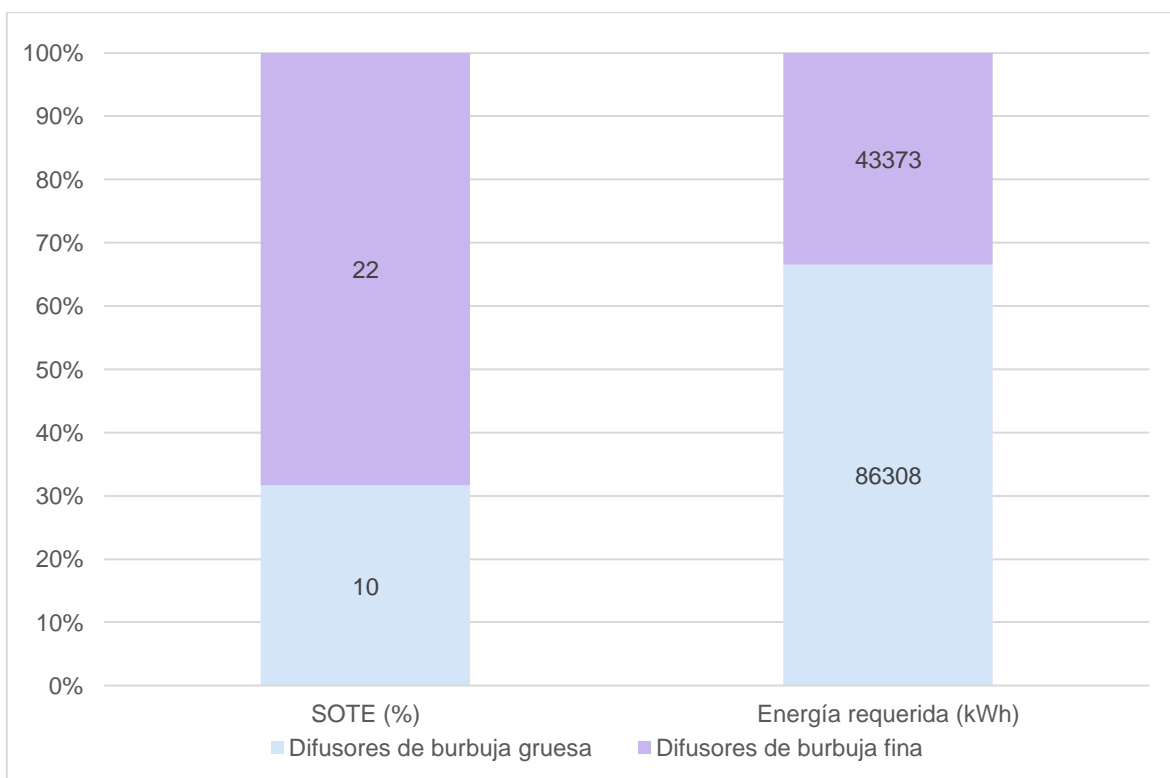
---

<sup>71</sup> (CFE, 2022) Considerando tarifa Industrial- Gran Demanda.

Antedicho, los resultados de los diversos cálculos desarrollados en la sección anterior constituyen una base para determinar si el proyecto planteado como *sistema optimizado* es económicamente viable y cuáles son los ahorros proyectados en comparación al *sistema preliminar*.

#### 4.9.1 Burbuja fina vs burbuja gruesa

En primer lugar, de acuerdo con los cálculos se establece que el mayor aporte de SOTE obtenido fue con la modificación del tipo de burbuja de los difusores que se especifican para el sistema.



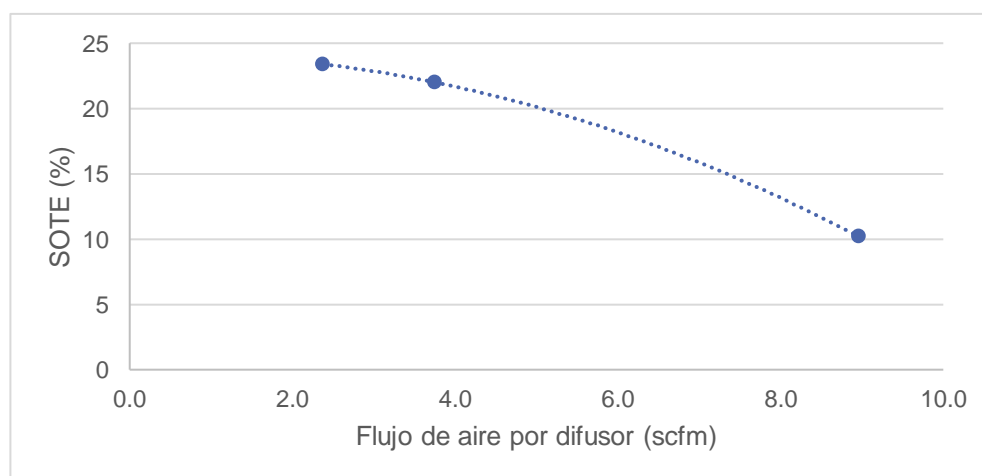
Gráfica 4-1. Eficiencia energética burbuja gruesa vs burbuja fina.

Como muestra la Gráfica 4-1, los principales datos a comparar para tener un veredicto respecto a la eficiencia energética son el SOTE y la energía requerida en los sopladores para manejar el flujo de aire calculado en la oxidación de la materia en el reactor biológico.

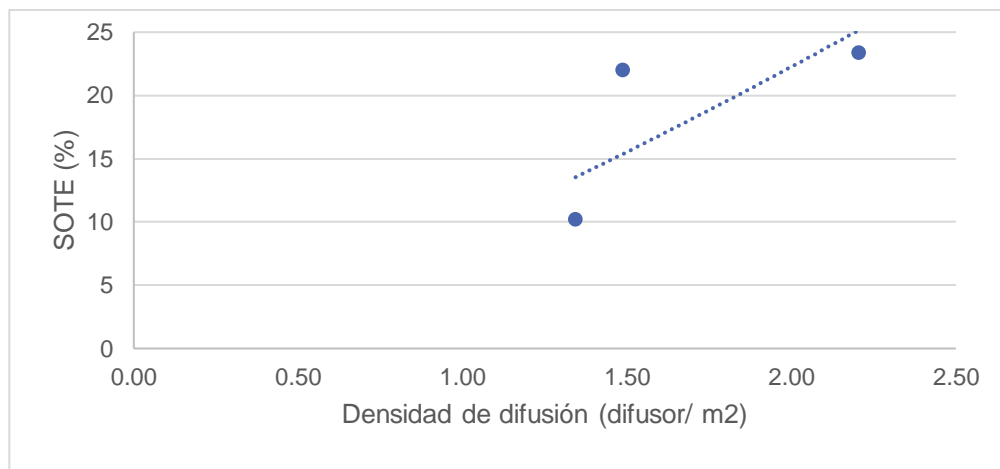
Ilustrativamente es notorio que los resultados favorecen a la red de aireación conformada por difusores de burbuja fina, los cuales están aportando un SOTE del 22% y su consumo energético es de aproximadamente el 50% menos del que sería necesario en un sistema de difusión de aire con difusores de burbuja gruesa. Esto da evidencia de la recomendación teórica del uso de difusores de burbuja fina siempre que se trate de procesos aeróbicos, pues la minimización del tamaño de la burbuja mejora el área superficial disponible para el efecto de transferencia de masa entre el oxígeno y el agua.

#### 4.9.2 Flujo de aire por difusor y densidad de difusión

Con el resultado de la Gráfica 4-2 y 4-3 se tiene certeza de que la disminución del flujo y el incremento de difusores por metro cuadrado del área del tanque disponible para la red de aireación son factores que mejoran la eficiencia del sistema. La relación entre estas variables es directamente proporcional, pues al disminuir el flujo por difusor, mayor serán los difusores requeridos para suplir el flujo de aire de diseño. Las gráficas ilustran los escenarios calculados de los ensayos 1, 2 y 3 en donde el flujo por unidad de difusión fue variado de manera descendente a una misma columna de agua. Al fijar esta variable es posible realizar una comparación en condiciones equivalentes.



Gráfica 4-2. Flujo por difusor vs SOTE.



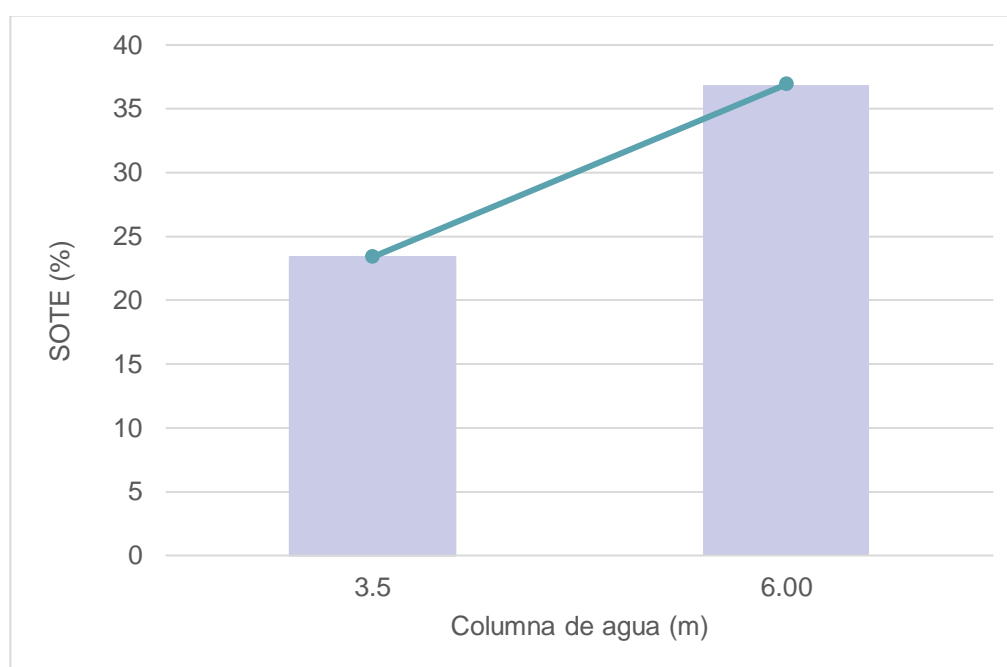
Gráfica 4-3. Densidad de difusión.

Para el diseño final fue seleccionado un flujo por difusor cercano a 2.5 scfm por disco, siguiendo la sugerencia de la EPA (Environmental Protection Agency). Continuando la tendencia de disminución de flujo por difusor de los resultados obtenidos en el proceso metodológico, se puede proyectar que diseñando a un flujo menor al establecido se mejoraría aún más la eficiencia, pues lo establecido por los proveedores es que el rango de flujo para los difusores de burbuja tipo disco de 9 pulgadas oscila entre 0 scfm y 6 scfm. Para variar este flujo de manera descendente se tendría que elaborar un análisis meticuloso, ya que se puede llegar al extremo de aumentar la eficiencia manejando un flujo cercano a 0 scfm por difusor, disminuyendo el flujo de aire requerido para la operación. Ese ahorro no sería compensado por el aumento de difusores requeridos, es decir, aunque los gastos operativos a causa de la energía de los sopladores disminuyan, el capital inicial para la procura del equipo de aireación sería mayor por un aumento considerable de los costos correspondientes al ítem de difusores.

#### 4.9.3 Columna de agua

La última variación realizada al sistema preliminar fue el aumento de la columna de agua en el ensayo 3 y 4. Como se planteó previamente, se buscó mantener el volumen especificado del reactor biológico. La gráfica 4-4 muestra la tendencia que sigue la hipótesis abordada en el marco teórico que a mayor longitud de trayectoria de las burbujas mayor el tiempo de residencia para llevar a cabo la transferencia de

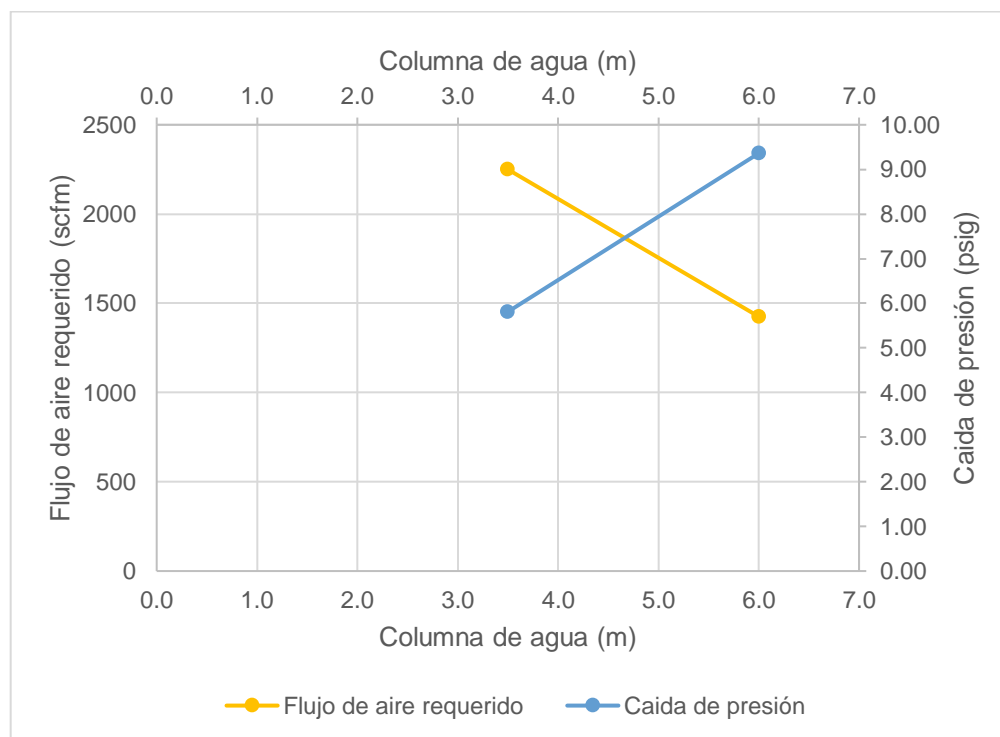
oxígeno al agua, este fenómeno facilita el incremento de la eficiencia del sistema. Tomando como base de este análisis los datos de los ensayos 3 y 4, el SOTE mejora en un 58%, por lo cual se puede afirmar que la modificación de la columna de agua proporciona una diferencia más importante de aumento de la eficiencia respecto al flujo de aire por difusión y densidad de aireación. Estas últimas mejoraron la eficiencia solo el 6%. Como deducción, en una metodología para hacer un diseño eficiente de una red de difusión de aire con difusores tipo disco de 9 pulgadas, se podría considerar como principal modificación a mejorar a la columna de agua, antecediendo a otros factores.



Gráfica 4-4. Columna de agua vs SOTE.

Otra razón para especificar la columna de agua del reactor biológico es desde un análisis de las características en que los proveedores generan el acero inoxidable. Se encontró en la información consultada de los catálogos abiertos en internet que generalmente este insumo es suministrado en tramos de 20 ft, la equivalencia en unidades del sistema internacional corresponde aproximadamente a 6 metros. Desde una perspectiva de mejor aprovechamiento de los insumos, la longitud de columna establecida en el *diseño optimizado* es la idónea.

Retomando lo mencionado en la sección 3.7.5 *Columna de agua del tanque*, es indispensable hallar un equilibrio entre la profundidad del reactor y la caída de presión generada por esta longitud.



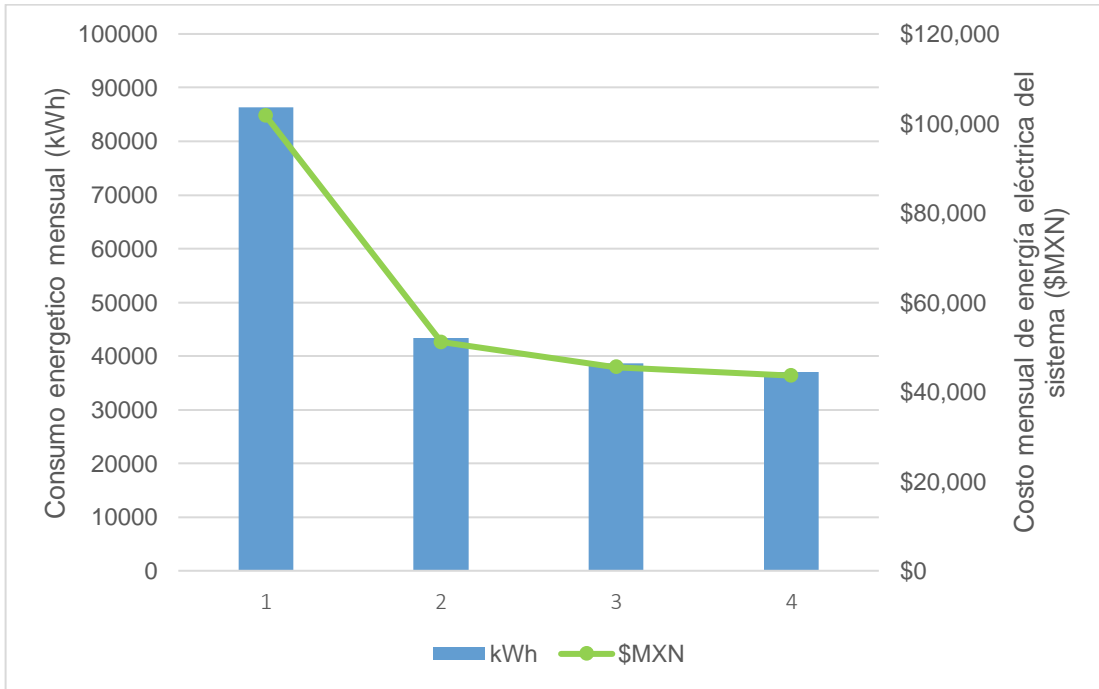
Gráfica 4-5. Análisis de caída de presión y flujo de aire requerido.

Una caída de presión alta puede influir en el consumo energético proporcionado por los sopladores. Continuando con el análisis de los resultados obtenidos en la corrida de los cálculos de los ensayos 3 y 4, se realizará la verificación de esta variable mediante la gráfica 4-5, cuyo fin es disponer en un mismo plano los efectos de la columna de agua contra la caída de presión y el flujo de aire requerido. Respecto a la serie correspondiente a la caída de presión (línea amarilla), sigue la tendencia esperada: la pérdida de carga se incrementa a más longitud de la columna de agua. Con relación al flujo requerido para el sistema, el fenómeno es contrario; aumentar la columna de agua favorece la eficiencia, obteniendo como resultado una disminución en el flujo de aire requerido para operar el reactor biológico. La variación de altura del líquido dentro del reactor de 3.5 m a 6.0 m, genera un aumento de la pérdida de carga, sin embargo, es una desigualdad de apenas 3.55 psig, valor que no genera una diferencia considerable a causa del aumento de los



requerimientos energéticos. En cambio, la diferencia de estas alturas provoca, un decrecimiento del flujo de aire de 824 scfm o expresado en porcentaje, un 37% menos. El ahorro de esta cantidad de flujo compensa totalmente el aumento de la caída de presión.

#### 4.9.4 Energía Consumida



Gráfica 4-6. Consumo energético.

La evaluación de múltiples ensayos en esta investigación buscaba una observación entre las variables cuantitativas que brindaran evidencia en el mejoramiento de una red de difusión de aire, y encontrar un punto óptimo en donde con un mínimo consumo energético cumpla con las necesidades del proceso. En esta sección se indagará en el análisis de resultados del consumo eléctrico mensual de los distintos ensayos.

El aumento de eficiencia proveniente de los ajustes se ve reflejado en una disminución de flujo a manejar por el soplador y consecuentemente, un requerimiento menor de energía eléctrica que conlleva a la transición hacia un

proyecto más sustentable y responsable con el bien común. Ilustrativamente el decrecimiento de electricidad requerida para el sistema se observa en las barras azules de la Gráfica 4-6, la misma tendencia en descenso es característica en cuestiones económicas por la operación del sistema, representada por la línea verde en unidades de pesos mexicanos por el costo estimado mensual de energía eléctrica del sistema.

Como se ha detectado en las secciones previas de este análisis, la diferencia más notable de consumo eléctrico y costo mensual es encontrado en la comparación de los ensayos 1 y 2, indicando que la burbuja fina proporciona un diseño más competitivo. El ahorro expresado en kWh mensuales es de menos del 50% de energía eléctrica demandada para la operación del reactor biológico. Se trata de 50% menos emisiones por su consumo energético y además del mismo porcentaje de ahorro económico exigido por el lado operativo.

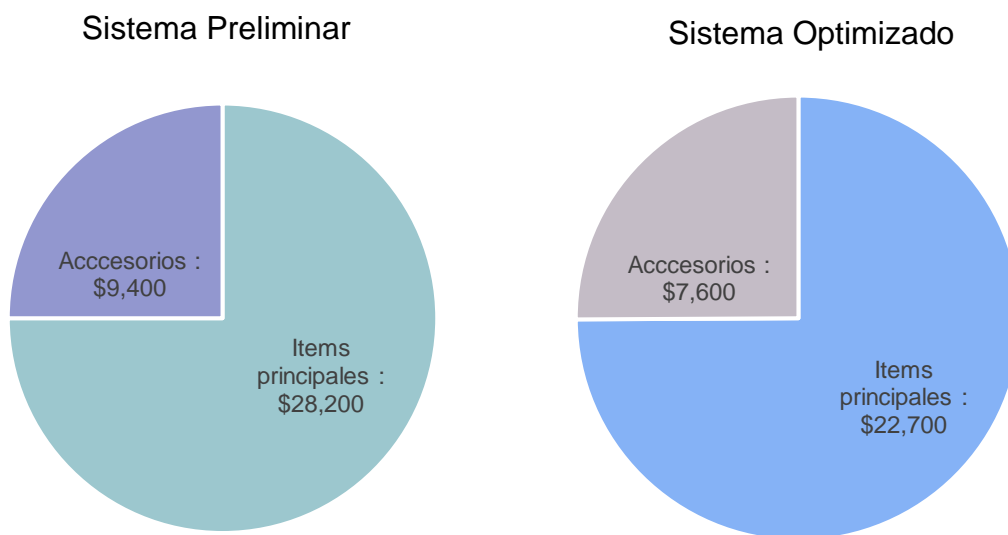
Respecto a la diferencia entre los resultados de los ensayos 2 al 4, estas diferencias se minimizan, resultado esperado, pues la variación de los factores a estudiar fue modificada individualmente para hacer notar la mejora del SOTE representativo de cada ensayo. Sin embargo, es importante resaltar el ahorro energético entre los principales sistemas sujetos a comparación: el *sistema preliminar* y el *sistema optimizado*. El conjunto de todas las mejoras arrojó un consumo energético de -57% para el *sistema optimizado* sobre el *sistema preliminar*, resultado sumamente favorecedor en este análisis.

#### 4.9.5 Costo del equipo

Para el *sistema preliminar* y el *sistema optimizado* fue realizado el diseño completo de la red y el cálculo estimado del costo por los materiales necesarios, valores que fueron obtenidos de los catálogos abiertos de internet para los componentes principales, que son: tubería de acero inoxidable, tubería de PVC y difusores (ítems principales).

Generalmente en el costeo de proyectos estos ítems implican un aporte al costo total del 75%, mientras que para los accesorios se estima que contribuyen al costo total en un 25% (Gráfica 4-7 y 4-8) Entre los accesorios se encuentran:

- Soportes: Fijan las tuberías al fondo del tanque con sus anclajes correspondientes a prueba de agua.
- Bridas: Son utilizadas para fijar las uniones entre los tramos de tubería.
- Conexiones T: Crean las derivaciones de las laterales provenientes del cabezal.
- Tapones: Mantienen hermética la red de difusión.
- Purgas: Permiten la extracción de los condensados dentro del sistema.



Gráfica 4-7 y Gráfica 4-8 Distribución de costo por sistema de difusión.

Siguiendo el procedimiento anterior la inversión resultante para el sistema preliminar sería de \$789,900 MXN. El valor correspondiente al sistema optimizado es de \$614,900 MXN, es decir, se genera un ahorro económico del 22%, causado por la disminución de discos requeridos. Retomando los datos de diseño 5,163 unidades

difusoras son requeridas para manejar el aire de diseño para la oxigenación del sistema preliminar. Mientras que para el sistema optimizado son necesarios 1,426 discos de burbuja fina (Gráfica 4-9). Aunque para el primer diseño se especificaron difusores de burbuja gruesa, los cuales tienen un precio inferior a los de burbuja fina, la cantidad requerida tiene un impacto en la disminución del costo total.



Gráfica 4-8. Costo estimado por sistema de difusión.

NOTA: Costos en pesos mexicanos (MXN).

Los ahorros producidos en el costo del sistema fueron principalmente promovidos por el decrecimiento del flujo de aire requerido para el proceso biológico, además de la cantidad de difusores en la red. Otra diferencia entre ambos sistemas es el diámetro de la tubería bajante de acero inoxidable, la cual resultó en un diámetro menor para el sistema optimizado, de modo que, la tubería necesaria para este sistema de aireación resultó más económica (Tabla 4-12).

Sistema de aireación	Diámetro de tubería (in)		
	Bajante	Cabezal	Laterales
Preliminar	10	8	3
Optimizado	8	8	3

Tabla 4-12. Diámetros de tubería sistema preliminar vs sistema optimizado.

Continuando con el análisis de ahorro económico propiciado por la tubería, debe ser considerada la cantidad reducida de cabezales y laterales para el *sistema optimizado* con respecto al *sistema preliminar*. Tal como muestra la tabla 4-12, fueron reducidos de 2 cabezales a 1 con la optimización del proceso. Respecto a la cantidad de tubería para este mismo ítem, sigue resultando menor para el caso del sistema optimizado, pues la longitud global para el sistema preliminar es de 24.0 m y para el sistema mejorado de 17.0 m.

Con la reducción de flujo requerido y disminución de unidades difusoras demandadas para el proceso, directamente resultan menor la cantidad de laterales para el diseño. La siguiente tabla, resume este componente en cantidades para cada sistema. El primer diseño contaba con 24 laterales de 15.0 m, y para el sistema optimizado fue lograda una reducción a únicamente 16 laterales de 12.0 metros cada una. La diferencia entre la cantidad global de tubería necesaria para cada red de difusión es considerable y para un proyecto que se constituya de múltiples reactores representaría un ahorro económico aún mayor (Tabla 4-13).

Sistema de aireación	Cabezal		Laterales	
	Cantidad	Longitud (m)	Cantidad	Longitud (m)
Preliminar	2	12	24	15
Optimizado	1	17	16	12

Tabla 4-13. Cantidad de cabezales y laterales por sistema.

Otra característica que marcó diferencia entre cantidad de tubería requerida en los sistemas comparados fue el área disponible para el equipo de aireación (Ilustración 4-1), pues el área del reactor fue disminuida en el ensayo 4 (o *sistema optimizado*) para compensar la ampliación de la columna de agua.

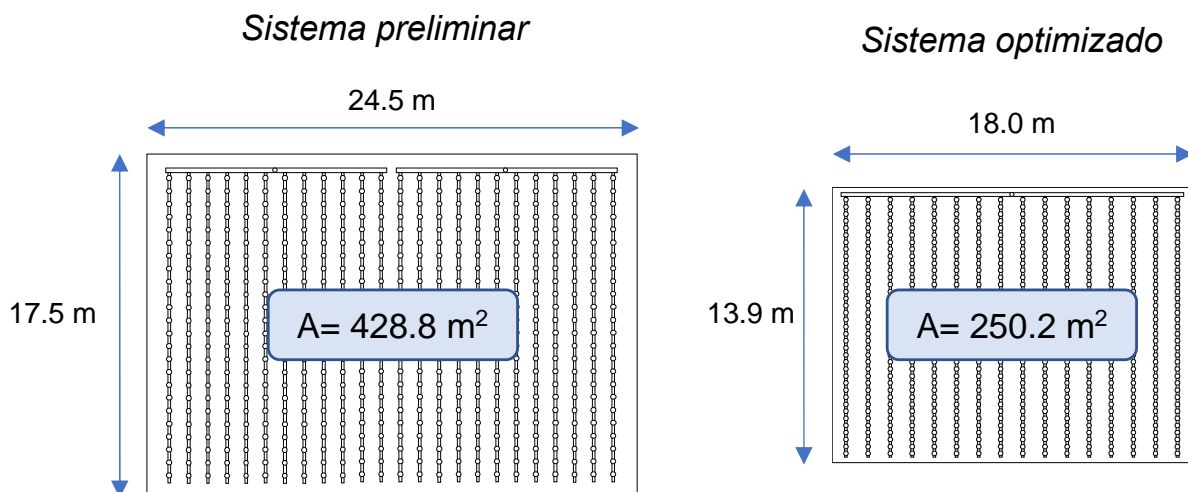


Ilustración 4-1. Área del reactor sistema preliminar vs sistema optimizado.

Recapitulando los datos de consumo energético y económico de los ensayos 1 y 4 o del *sistema preliminar* y el *sistema optimizado* (Tabla 4-14):

Ensayo	Consumo energético mensual estimado (kWh)	Costo mensual de energía del sistema (\$ MXN)
1 (sistema preliminar)	86,308	\$101,671
4 (sistema optimizado)	37,034	\$43,626
Ahorro del sistema optimizado mensual	49,274	\$58,045

Tabla 4-14. Resumen de gastos energéticos por sistema.

Tomando el ahorro económico mensual por cargo de la energía eléctrica y el costo estimado del sistema optimizado (\$614,900 MXN) para obtener el tiempo de recuperación de la inversión:

$$\frac{\$614,900 \text{ MXN}}{\$58,045 \frac{\text{MXN}}{\text{mes}}} = 10.6 \text{ meses} \approx 11 \text{ meses}$$

Finalmente, se obtiene que en 11 meses se recuperaría el costo del sistema de aireación optimizado para un reactor biológico a causa de los ahorros económicos correspondientes al consumo eléctrico estimado mensual para el *sistema preliminar* después de las modificaciones realizadas para incrementar el SOTE y de esta manera optimizar el proceso.

#### 4.9.6 Impacto ambiental

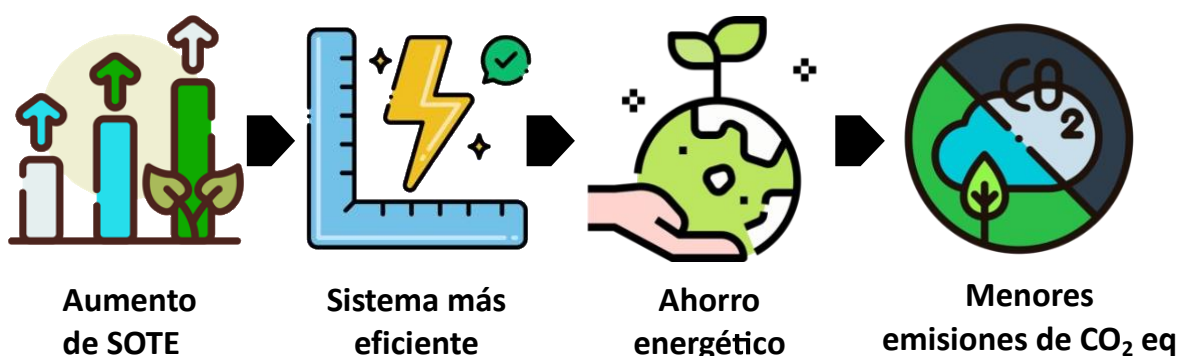


Diagrama 4-1. Relación SOTE y el impacto ambiental.

Como se indagó en la introducción del presente trabajo, al paso del tiempo son más tangibles las consecuencias de la emergencia climática. La comunidad científica ha alertado a las industrias y población mundial que se encuentran en un punto de no retorno para disminuir a gran escala y de forma radical las emisiones de los gases que causan el efecto invernadero y acercan a los no muy lejanos escenarios pesimistas de la vida en la Tierra.

La filosofía y motivo de esta investigación radica principalmente en el lema “*pensar globalmente, actual localmente*”, en donde globalmente lo que se busca, al menos por los ambientalistas, es llegar a un presente más sustentable. Si bien es cierto, que los ahorros económicos logrados por la eficiencia energética son atractivos, implícitamente se está buscando menores emisiones contaminantes. Las iniciativas y esfuerzos desde cada rubro profesional o “localmente” deberían ser más

comunes. En este caso se busca maximizar la eficiencia de una red de difusión para disminuir el impacto ambiental del proceso en un giro de la ingeniería que es vital, pues el saneamiento del agua es requerido indiscutiblemente en el ámbito doméstico, debido a que al día la población desecha litros y litros de agua por segundo para garantizar las actividades más indispensables. En el ámbito industrial es primordial tener el compromiso de descargar las aguas de desecho de transformación de materias primas con las características específicas para no causar un deterioro en los ecosistemas.

Es claro que alrededor del mundo y específicamente en la república mexicana los organismos competentes, gobierno y población se están enfrentando a una escases de agua, y al mismo tiempo existen diversos intereses públicos y privados en cuestión de la administración, gestión y conservación del agua, siendo crucial, reconocer los retos para la legislación hídrica. De acuerdo con la UNESCO *la gestión del agua en el siglo XXI debe basarse más que hasta ahora en principios éticos.*<sup>72</sup>

Retomando el caso del proceso metodológico de esta tesis, es importante encontrar el impacto ambiental, así como los ahorros expresados en valores cuantitativos que sean capaces de evidenciar el cumplimiento de los objetivos planteados.

De acuerdo con el *FACTOR DE EMISIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL 2021, aviso emitido por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales* es 0.423 tCO<sub>2</sub>/MWh<sup>73</sup> la conversión para el cálculo de las emisiones indirectas de gases de efecto invernadero por consumo de electricidad. Este comunicado indica que el factor de cambio considera la generación de las centrales eléctricas que entregan energía a la red eléctrica nacional.

---

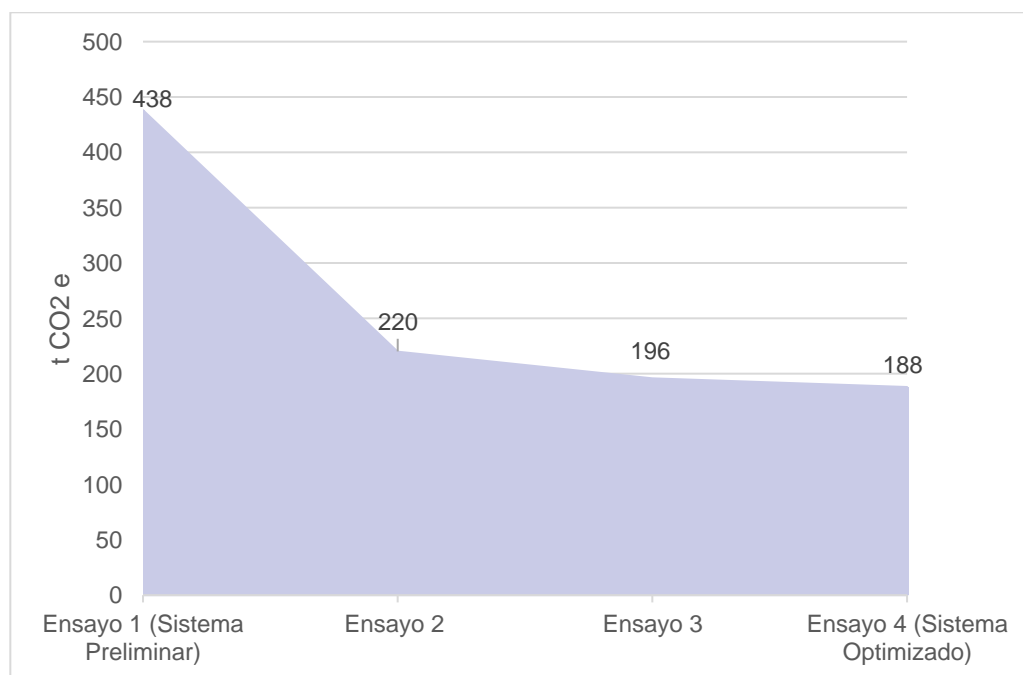
<sup>72</sup> (Cachán, 2009)

<sup>73</sup> (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2022)



Usando el valor anterior se obtuvo la emisión de toneladas de CO<sub>2</sub> e <sup>74</sup> derivadas de la energía demandada para el funcionamiento de cada uno de los ensayos de la red de aireación considerados en el marco metodológico.

De acuerdo con la Gráfica 4-10, inicialmente se observa la tendencia decreciente, resultado que confirma el objetivo principal de este estudio y resultado esperado debido a la búsqueda de aumento de la eficiencia de transferencia de oxígeno en los distintos ensayos.



Gráfica 4-9. Emisión de CO<sub>2</sub> equivalente por cada ensayo.

La energía estimada para el manejo de los flujos de aire calculados para los distintos escenarios está directamente relacionada con las emisiones de CO<sub>2</sub> e, es por eso que se replica el comportamiento de la gráfica mostrado en la evaluación de otros parámetros, y es notable una disminución entre la modificación de difusores de burbuja gruesa y fina (ensayo 1 y 2). La disminución del impacto ambiental es de alrededor del 50%. El impacto de las modificaciones posteriores es menos notable,

<sup>74</sup> La tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub> e) es una medida del efecto térmico en la atmósfera que produce una masa de emisiones de gases de efecto invernadero, como si todas estas sustancias (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, halocarburos) fueran CO<sub>2</sub>, para lo cual se emplea a este gas como referencia en el cálculo del potencial de calentamiento global (GWP por sus siglas en inglés). (IPCC, 2022)

disminuyendo las emisiones en un 11% al mejorar la densidad de difusión y disminuyendo el flujo por difusor (ensayo 3), y únicamente un 4% con el aumento de la columna de agua (Ensayo 4)<sup>75</sup>. Desde un análisis más general, considerando únicamente los casos del *sistema preliminar* y el *sistema optimizado* se observa un ahorro de 250 toneladas de CO<sub>2</sub> e anuales que, en porcentaje, corresponde a un 57% menos. Para dimensionar este valor a datos cotidianos, se estima que un auto mediano produce entre 7 y 9 toneladas de CO<sub>2</sub> e al año.

Como lo estudiamos en esta investigación, cambios en el diseño de un sistema de aireación pueden ser sustanciales en una PTAR en cuanto a su impacto ambiental. Es muy fructífero hacer modificaciones en la aireación o segunda etapa de una PTAR que típicamente representa un 2% del total de la inversión por el proceso completo, pero en gran contraste abarca de un 50% a un 70% de la energía utilizada del total del proceso de tratamiento.

Mencionar ahorros energéticos comprende un gran significado, ya que, el mayor crecimiento en las emisiones mundiales desde 1970 al 2004 se originaron del sector dedicado al suministro de energía, con un aumento del 145%<sup>76</sup>. Acotando el escenario en México, el INEGI concuerda que la fuente más contaminante en el país es el sector energético liberando casi 210 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> e anuales, y de esta cantidad 165.7 tCO<sub>2</sub> e son generadas por producción de electricidad y calor.<sup>77</sup>

Como los anteriores datos, hay muchos presentados por los expertos en la materia que indican la importancia de practicar procesos éticos y así tener una percepción de los cambios que deben ser adoptados de inmediato.

---

<sup>75</sup> Los detalles de los ensayos, así como los resultados obtenidos de todos los cálculos son encontrados en el Anexo C.

<sup>76</sup> (IPCC, 2007)

<sup>77</sup> (Greenpeace, 2020)

## 5. Conclusiones

- **Los factores que influyen en el mejoramiento del SOTE, con la finalidad de obtener un sistema de aireación más eficiente son: el tamaño de burbuja, densidad de difusión, flujo de aire por difusor y la columna de agua.**
  - El tipo de burbuja es la variable que mayor impacto tiene en la eficiencia de un sistema de aireación, propiciando un incremento de SOTE de más del 100% y una disminución de flujo del 54% de aire requerido para la remoción de DBO<sub>5</sub>.
  - Se halló que la mejora al flujo de aire para el reactor biológico es del 6% al modificar la densidad de difusión, y a su vez, el flujo óptimo por unidad difusora fue de 2.5 scfm.
  - Se concluye que a una longitud de 6.0 m hay un equilibrio entre la caída de presión, la energía consumida y el aumento de la eficiencia. La mejora del flujo de aire para el proceso corresponde a un 37%.
  - El incremento de SOTE tiene impacto directamente en la energía requerida por los sopladores para manejar el flujo de aire que demanda el proceso de aireación. Expresado en kWh mensuales es de menos del 50% de consumo en el sistema optimizado comparado con el preliminar.
  - En materia del ahorro energético e impacto ambiental, se determinó que, el conjunto de las mejoras del sistema optimizado aportaría un ahorro en el flujo de aire requerido del proceso de -72% sobre el sistema preliminar, conllevando a una reducción de emisiones de CO<sub>2e</sub> del 57%.
  - El sistema optimizado representa un costo operativo de menos del 57% respecto al sistema preliminar a causa del ahorro de energía por el funcionamiento del sistema de aireación.
  - Respecto a los costos por insumos que constituyen la red de aireación del sistema optimizado, se ahorró un 22% de capital en comparación con el sistema preliminar a causa del requerimiento de menos unidades difusoras,

menor diámetro resultado para la bajante, menos laterales solicitas y menor área del reactor biológico.

- Se obtuvo que en 11 meses se recuperaría el costo del sistema de aireación optimizado para un reactor biológico a causa de los ahorros económicos correspondientes al consumo eléctrico estimado mensual después de las modificaciones realizadas para incrementar el SOTE.

## Anexo A

Información de diseño -Ensayo 2: Discos con burbuja fina		
Columna del agua	3.50	m
Sumergencia de los difusores	3.27	m
Largo del tanque	17.50	m
Ancho del tanque	24.50	m
Volumen	1500.63	m <sup>3</sup>
Condiciones del sitio		
Elevación sobre el nivel del mar	10.00	m
Temperatura del afluente (invierno)	22.00	°C
Temperatura del afluente (verano)	30.00	°C
Cálculo de AOR		
Flujo de diseño	4500.00	m <sup>3</sup> /h
Concentración de DBO <sub>5</sub> a la entrada del reactor	350.00	mg/L
Concentración de DBO <sub>5</sub> a la salida del reactor	35.00	mg/L
Carga de DBO <sub>5</sub>	1575.00	kg/día
	3472.28	lb/día
STR	8.00	h
Porcentaje de remoción	91.4	%
Carga de DBO <sub>5</sub> a remover	3125.05	lb/día
AOR	5000.08	lb/día
Cálculo de SOR		
MLSS	6.70	g/L
$\alpha$	0.55	
$\beta$	0.98	
$\theta$	1.02	
SOR	12149.78	lb/día
Cálculo del flujo de aire requerido para oxigenación		
SOTE	22	%

Fracción de peso del oxígeno en el aire	0.231	
Flujo de aire requerido para oxigenación	2392.74	scfm

### Diseño de la red de aireación

Difusores	Disco de burbuja fina (9 in )	
Flujo de aire por difusor	3.8	scfm
Difusores ajustados	638	
Densidad de difusión	1.49	unidad/m <sup>2</sup>
Cantidad de cabezales	1	
Flujo de aire por bajante	2393	scfm
Flujo de aire por cabezal	1196	scfm
Cantidad de laterales ajustadas	22	
Flujo de aire por lateral	109	scfm
Selección de diámetros de la red de aireación		
Diámetro de la bajante	10	in
Diámetro del cabezal	8	in
Diámetro de las laterales	3	in

## Anexo B

### Información de diseño-Ensayo 3: Flujo por difusor y densidad de difusión

Columna del agua	3.50	m
Sumergencia de los difusores	3.27	m
Largo del tanque	17.50	m
Ancho del tanque	24.50	m
Volumen	1500.63	m <sup>3</sup>

### Condiciones del sitio

Elevación sobre el nivel del mar	10.00	m
Temperatura del afluente (invierno)	22.00	°C
Temperatura del afluente (verano)	30.00	°C

### Cálculo de AOR

Flujo de diseño	4500.00	m <sup>3</sup> /h
Concentración de DBO <sub>5</sub> a la entrada del reactor	350.00	mg/L
Concentración de DBO <sub>5</sub> a la salida del reactor	35.00	mg/L
Carga de DBO <sub>5</sub>	1575.00	kg/día
	3472.28	lb/día
STR	8.00	h
Porcentaje de remoción	91.40	%
Carga de DBO <sub>5</sub> a remover	3125.05	lb/día

AOR	5000.08	lb/día
-----	---------	--------

### Cálculo de SOR

MLSS	6.70	g/L
$\alpha$	0.55	
$\beta$	0.98	
$\theta$	1.02	

SOR	12149.78	lb/día
-----	----------	--------

Cálculo del flujo de aire requerido para oxigenación		
SOTE	23	%
Fracción de peso del oxígeno en el aire	0.231	
Flujo de aire requerido para oxigenación	2250.05	scfm

### Diseño de la red de aireación

Difusores	Disco de burbuja fina (9 in)	
Flujo de aire por difusor	2.4	scfm
Difusores ajustados	946	
Densidad de difusión	2.21	unidad/m <sup>2</sup>
Cantidad de cabezales	1	
Flujo de aire por bajante	2250	scfm
Flujo de aire por cabezal	1125	scfm
Cantidad de laterales ajustadas	22	
Flujo de aire por lateral	102	scfm
Selección de diámetros de la red de aireación		
Diámetro de la bajante	10	in
Diámetro del cabezal	8	in
Diámetro de las laterales	3	in

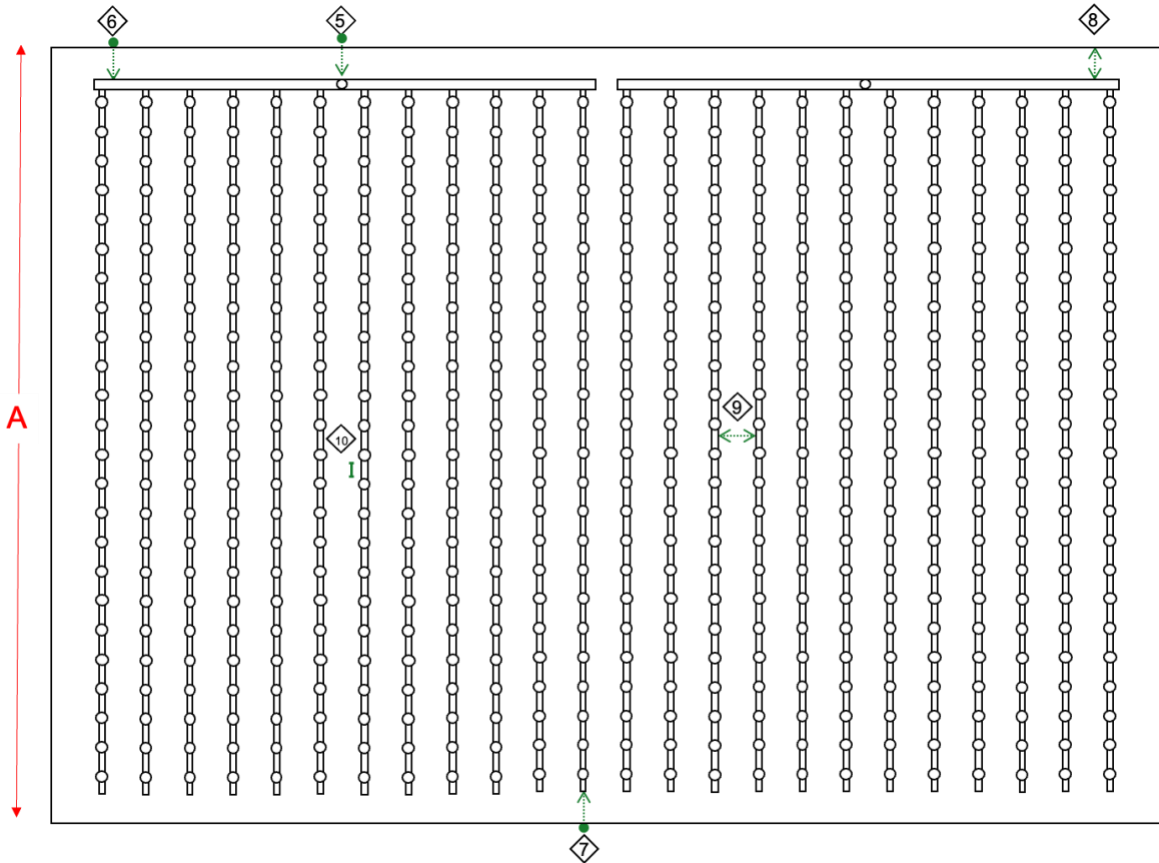


## Anexo C

Ensayo	1	2	3	4
Factor modificado	Sistema preliminar	Reemplazo a difusores de burbuja fina de 9"	Flujo por difusor y densidad de difusión	Aumento de columna de agua (Sistema Optimizado)
Columna del agua (m)	3.5	3.5	3.5	6.00
Largo del tanque (m)	17.5	17.5	17.5	13.90
Ancho del tanque (m)	24.5	24.5	24.5	18.00
Difusores	Disco burbuja gruesa	Disco de burbuja fina 9 in	Disco de burbuja fina 9 in	Disco de burbuja fina 9 in
SOTE (%)	10	22	23	37
Flujo de aire requerido (scfm)	5163	2393	2250	1426
Difusores ajustados	576	638	946	592
Flujo de aire por difusor (scfm)	9.0	3.8	2.4	2.4
Cantidad de bajantes y cabezales	2	1	1	1
Cantidad de laterales ajustadas	24	22	22	16
Densidad de difusión (difusor/ m <sup>2</sup> )	1.34	1.49	2.21	2.37
Consumo energético mensual estimado (kWh)	86308	43373	38608	37034
Costo mensual de energía del sistema (\$ MXN)	\$101,671	\$51,094	\$45,480	\$43,626
Estimado de toneladas de CO <sub>2</sub> equivalentes (t CO <sub>2</sub> e)	438	220	196	188

Tabla 0-1. Resumen de resultados.

# Anexo D



## Título: Layout del sistema de difusión preliminar

Vista de planta

NOTAS:

1	Difusores totales	576	
2	Difusores por lateral	24	
3	Cantidad de cabezales	2	
4	Cantidad de laterales ajustadas	24	
5	Diámetro de las bajantes	10	in
6	Diámetro de los cabezales	8	in
7	Diámetro de las laterales	3	in
8	Espaciamento de la red al muro del tanque	0.51	m
9	Espaciamento entre laterales	1.02	m
10	Espaciamento entre laterales	0.72	m
11	Columna de agua	3.50	m
12	Largo del tanque	17.50	m
13	Ancho del tanque	24.50	m

LO270422-01

Diseño : SGG

Revisión: JMMC

Dibujo: SGG

Escala: Sin especificar

Plano 1 de 2

Anexo D

**Título: Layout del sistema de difusión preliminar**

Vista lateral

NOTAS:

1	Difusores totales	576	
2	Difusores por lateral	24	
3	Cantidad de cabezales	2	
4	Cantidad de laterales ajustadas	24	
5	Diámetro de las bajantes	10	in
6	Diámetro de los cabezales	8	in
7	Diámetro de las laterales	3	in
8	Espaciamiento de la red al muro del tanque	0.51	m
9	Espaciamiento entre laterales	1.02	m
10	Espaciamiento entre laterales	0.72	m
11	Columna de agua	3.50	m
12	Largo del tanque	17.50	m
13	Ancho del tanque	24.50	m

LO270422-01

Diseño : SGG

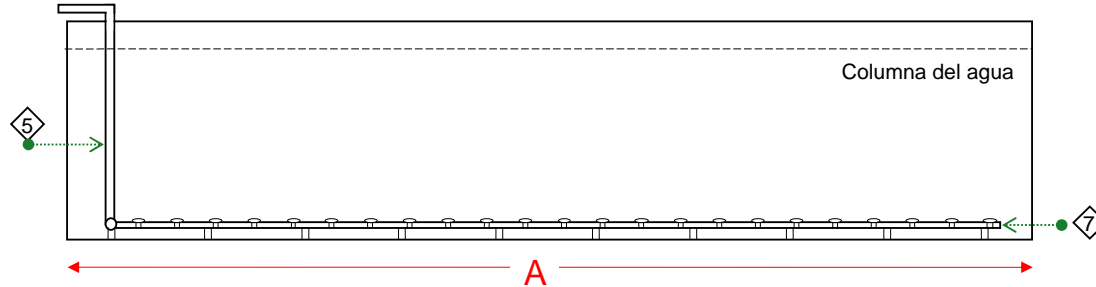
Revisión: JMMC

Dibujo: SGG

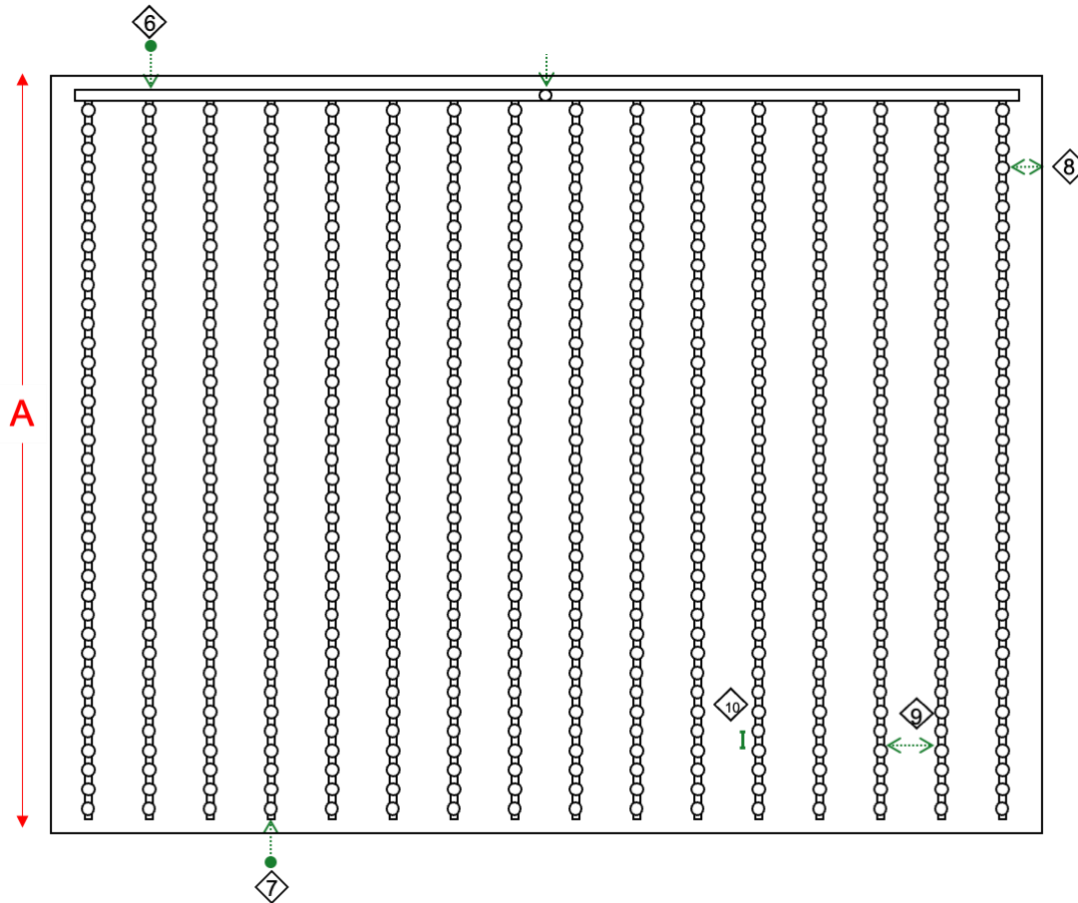
Escala: Sin especificar

Plano 2 de 2

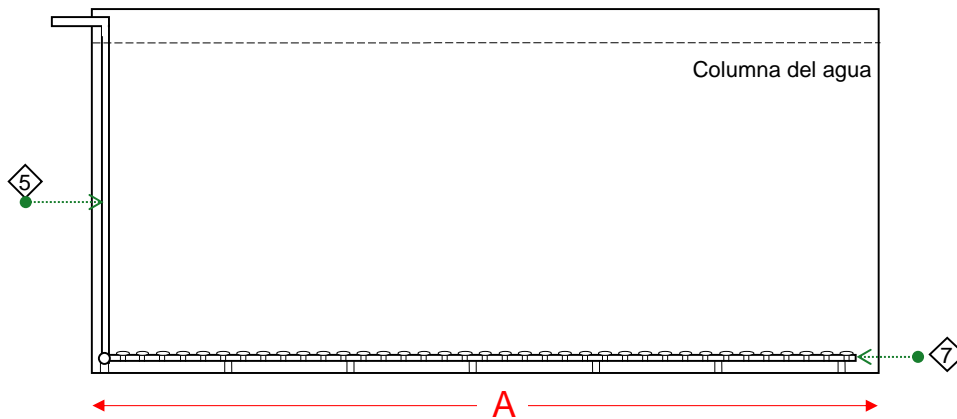
Anexo D



# Anexo E



Titulo: Layout del sistema de difus3n optimizado			
Vista de planta			
NOTAS:			
1	Difusores totales	592	
2	Difusores por lateral	37	
3	Cantidad de cabezales	1	
4	Cantidad de laterales ajustadas	16	
5	Diámetro de la bajante	8	in
6	Diámetro de los cabezales	8	in
7	Diámetro de las laterales	3	in
8	Espaciamiento de la red al muro del tanque	0.51	m
9	Espaciamiento entre laterales	0.74	m
10	Espaciamiento entre difusores	0.36	m
11	Columna de agua	6.00	m
12	Largo del tanque	13.90	m
13	Ancho del tanque	18.00	m
LO270422-02			
Diseño : SGG			
Revisión: JMCC			
Dibujo: SGG			
Escala: Sin especificar			
Plano 1 de 2			
Anexo E			



**Título: Layout del sistema de difusón optimizado**

Vista Lateral

NOTAS:

1	Difusores totales	592	
2	Difusores por lateral	37	
3	Cantidad de cabezales	1	
4	Cantidad de laterales ajustadas	16	
5	Diámetro de la bajante	8	in
6	Diámetro de los cabezales	8	in
7	Diámetro de las laterales	3	in
8	Espaciamiento de la red al muro del tanque	0.51	m
9	Espaciamiento entre laterales	0.74	m
10	Espaciamiento entre difusores	0.36	m
11	Columna de agua	6.00	m
12	Largo del tanque	13.90	m
13	Ancho del tanque	18.00	m

LO270422-02

Diseño : SGG

Revisión: JMMC

Dibujo: SGG

Escala: Sin especificar

Plano 2 de 2

Anexo E

## Referencias bibliográficas

- Cachán, C. (1 de abril de 2009). Principios éticos para la gestión sostenible del agua. *HAZ*.
- Celenza, G. J. (2001). *Biological Processes Industrial Waste Treatment Process Engineering ; V. 2 (Vol. 2)*. Lancaster, Pennsylvania, EUA: Technomic Publishing Company, Inc.
- CFE. (2022). *CFE*. Recuperado el 15 de abril de 2022, de Tarifas: <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCREIndustria/Tarifas/GranDemandaMTO.aspx>
- Comisión Nacional del Agua. (2016). *Normas Oficiales Mexicanas*. Recuperado en febrero de 2022, de: <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/sgaa-15-13.pdf>
- Comisión Nacional del Agua (23 de mayo de 2016). *Gobierno de México*. Obtenido de Comisión Nacional del Agua: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/normas-oficiales-mexicanas-nom-83264>
- COMUNICADO DE PRENSA DEL IPCC. (2021). Recuperado en septiembre de 2021, de IPCC: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC\\_WGI-AR6-Press-Release-Final\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC_WGI-AR6-Press-Release-Final_es.pdf)
- CONAGUA . (2019). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*. Recuperado en agosto de 2021, de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/611037/Inventario\\_2019.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/611037/Inventario_2019.pdf)
- CONAGUA. (2021). Recuperado el 15 de julio de 2022, de Plantas de tratamiento de agua residual (nacional) <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=plantasTratamiento>

- 
- CONAGUA. (2022). *SEMARNAT*. Obtenido de Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. : <http://cmx.org.mx/wp-content/uploads/MAPAS%202015/libros/SGAPDS-1-15-Libro26.pdf>
  - Crane Engineering. (12 de diciembre de 2017). *Crane Engineering*. Recuperado en Abril de 2022, de HOW TO SELECT THE PROPER BLOWER FOR YOUR WASTEWATER TREATMENT: <https://blog.craneengineering.net/how-to-select-the-proper-blower-for-your-wastewater-treatment>
  - Aeration Industries International. (2021). *Aeration Industries International*. Recuperado en junio de 2022, de Aireadores Superficiales: <https://www.aireo2.com/es/productos/aireadores-superficiales/>
  - AGENDA AMBIENTAL 2018 Diagnóstico y propuestas. (2018). *Biblioteca SEMARNAT*. Recuperado en agosto de 2021, de SEMARNAT: <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2018/CD005994.pdf>
  - *Blower Vacuum Best Practices*. (s.f.). Recuperado en Abril de 2022, de Magnetic Bearings: An Attractive Force for Energy-efficiency: <https://www.blowervacuumbestpractices.com/technology/aeration-blowers/magnetic-bearings-attractive-force-energy-efficiency>
  - Ballesteros Hernández, R. (diciembre de 2015). *Tesis IPN*. Recuperado en abril de 2022, de Ahorro de energía en un túnel de viendo utilizando un variador de frecuencia.: [https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/21155/1/tesis\\_RBH.pdf](https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/21155/1/tesis_RBH.pdf)
  - BANXICO. (12 de mayo de 2022). *BANXICO*. Recuperado en mayo de 2022, de SISTEMA DE INFORMACIÓN ECONÓMICA: <https://www.banxico.org.mx/tipcamb/main.do?page=tip&idioma=sp>
  - BASF. (s.f.). Recuperado en junio de 2022, de Plantas de tratamiento de aguas residuales: [https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos\\_y\\_documentos/204158/20170508-catalogo-PLANTAS-de-TRATAMIENTO-de-aguas-RESIDUALES.pdf](https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/204158/20170508-catalogo-PLANTAS-de-TRATAMIENTO-de-aguas-RESIDUALES.pdf)

- 
- Biorotor. (2022). *Biorotor*. Recuperado en junio de 2022, de How BIOROTOR works?: <https://www.biorotor.com/how-biorotor-works/>
  - D.W. , D., S.E., H., J.H., W., D.K., S., & H.L. , J. (agosto de 1991). Situ Soil Venting - Full Scale Test, Hill AFB, Guidance Document. Volume 2. 215.
  - Dar Lin, S. (2007). *Water and Wastewater Calculations Manual*. Mc Graw Hill.
  - Deckwer W. D., S. A. (1998). Improved Tools for bubble column reactor design and scale-up. *Water Science and Technology*, 38(3), 6.
  - Environmental Dynamics International. (2019). *Environmental Dynamics International*. Recuperado en abril de 2022, de Optimization of diffusers systems.: <https://blog.wastewater.com/optimization-of-diffuser-systems>
  - Environmental Dynamics International. (1 de Febrero de 2020). Recuperado en abril de 2022, de EDI Knowledge Center: <https://blog.wastewater.com/case-study-city-of-bowling-green-mo>
  - Environmental Dynamics International. (2022). *FINE BUBBLE AERATION SYSTEMS*. Recuperado en marzo de 2022, de <https://www.wastewater.com/aerationsystems/fine-bubble-system>
  - EPA. (1985). *Summary Report: Fin Pore (Fine Bubble) Aeration Systems*. Ohio, EUA.
  - EPA. (1999 de 1999). <https://www.epa.gov>. Recuperado en marzo de 2022, de Wastewater Technology Fact Sheet: <https://www3.epa.gov/npdes/pubs/fine.pdf>
  - Fine Pore Aeration Systems Design Manual. (1989 de 1989). *Environmental Protection Agency*. Recuperado en marzo de 2022, de National Service Center for Environmental Publications (NSCEP): <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/3000464S.txt?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1986%20Thru%201990&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&UseQField=&IntQFieldOp=0&ExtQField>
  - Freepik Company. (2022). *Flaticon*. Recuperado en 2022, de <https://www.flaticon.es/resultados?word=aumento>



- 
- Germain, E., & Stephenson, T. (Noviembre de 2005). Biomass characteristics, aeration and oxygen transfer in membrane bioreactors: Their interrelations explained by a review of aerobic biological processes. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 11.
  - Greenpeace. (2020). Recuperado en junio de 2022, de Huella de carbono: aprende a calcular tu impacto ambiental: <https://www.greenpeace.org/mexico/blog/9386/huella-de-carbono/>
  - iagua. (16 de septiembre de 2016). *iagua*. Recuperado en abril de 2022, de ¿Cuál es la diferencia entre el uso de difusores de burbuja fina o burbuja gruesa?: <https://www.iagua.es/noticias/espana/barmatec/16/09/16/cual-es-diferencia-uso-difusores-burbuja-fina-o-burbuja-gruesa>
  - IPCC. (2007). Recuperado en junio de 2022, de Informe del Grupo de Trabajo III - Mitigación del Cambio Climático: [https://archive.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg3/es/spmsb.html](https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/es/spmsb.html)
  - IPCC. (2022). *Climate Change 2022*. Recuperado el 5 de octubre de 2022, de Mitigation of Climate Change. Summary for Policymakers.: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI\\_AR5\\_glossary\\_ES.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI_AR5_glossary_ES.pdf)
  - Kaeser Compresores. (2022). *Kaeser Compresores*. Recuperado en abril de 2022, de Turbosopladores con rodamientos magnéticos de 200 y 400 hp: <https://mx.kaeser.com/productos-y-soluciones/sopladores/turbosopladores/>
  - Kaeser Sopladores. (2022). *Kaeser Sopladores*. Recuperado en abril de 2022, de Turbosopladores con rodamientos magnéticos de 200 y 400 hp: <https://mx.kaeser.com/productos-y-soluciones/sopladores/turbosopladores/#>
  - Martin, J., Steve, G., Wallis-Lage, C., & Buchanan, A. (1 de febrero de 2019). Energy saving in activated sludge plants by the use of more efficient fine bubble diffusers. *Water and Environment Journal*, 24, 6.
  - Metcalf & Eddy, Inc. (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*. Mc Graw Hill .

- Metals Depot. (2022). *Metals Depot*. Recuperado en abril de 2022, de Stainless Steel Pipe - 304: <https://www.metalsdepot.com/stainless-steel-products/stainless-steel-pipe>
- Naciones Unidas. (6 de junio de 2022). *Acción por el clima*. Recuperado el 16 de junio de 2022, de Energías renovables: energías para un futuro más seguro: <https://www.un.org/es/climatechange/raising-ambition/renewable-energy>
- NASA. (2017). *NASA*. Obtenido de Scientific Visualization Studio: <https://svs.gsfc.nasa.gov/4546>
- PVC Supplies. (2022). *PVC Supplies*. Recuperado en abril de 2022, de 8" X 20' Plain End Schedule 40 PVC Pipe: <https://pvcpipesupplies.com/8-x-20-schedule-40-pvc-pipe-h0400800pw2000.html>
- QuimiNet. (Diciembre de 2015). *Tesis IPN*. Recuperado en abril de 2022, de Ahorro de energía es un túnel de viento utilizando un variador de frecuencia: [https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/21155/1/tesis\\_RBH.pdf](https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/21155/1/tesis_RBH.pdf)
- Ramis Cirujeda, J. (2019). *Aguas residuales urbanas*. España : Editorial Elearning.
- Real Academia Española. (2022). Recuperado el 15 de junio de 2022, de <https://dle.rae.es/PVC>
- REDA. (s.f.). *REDA*. Obtenido de Ultrafiltración: <http://www.redaspa.com/es/sectores/leche-y-derivados/filtracion/ultrafiltracion/#!prettyPhoto>
- Ríos Cavazos, C. A. (2009). *Diseño de reactores de lodos activados con énfasis en la selección, especificación y análisis de costos del sistema de aereación (soplador difusión de aire) en una planta de tratamiento de aguas residuales municipales de aereación extendida*. Ciudad de Mexico: UNAM-Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2022). *Factor de Emisión del Sistema Eléctrico Nacional 2021*. Ciudad de México: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

- SEGOB. (2022). *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado en 2022, de NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0)
- SSI Aeration. (2019 de Julio de 2019). *SSI Aeration*. Recuperado en abril de 2022, de FINE BUBBLE VS. COARSE BUBBLE DIFFUSERS: <https://www.ssiaeration.com/es/fine-vs-coarse-bubble-diffusers/>
- SSI Aeration. (2019 de 2019). *www.ssiaeration.com*. Recuperado en marzo de 2022, de DIFFUSED AIR VS. MECHANICAL WASTEWATER AERATION SYSTEMS: <https://www.ssiaeration.com/es/diffused-air-vs-mechanical-aeration/>
- SSI Aeration. (6 de abril de 2022). *SSI Aeration*. Obtenido de CURVE GENERATOR: <https://curvegen.ssiaeration.com>
- Stephenson, R., & Blackburn, J. J. (1998). *THE INDUSTRIAL WASTEWATER SYSTEM S Handbook*. Florida, EUA: CRC Press LLC.
- UNEMI. (2018). Recuperado en 2022, de Modelamiento del tratamiento biológico de aguas residuales; estudio en planta piloto de contactores biológicos rotatorios.: <https://www.redalyc.org/journal/5826/582661251008/html/>
- USA Blue Book. (2022). *USA Blue Book*. Recuperado en abril de 2022, de EDI PermaCap 5™ Coarse-Bubble Diffuser, 3/4"NPT(M): <https://www.usabluebook.com/p-265050-permacap-5trade-diffuser-coarse-34quotnptm.aspx>
- Water Environmental Federation. (2017). *www.wef.org*. Recuperado en marzo de 2022, de Liquid Stream Fundamentals: Aeration Design: [https://www.wef.org/globalassets/assets-wef/direct-download-library/public/03---resources/wsec-2017-fs-024-mrrdc-lsf-aeration-design\\_final.pdf](https://www.wef.org/globalassets/assets-wef/direct-download-library/public/03---resources/wsec-2017-fs-024-mrrdc-lsf-aeration-design_final.pdf)

- Woodard, F. (2001). *Industrial Waste Treatment Handbook*. EUA: Butterworth–Heinemann.
- Xylem. (s.f.). Recuperado en abril de 2022, de Sistemas de aireación de Alta Eficiencia por burbujas fina de Siti: <https://docplayer.es/14438856-Sistemas-de-aireacion-de-alta-eficiencia-por-burbujas-fina-de.html>
- Xylem. (2022). *Sanitere*. Recuperado en 2022 de abril , de Difusores con disco de membrana Serie Silver II: <https://www.xylem.com/es-es/products--services/treatment-products--systems/aeration-equipment/fine-bubble-aeration/silver-series-ii-membrane-disc-diffusers/>
- You Tube. (6 de junio de 2022). disc fine bubble membrane diffuser.
- You Tube. (6 de junio de 2022). ine-Bubble Coarse-Bubble Diffuser Comparison.
- You Tube. (6 de junio de 2022). *sanleecorp1*. Obtenido de Coarse Bubble Diffuser: <https://www.youtube.com/watch?v=LH92vk40RV8>
- You Tube. (6 de junio de 2022). *You Tube*. Obtenido de Wastewater: Pretreatment Bar Screens: [https://www.youtube.com/watch?v=swmPuwZI\\_18](https://www.youtube.com/watch?v=swmPuwZI_18)