



Diseño y evaluación de un biorreactor a escala con tecnología MBBR en una empresa alimentaria

Isis, Cerezo¹
Universidad José Antonio Páez
Valencia, Venezuela.

Viky-c, Mujica²
<https://orcid.org/0009-0001-5762-2172>
Universidad José Antonio Páez
Valencia, Venezuela.

Recibido: 26-10-2023
Aceptado: 30-11-2023

Resumen

El tratamiento de las aguas residuales es fundamental para asegurar la calidad del líquido que será devuelto a las comunidades o descargado al medio ambiente. Los tratamientos biológicos tienen el propósito de disminuir la carga orgánica soluble concentrada en el afluente hasta un nivel de confianza mediante la digestión microbiana, este tipo de tratamiento se puede clasificar entre sistemas de biomasa suspendida y sistemas de crecimiento adherido. La tecnología MBBR (siglas en inglés para moving bed biofilm reactor) o biorreactor de lecho móvil, es un método de tratamiento biológico por crecimiento adherido donde son introducidos medios plásticos a un tanque aireado, dichos medios cuentan con un área superficial específica lo suficientemente amplia para el desarrollo de la biomasa. El objetivo de la presente investigación fue comprobar la eficiencia de la tecnología MBBR expuesta a condiciones reales de una planta de tratamiento de aguas residuales con efluentes provenientes de una fábrica de alimentos de producción masiva. La investigación requirió el diseño de un reactor biológico a escala y el seguimiento diario de parámetros críticos de calidad durante 165 días de estudio, obteniendo como resultado que el sistema es capaz de garantizar una eficiencia superior al 70% en remoción de demanda química de oxígeno y una concentración de sólidos suspendidos inferior a 300 mg/L en el agua del reactor.

Palabras clave: MBBR; Prueba a Escala; Análisis Estadístico; Tratamiento Biológico; Diseño.

¹Ingeniero Industrial de la Universidad José Antonio Páez
Correo electrónico: cerezoisis@gmail.com

². Doctora en Ingeniería. Maestría en Ingeniería Ambiental. Mención Tratamiento de aguas
Correo electrónico: vcujica@gmail.com

Design and evaluation of a scale bioreactor with MBBR technology in a food company

Abstract

Wastewater treatment is essential to ensure the quality of the liquid that will be returned to communities or discharged into the environment. Biological treatments have the purpose of reducing the soluble organic load concentrated in the influent to a confident level through microbiological digestion, this type of treatment can be classified between suspended biomass systems and attached growth systems. MBBR (moving bed biofilm reactor) technology is an adhered growth biological wastewater treatment method where plastic media are introduced into an aeration tank, these media have a specific surface area large enough for the development of biomass. The objective of this research was verifying the efficiency of MBBR technology exposed to real conditions of a wastewater treatment plant with effluents from a mass production food factory. The research required the design of a scale biological reactor and the daily monitoring of critical quality parameters during 165 days of study, as a result, it was proved that the system can guarantee an efficiency greater than 70% in the removal of chemical oxygen demand and a concentration of suspended solids lower than 300 mg/L inside the bioreactor.

Keywords: MBBR, scale test, statistical analysis, biological treatment, design

Introducción

Las aguas residuales consisten en el líquido generado por las comunidades después de ser empleado en distintas actividades, en su composición cuenta con microorganismos patógenos, compuestos tóxicos y materia orgánica, además de una concentración importante de nutrientes que provoca la disminución del oxígeno en cuerpos de agua al promover el crecimiento de plantas acuáticas (Metcalf y Eddy, 1995). Los tratamientos biológicos se encargan de degradar la carga orgánica soluble en el líquido a través de la acción de varios microorganismos capaces de consumir compuestos orgánicos y transformarlos en biomasa que, posteriormente, debe ser separada de la solución. Es posible clasificar los procesos biológicos según ciertas características, como dependiendo si se da en presencia o en ausencia de oxígeno, o dependiendo si se trata de sistemas de cultivo en suspensión o sistemas de cultivo fijo.

El tratamiento por lodos activados es uno de los principales procesos biológicos de cultivo en suspensión para la degradación de la carga orgánica (Metcalf y Eddy, 1995), en este tipo de tratamiento es introducido el agua residual a un reactor biológico y el producto de la digestión bacteriana se mantiene mezclado gracias a la aireación inyectada. La concentración de sólidos suspendidos en el reactor biológico estará definida por la cantidad de carga químicamente degradable introducida, medida en unidades de mgDQO/L y el caudal preestablecido (Metcalf y Eddy, 1995), entonces, al aumentar estas características, aumentará la producción de lodos, por lo que para

estos sistemas siempre existirá una limitación de la capacidad según el volumen operacional del reactor y la carga orgánica de diseño.

El tratamiento biológico en un biorreactor por lecho móvil (MBBR) es un proceso de crecimiento adherido, donde los microorganismos que realizan el tratamiento se desarrollan en medios sólidos plásticos, estos son diseñados con una alta área superficial por unidad de volumen y se encuentran mezclados gracias a la acción de difusores (Bengtson, 2017). Entre sus atributos, al compararlo con un tratamiento por lodos activados, el sistema MBBR permite el aumento de la capacidad volumétrica sin requerir modificaciones infraestructurales mayores, debido a que, en lugar de definir la capacidad según la cantidad de microorganismos suspendidos en forma de biomasa, esta será definida por la cantidad de medios de soportes presentes en el reactor (Mcquarrie y Roltz, 2011).

Cuadro 1. Ventajas y desventajas de la tecnología MBBR.

TRATAMIENTO BIOLÓGICO POR REACTOR DE LECHO MÓVIL (MBBR)	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ol style="list-style-type: none"> Debido a que la biomasa está adherida al soporte y está parcialmente protegida del medio gracias a la biopelícula, el reactor MBBR es capaz de soportar variaciones temporales de pH, temperatura o eventos tóxicos. La parte interna de la biopelícula es una reserva de biomasa, la cual puede ser utilizada cuando las capas externas de biomasa se encuentren sobrecargadas, por lo que, soporta variaciones de carga orgánica. La presencia de sólidos suspendidos en el reactor será mínima, mayormente originada por el cizallamiento entre los medios de soporte o por aquellos que ya estaban presentes en el afluente 	<ol style="list-style-type: none"> Obstrucción de medios de soporte debido a entrada de sólidos de gran tamaño, requiriendo energía para lograr el choque entre los medios plásticos y promover el desprendimiento de la biomasa en exceso. Obstrucción de rejillas retenedoras de medios de soporte, debido a ineficiencia en separación de sólidos durante tratamientos previos, lo que podría resultar en desbordamiento del reactor y fuga de medios de soporte.

Fuente: Mcquarrie – Roltz (2011)

El diseño de un proceso MBBR debe estar basado en conocimiento sobre la tecnología, la eficiencia del tratamiento realizado en etapas previas al sistema biológico y las características del agua residual recibida. La presente investigación pretende evaluar el desempeño de la tecnología MBBR ante condiciones reales de efluente industrial proveniente de una empresa productora de alimentos, caracterizadas por la presencia de grasas y aceites, después del tratamiento primario aplicado, mediante el diseño, construcción y seguimiento de un biorreactor piloto a escala en presencia de oxígeno.

Sanabria y Pacheco (2019) en su investigación experimental titulada “Diseño y evaluación de un reactor biológico de lecho móvil de cargas secuenciales como

alternativa de tratamiento para un vertimiento procedente de una industria farmacéutica”, establecieron una unidad piloto para analizar los parámetros fisicoquímicos relacionados con la degradación de materia orgánica y el crecimiento de la biomasa en los soportes. Concluyeron que, si bien el reactor alcanzó eficiencias de hasta un 92%, los resultados se atribuían a la biomasa es suspensión, debido a que no observaron crecimiento de biomasa en los medios de soporte durante los tres (3) meses de experimentación.

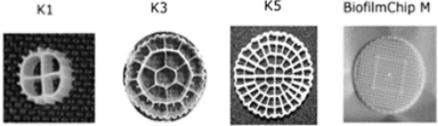
El autor Balarezo (2018) en su trabajo titulado “Evaluación del sistema biológico MBBR en la ampliación de capacidad de tratamiento en PTARI existente para aguas residuales de la industria de alimentos”, encontró que la tecnología entrega resultados positivos en disminución de parámetros como carga orgánica y sólidos suspendidos en efluentes provenientes de una planta fabricante de golosinas. Dicho estudio representa información de gran aporte para la presente investigación, al demostrar que la tecnología puede ser aplicada para tratar aguas residuales provenientes de la industria de alimentos e incluso maximizar la capacidad y eficiencia de sistemas de tratamiento existentes, en consideración de la exigencia que involucra el cumplimiento de las normativas para el cuidado ambiental.

Metodología de la Investigación

La presente investigación es de tipo proyecto factible, debido a que pretendió determinar si la tecnología MBBR es una propuesta viable para ser aplicada en una planta de tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria de alimentos. El diseño de la investigación es experimental de campo, ya que fueron recolectados los datos a partir de someter a elementos a ciertas condiciones para observar los efectos que se producen, igualmente, tiene un diseño documental, al requerir la revisión de antecedentes y escritos publicados por expertos en la tecnología. El nivel de la investigación es explicativo, puesto que fueron conocidas cuáles circunstancias exteriores provocan el comportamiento de un fenómeno. Entre las técnicas de investigación utilizadas se tienen, observación directa, revisión bibliográfica y métodos analíticos de laboratorio.

Durante la investigación fueron simuladas las situaciones cotidianas del afluente de la empresa caso estudio mediante la construcción de un reactor biológico a escala, haciendo así que, la población consistiera en el agua del reactor biológico y la muestra de la investigación fuese el agua del reactor biológico a escala. Atendiendo a lo anterior, el diseño del reactor piloto con tecnología MBBR se basó en bibliografía desarrollada por expertos para definir los requerimientos técnicos que garantizan la correcta operación del sistema, en el siguiente cuadro se describen cada uno de estos.

Cuadro 2. Requerimientos técnicos para la instalación de reactor con tecnología MBBR.

REQUERIMIENTOS TÉCNICOS	DESCRIPCIÓN	IMÁGENES REFERENCIALES																	
1. Rejillas en descargas del reactor	Son utilizadas mallas o rejillas para retener a los biosoportos dentro del reactor. Estos filtros suelen ser horizontales con forma cilíndrica en tanques aeróbicos y son sumergidos desde un 35% a un 65% de la altura del reactor, esta condición permite aprovechar la aireación proporcionada para evitar la obstrucción. Las ranuras del filtro deben tener un tamaño menor al 70% de las dimensiones del biosoporte.																		
2. Difusores de burbuja gruesa	El sistema de aireación está encargado de distribuir los biosoportos plásticos, conseguir las concentraciones de oxígeno requeridas para el proceso y controlar el grosor de la biopelícula formada. Los reactores MBBR se inclinan hacia la utilización de burbuja gruesa debido a que se debe introducir la suficiente energía para mantener los biosoportos en suspensión, las burbujas producidas se separan en piezas más pequeñas al estar en contacto con los medios, mejorando la transferencia de oxígeno.	 <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Convenciones para sistemas de aireación por burbuja gruesa</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Relación AOTE/SOTE</td> <td>0,5</td> </tr> <tr> <td>SOTE por profundidad, %/m</td> <td>2,46%/m</td> </tr> <tr> <td>Oxígeno requerido para degradar carga orgánica, g O₂ / g DBO</td> <td>680,389</td> </tr> </tbody> </table>	Convenciones para sistemas de aireación por burbuja gruesa		Relación AOTE/SOTE	0,5	SOTE por profundidad, %/m	2,46%/m	Oxígeno requerido para degradar carga orgánica, g O ₂ / g DBO	680,389									
Convenciones para sistemas de aireación por burbuja gruesa																			
Relación AOTE/SOTE	0,5																		
SOTE por profundidad, %/m	2,46%/m																		
Oxígeno requerido para degradar carga orgánica, g O ₂ / g DBO	680,389																		
3. Modelo de biosoporte seleccionado basado en las necesidades	Existe una gran variedad de medios plásticos en el mercado, los modelos K1 son los más populares, los modelos K3 y K5 son preferidos en plantas que comienzan a operar con tecnología MBBR, el modelo K5 tiene un aumento en su área superficial específica, lo que permite que crezca la misma biomasa con una menor inversión inicial. Por su parte, Biofilm Chip M está diseñado para plantas con microorganismos de lento crecimiento, como es el caso de sistemas sin presencia de oxígeno. No obstante, debido a su forma tan aplanada, las habilidades de mezcla y de transferencia de oxígeno a través de la estructura es pobre. Para todos los modelos, la porción de relleno en el reactor es flexible y puede ser de hasta un valor del 67%, de esta manera, se provee una amplia superficie protegida para el crecimiento bacteriano.	 <ul style="list-style-type: none"> • 500 m²/m³ bulk • 500 m²/m³ bulk • 800 m²/m³ bulk • 1200 m²/m³ bulk • 9,1 mm diameter • 25 mm diameter • 25 mm diameter • 48 mm diameter • 7,2 mm length • 10,0 mm length • 3,5 mm length • 2,2 mm length 																	
4. Carga diaria por área superficial disponible (SALR)	A partir de este valor, medido en gDQO/m ² d, se definen las características de la biopelícula formada: Si es mayor a 30, la biopelícula que se genera es compacta, existen bacterias cómodamente, depredador ausente. Si se encuentra entre 10-15, la biopelícula es esponjosa, existen bacterias y diversidad de depredadores. Si es inferior a 5, predominan los microorganismos depredadores en la biopelícula. Está acompañado por el parámetro SARR, este representa la carga diaria removida por área superficial disponible.	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Valores típicos de diseño de SALR para reactores MBBR a 15 °C.</th> </tr> <tr> <th rowspan="2">Descripción</th> <th>Porcentaje de remoción</th> <th>SALR de</th> </tr> <tr> <th>objetivo (%)</th> <th>diseño (gDBO/m²d)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Carga alta</td> <td>75-80</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>Carga normal</td> <td>85-90</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Carga baja</td> <td>90-95</td> <td>7,5</td> </tr> </tbody> </table> $\eta_{\text{MBBR}} = \frac{\text{Entrada} - \text{Salida}}{\text{Entrada}} = \frac{\text{SARR}}{\text{SALR}}$	Valores típicos de diseño de SALR para reactores MBBR a 15 °C.			Descripción	Porcentaje de remoción	SALR de	objetivo (%)	diseño (gDBO/m ² d)	Carga alta	75-80	25	Carga normal	85-90	15	Carga baja	90-95	7,5
Valores típicos de diseño de SALR para reactores MBBR a 15 °C.																			
Descripción	Porcentaje de remoción	SALR de																	
	objetivo (%)	diseño (gDBO/m ² d)																	
Carga alta	75-80	25																	
Carga normal	85-90	15																	
Carga baja	90-95	7,5																	

Fuente: Van Handeel – Van der Lubbe (2012), McQuarrie – Roltz (2011), Bengtson (2017).

Según se observa en el Cuadro 2, es necesario agregar rejillas que garanticen la permanencia de los medios de soporte en el tanque de aireación, se debe procurar el adecuado diseño y ubicación de estas a fin de facilitar su mantenimiento. Igualmente, deben implementarse difusores de burbuja gruesa para asegurar la movilidad de los medios de soporte, en el cuadro se presenta una recopilación de convenciones para diseño de sistemas de aireación de este tipo. Además, es fundamental la selección del modelo de biosoporte apropiado, observando que cada uno de ellos cuentan con

características técnicas que hacen que se diferencien entre sí. Finalmente, se vuelve importante destacar el papel del SALR, descrito como el parámetro de diseño clave para la tecnología MBBR, al estar vinculado con los cálculos de diseño y la eficiencia del sistema, donde valores más bajos conllevan a un mejor rendimiento.

Es importante hacer notar, el SALR puede ser estimado con gramos de DQO (demanda química de oxígeno) o con gramos de DBO (demanda bioquímica de oxígeno). La DQO engloba los compuestos que requieren oxidación química para ser degradados, mientras la DBO señala los compuestos que son oxidados mediante la actividad de los microorganismos. La DBO forma parte de la DQO, por lo que esta última siempre es mayor. Generalmente, los laboratorios establecen una relación entre los valores de DBO y DQO, ello es de gran utilidad debido a que, en lugar de invertir 5 días necesarios para determinar la DBO, serían empleados aproximadamente 3 horas en calcular la DQO (Metcalf y Eddy, 1995).

En relación con el dimensionamiento del reactor, se seleccionó una escala 1:300 frente al reactor biológico real, a fin de hacerlo accesible para el investigador. En el Cuadro 2, se desglosan las ecuaciones utilizadas en la definición de las características físicas del reactor, extraídas de la hoja de cálculo compartida por el autor Bengtson (2017) donde destaca, el volumen de soportes requerido, volumen de reactor requerido, requerimiento de oxígeno y *flux*, este último en unidades de Sm^3/hm^2 , representando el caudal estándar de aire que fluirá a través del área del tanque.

Cuadro 3. Ecuaciones para dimensionamiento del reactor biológico a escala MBBR.

DIMENSIONAMIENTO DE BIORREACTOR A ESCALA CON TECNOLOGÍA MBBR	
CÁLCULOS DE DISEÑO PARA REACTOR MBBR	
Parámetro	Ecuación
1 SALR, $gDQO/m^2d$	$\frac{\frac{g\ DBO}{m^3} * \frac{m^3}{d}}{ASE\ (m^2/m^3) * \% \text{ llenado} * V_r\ (m^3)}$
2 Superficie de Biosoporte Requerida, m^2	$\frac{\frac{g\ DBO}{m^3} * \frac{m^3}{d}}{SALR}$
3 Volumen de Biosoporte Requerido, m^3	$\frac{ASE\ (m^2/m^3) * \% \text{ llenado} * V_r\ (m^3)}{ASE\ (m^2/m^3)}$
4 Volumen de Reactor Requerido, m^3	$\frac{\% \text{ llenado} * V_r\ (m^3)}{\% \text{ llenado}}$
5 Requerimiento de Oxígeno, g/d	$\frac{g\ O_2}{g\ DBO} * \frac{g\ DBO}{m^3} * \frac{m^3}{d}$
6 SOTE, %	$\frac{SOTE}{m} * m$
7 AOTE, %	$\frac{AOTE}{SOTE} * SOTE$
8 Flux, Sm^3/hm^2	$\frac{\text{Oxígeno requerido en condiciones estándar} \left(\frac{Sm^3}{h}\right)}{\text{Área del tanque} (m^2)}$

Fuente: Bengtson (2017).

Seguidamente, se estructuró el programa de inspección de variables operativas (PIVO) como una herramienta que permitió el seguimiento del desempeño del reactor piloto MBBR mediante la evaluación de parámetros críticos de calidad, entre ellos, demanda química de oxígeno, pH, sólidos suspendidos totales, nitrógeno total, fósforo total, caudal instantáneo y peso de los medios de soporte. Los puntos de inspección establecidos fueron: alimentación, agua del reactor y descarga del reactor, con límites implantados conforme a la normativa estatal vigente aplicable (Decreto 3.219: Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de las Aguas de la Cuenca del Lago de Valencia) y los estándares de la empresa. Además, se añadió dentro de los indicadores un análisis microbiológico semanal, atendiendo a evaluar la comunidad microbiológica que se desarrollaba en los medios de soporte.

Cuadro 4. Programa de inspección de variables operativas en la prueba piloto planteada.

Característica de Inspección	Punto de Inspección	Nomenclatura de característica	Frecuencia de Inspección	Zona de especificación
pH	ALIMENTACIÓN	pH	Diario	6 -- 9
Temperatura (°C)		Temp		25 - 36
Sólidos suspendidos totales (mg/L)		SST		≤ 400 mg/L
Demanda Química de Oxígeno (mg/L)		DQO		≤ 1.200 mg/L
Nitrógeno total (mg/L)		N	Semanal	≤ 60 mg/L
Fósforo total (mg/L)		P		≤ 25 mg/L
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	REACTOR PILOTO	SST	Diario	
Sólidos Sedimentables (ml/L)		VLS30		
Temperatura del aire-sopladores (°C)		T aire		
Peso del carrier (g)		Peso	Semanal	>0,9990 g
pH	DESCARGA	pH	Diario	6 -- 9
Temperatura (°C)		Temp		25 - 35
Sólidos suspendidos totales (mg/L)		SST		≤ 1.000 mg/L
Demanda Química de Oxígeno (mg/L)		DQO		≤ 350 mg/L
Nitrógeno total (mg/L)		N	Semanal	≤ 10 mg/L
Fósforo total (mg/L)		P		≤ 1 mg/L
Caudal instantáneo (L/min)		Caudal inst	Diario	1 -- 4 L/min
Caudal acumulado (m3/d)		Caudal acum		1,5 -- 6 m3/d

Fuente: García – Gomes (2022).

El enfoque de la investigación fue mixto, es decir, tanto cualitativo como cuantitativo. Parte de los datos fueron recolectados a través de observaciones directas al fenómeno estudiado y los resultados estuvieron basados en la opinión del investigador, mientras que la otra proporción de los datos fueron recolectados numéricamente y analizados mediante la estadística descriptiva.

Alimentación por Cargas Secuenciales

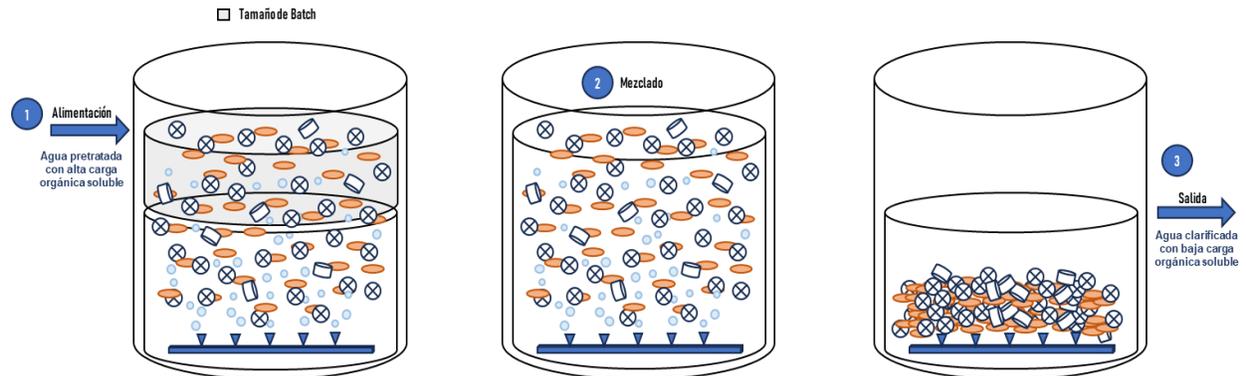


Figura 1. Descripción gráfica de alimentación por cargas secuenciales.
Fuente: Cerezo (2023).

La evaluación de la tecnología tuvo una duración de veinticuatro (24) semanas y fue clasificada según el método de alimentación utilizado, estos fueron: alimentación por cargas secuenciales y alimentación continua. El primero consistió en agregar al reactor una cantidad de agua controlada por encima del nivel operativo y entregarle un tiempo de reacción para luego descargarla por rebose, ello requería detener el suministro de aireación para la decantación de los sólidos, además, fue agregado lodo biológico desde el reactor real de la planta de tratamiento de aguas residuales para impulsar el proceso (Ver Figura 1).

Alimentación Continua

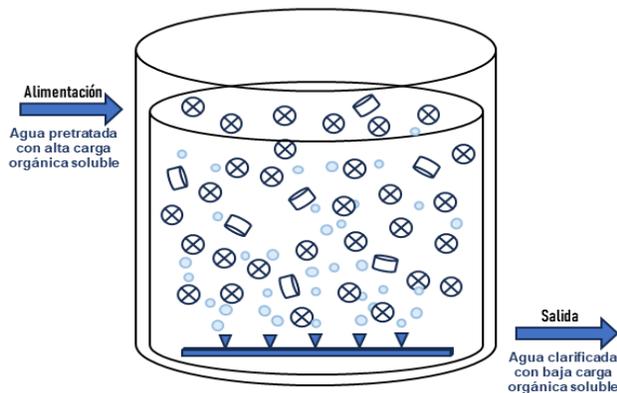


Figura 2. Descripción gráfica de alimentación continua.
Fuente: Cerezo (2023).

El segundo método de alimentación mantenía abierta la válvula de alimentación y la válvula de descarga, de esta manera, la salida ocurría por la parte inferior del tanque de aireación y no precisaba detener el suministro de oxígeno al reactor biológico a escala, únicamente se procuraba mantener un balance entre el caudal de entrada y el caudal de salida para controlar el nivel del tanque (Ver Figura 2).

Según se ha citado, una de las ventajas de la tecnología MBBR es su funcionamiento con baja concentración de sólidos suspendidos, sin embargo, se desconocía si era posible la formación de biomasa adherida sin presencia de lodo biológico en suspensión. Considerando que la alimentación continua implicaba la fuga de lodos, se planteó utilizar alimentación por cargas secuenciales hasta observar adherencia para luego aplicar alimentación continua.

Finalmente, para el análisis de los datos recolectados con los dos métodos de alimentación, fueron empleados pruebas de hipótesis, definidas por Mendenhall et al. (2010) como “una decisión acerca del valor de un parámetro, con base en alguna idea preconcebida acerca cuál podría ser su valor” para comprobar la distribución normal, donde esta describe según Gutiérrez y De la Vara (2009) una distribución continua cuya densidad tiene forma de campana, su centro coincide con la media, y su amplitud está determinada por su desviación estándar.

Resultados y Discusión

Para empezar con el diseño del reactor piloto a escala, se seleccionó el biosoporte a utilizar a partir de la información recolectada. El modelo estándar BiofilmChip M no puede ser aplicado, porque se realizan pruebas en presencia de oxígeno. Luego, el modelo K5 si bien tiene una mayor área superficial específica, la morfología del biosoporte tiene agujeros de menor tamaño, en consideración de los problemas de obstrucción posibles se descartó este modelo. Seguidamente, entre el modelo K1 y K3, el modelo estándar K3 es recomendado para plantas nuevas. Aun así, fue introducido un volumen menor del modelo estándar K1 para evaluar su comportamiento ante las condiciones de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Se ubicaron proveedores que ofrecieran medios plásticos con características similares a la del modelo estándar seleccionado (K3). La empresa SSI Aeration, fabricante de equipos para el tratamiento de aguas residuales, certificada en normas de calidad ISO 9001:2015, ofrece entre sus productos medios de soportes con áreas superficiales cercanas al estándar esperado ($500 \text{ m}^2/\text{m}^3$), el seleccionado tiene un área superficial específica de $575 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

De acuerdo con los razonamientos que se han venido realizando, se seleccionó un SALR de diseño de $6,5 \text{ gDBO}/\text{m}^2\text{d}$, anteriormente se explicaba que valores más bajos conllevan a una mayor eficiencia en remoción de carga orgánica. A su vez, implica una mayor área superficial comparada proporcionalmente a la materia orgánica existente en el afluente al reactor biológico a escala, con la revisión de registros empresariales se obtuvo que la concentración de DBO promedio afluente es de 611 mg/L y, aplicando la escala seleccionada, el caudal diario que debe recibir el reactor para simular condiciones reales es de $4,1 \text{ m}^3/\text{d}$.

Los parámetros para el dimensionado del reactor biológico se presentan a continuación ver cuadro 5. A partir del valor para SALR seleccionado, al igual que el área superficial específica del modelo de biosoporte, fue posible definir el porcentaje de relleno del reactor, el volumen de biorreactor requerido, entre otras características relevantes. Se mantuvo la misma relación altura/diámetro entre el reactor real y el reactor biológico a escala.

Cuadro 5. Memoria de cálculos para la construcción del reactor biológico a escala.

Parámetro	Unidad	Valor	Parámetro	Unidad	Valor
Carga DBO	<i>g/d</i>	2505,1	Volumen de reactor requerido	m^3	2,77
Área superficial específica (ASE)	m^2	402,5	Diámetro del tanque	<i>m</i>	1,84
SALR	g/m^2d	6,5	Altura del tanque	<i>m</i>	1,00
SARR	g/m^2d	6,07	Requerimiento de Oxígeno	<i>g/d</i>	2505,1
DBO removida estimada	<i>g/d</i>	2339,8	SOTE	%	402,5
DBO efluente	<i>mg/L</i>	41	Requerimiento de aire	Nm^3/min	0,7
Volumen de soportes requerido	m^3	0,68	Flux	Sm^3/hm^2	16,09

Fuente: García – Gomes (2022).

El diseño de la parrilla de difusores de burbuja gruesa se presenta en la Figura 3, considerando los resultados obtenidos en el Cuadro 4. La parrilla se diseñó para contar con 8 difusores, cada uno de ellos con un total de 10 agujeros para la distribución del aire dentro del reactor piloto MBBR. Se comprobó si esta relación era la adecuada a través de comparación del área de la tubería principal, frente al área total activa proporcionada por los agujeros.

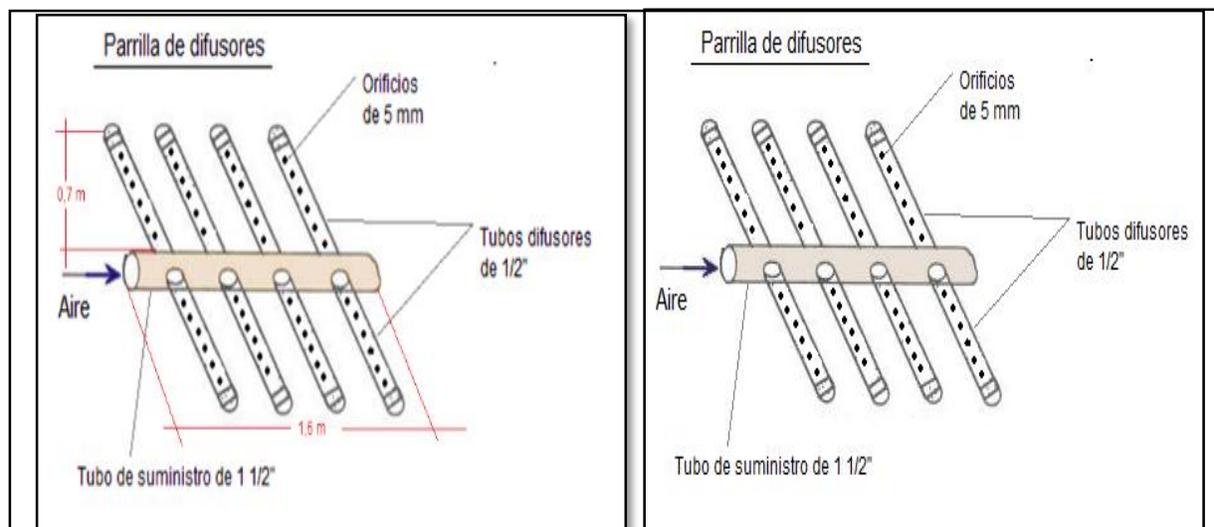


Figura 3. Diseño de difusor de burbuja gruesa para reactor piloto MBBR.

Fuente: García – Gomes (2022).

Con todo lo anterior, se presenta el diagrama de flujo de proceso del reactor biológico piloto a escala con tecnología MBBR (Ver figura 4). Como se puede observar, estuvo alimentado por la misma fosa que alimenta al reactor biológico de la planta de tratamiento (1), el efluente es devuelto a esa misma estación de bombeo (2) y puede ser alimentado por los sopladores que se encuentran en el área o por el pulmón de aire comprimido (3).

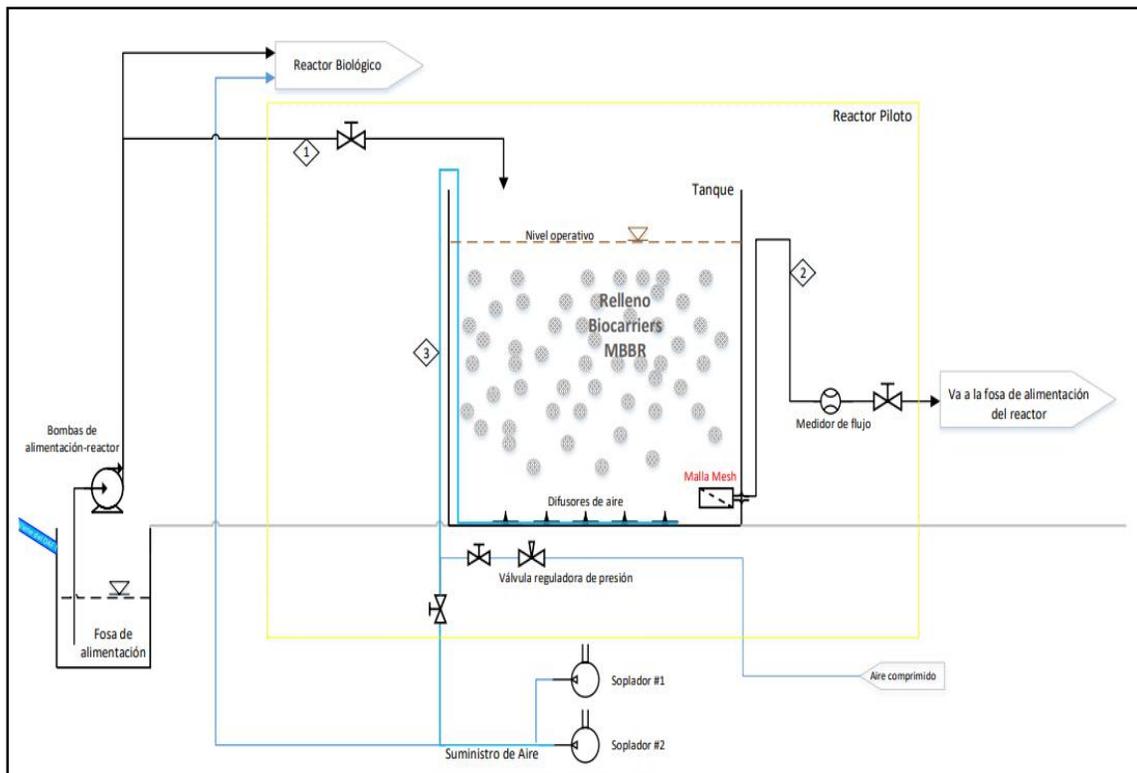


Figura 4. Diagrama de flujo de proceso (DFP) del reactor piloto MBBR
Fuente: García – Gomes (2022).

Una vez fue diseñado e instalado el reactor, se procedió a introducir a los bioportos en el tanque de aireación. Las primeras nueve (9) semanas del proyecto se implementó el método de alimentación por cargas secuenciales, a continuación, se presentan gráficas de los datos recopilados para los parámetros críticos de calidad más relevantes, entre ellos se encuentran, los SST en el agua del reactor, concentración de DQO en la salida del reactor y el porcentaje de eficiencia en remoción de carga orgánica, incluyendo imágenes del aspecto de los bioportos durante el período.

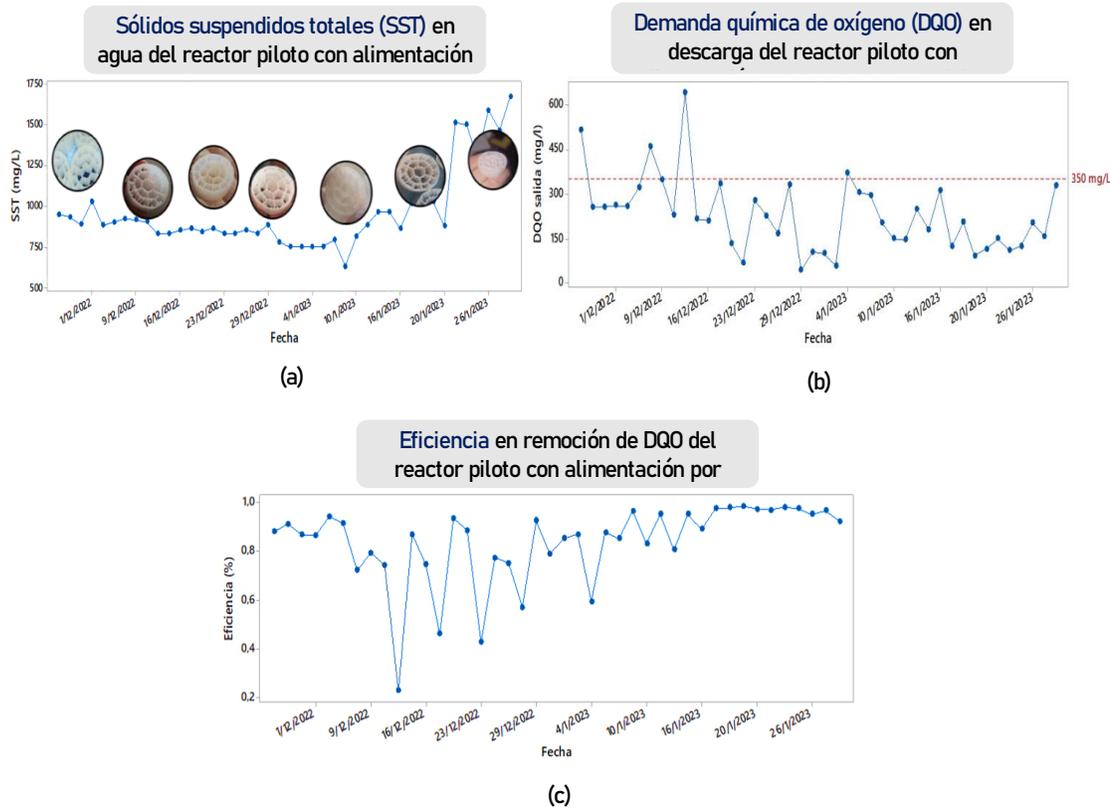


Figura 5. Serie de tiempo parámetros de calidad con alimentación por cargas secuenciales.

Fuente: Cerezo (2023).

Se observó que no fue desarrollada biopelícula empleando este tipo de alimentación, el aspecto de los medios de soportes termina siendo semejante a su aspecto inicial. En la figura 5.c para la eficiencia en remoción de carga orgánica se muestra una mejoría notable con el paso del tiempo, alcanzando porcentajes superiores al 90%. Sin embargo, todo lo anterior está acompañado por una concentración de sólidos suspendidos superior a 1000 mg/l, e incluso, a partir del 16 de enero la concentración de sólidos alcanza hasta 1750 mg/L, correspondiente a un período en el que se aumentó la carga orgánica afluente en búsqueda de estimular el crecimiento de biopelícula insatisfactoriamente. Atendiendo a lo explicado, se genera la hipótesis de que fueron los microorganismos suspendidos aquellos que tomaron la tarea de realizar la degradación de la carga orgánica hasta valores inferiores al límite normativo, ya que no existieron cambios notables respecto a adherencia de biomasa en los soportes.

Se encontró similitud con el estudio de Sanabria y Pacheco (2019), en su evaluación de un biorreactor MBBR de cargas secuenciales determinaron que la eficiencia alcanzada por el sistema se debía al trabajo de la biomasa en suspensión, en los soportes jamás se logró notar adherencia. Para ellos, la causa principal fue la aireación inyectada al reactor, en su experimento no era un factor controlado. No obstante, en esta

Para este momento, la concentración de SST dentro del reactor se encontraba en un orden de 112 mg/L, teniendo picos que llegaban a 207 mg/L según la carga orgánica que recibía o la cantidad de sólidos que acompañaban al afluente del reactor. Se observa claramente, en esta oportunidad los encargados de degradar la materia orgánica eran los microorganismos que convivían en la biopelícula adherida a la estructura de los soportes.

Durante el período de alimentación continua se dieron distintos eventos que hicieron notar la resiliencia de la tecnología MBBR. Como es el caso del desprendimiento de biopelícula a las siete semanas utilizando alimentación continua, el desprendimiento observado fue casi total, no obstante, permaneció una capa ligera adherida. Se estudiaron las causas que pudieron provocar la pérdida de la biopelícula, encontrando que días anteriores entró una alta carga orgánica, hubo higienización con distintos productos en áreas productivas y se dieron cortes energéticos. A todo ello, el reactor mantuvo la eficiencia en remoción de carga orgánica y la densidad de la biopelícula fue recuperada dos semanas después del evento.

Cabe agregar, el reactor estuvo expuesto a paradas de mantenimiento, donde el agua recibida en la planta de tratamiento a lo largo de la semana tenía residuos de amoníaco, ácidos grasos y soda caustica, lo que quiere decir, altos valores de pH y SST, representando condiciones difíciles para el desarrollo de actividad microbológica. Al evaluar los efectos una semana después, se detalló en el aspecto de los biosoportos que la biomasa había oscurecido, más no ocurrió desprendimiento o se observó obstrucción. Hubo un crecimiento significativo de sólidos, estos son adjudicados a los recibidos en la alimentación y la semana de regreso el piloto MBBR mantuvo una eficiencia media en remoción del 79,19%. Con lo anterior, se deduce que el reactor es capaz de soportar dichas condiciones adversas.

En las últimas etapas del estudio se observó un acrecimiento de la biopelícula. Como se había comentado en la introducción a la investigación, dependiendo de las características del afluente y la efectividad de los tratamientos anteriores aplicados, se darán condiciones para el desarrollo de la biopelícula. En función de los resultados obtenidos, la biopelícula atrapa los sólidos y grasas afluentes, siendo capaz de afectar la eficiencia, pues la obstrucción impide el paso de oxígeno y el sustrato de carga orgánica soluble a través de la estructura. Se cuestionó si lo anterior descarta a la tecnología MBBR como posible alternativa de tratamiento para el efluente característico estudiado, sin embargo, al observar los soportes introducidos parecidos al modelo estándar K1, se concluyó que se debe mayormente a la selección de un soporte plástico inadecuado, pues al ser los agujeros de mayor tamaño permite el paso de las grasas a través de él (Figura 7).

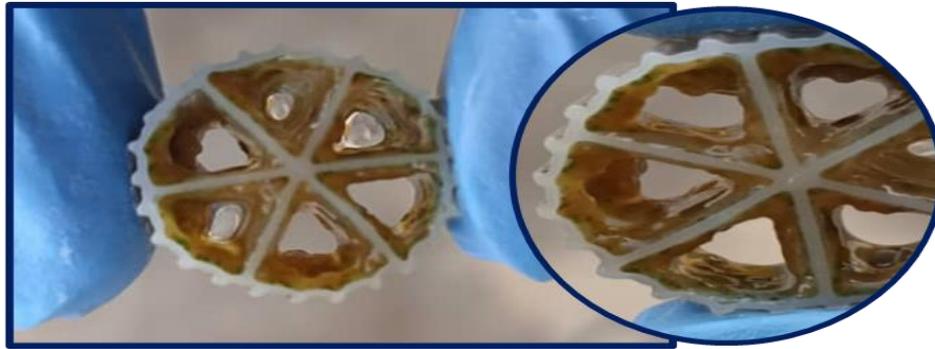


Figura 7. Biosoporte similar a modelo standard K1 sin presentar problemas de obstrucción al finalizar el período de prueba.
Fuente: Cerezo (2023).

Durante la alimentación por cargas secuenciales no se observó crecimiento de biopelícula, fueron utilizados los datos obtenidos mediante la alimentación continua para el análisis estadístico de los resultados. Además, dentro de este grupo de datos fueron seleccionados los datos recolectados una vez se normalizó el comportamiento de la eficiencia. Para este análisis fue empleado el software estadístico Minitab, utilizando un nivel de significancia de 0,05.

Iniciando, fueron aplicadas pruebas de hipótesis para la separación de los valores atípicos, debido a que provocan el desbalance en los resultados estadísticos y pueden llevar a interpretaciones engañosas. En la figura 8, se muestran las gráficas obtenidas al introducir los datos en el software, así como una explicación para aquellos que resultan irregulares.

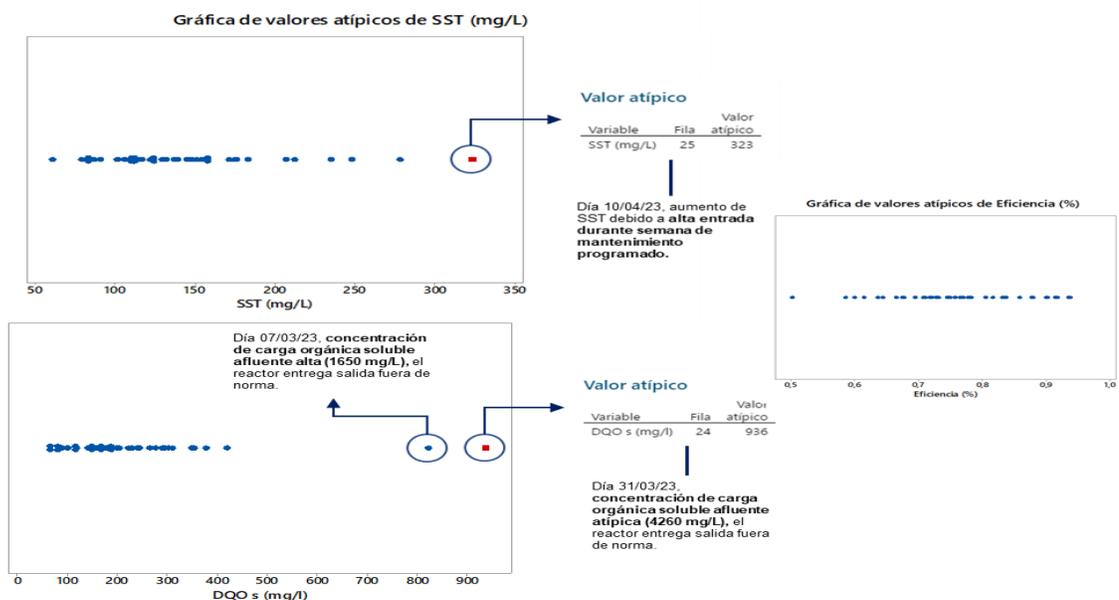


Figura 8. Determinación de valores atípicos recolectados en la prueba.
Fuente: Cerezo (2023).

Con el análisis se encuentra que, tanto los sólidos suspendidos en el agua del reactor piloto MBBR como la cantidad de DQO concentrada en la salida, presentan valores atípicos. Por su parte, la eficiencia en remoción de carga orgánica no presenta valores atípicos, indicando que el porcentaje de remoción se mantuvo durante el período dentro de un intervalo razonable. Tomando esto en cuenta, se decide sustraer los días que contienen cifras infrecuentes.

Una vez fue depurada la data recolectada, se aplica la prueba de normalidad a los valores restantes. Según se observa, la concentración de DQO en la salida sigue una distribución normal, al igual que el porcentaje de eficiencia en remoción de carga orgánica. Sin embargo, la concentración de sólidos suspendidos totales en el reactor no sigue este tipo de distribución, el diagnóstico se atribuye a que la cantidad de SST dependerá de los sólidos presentes en el afluente.

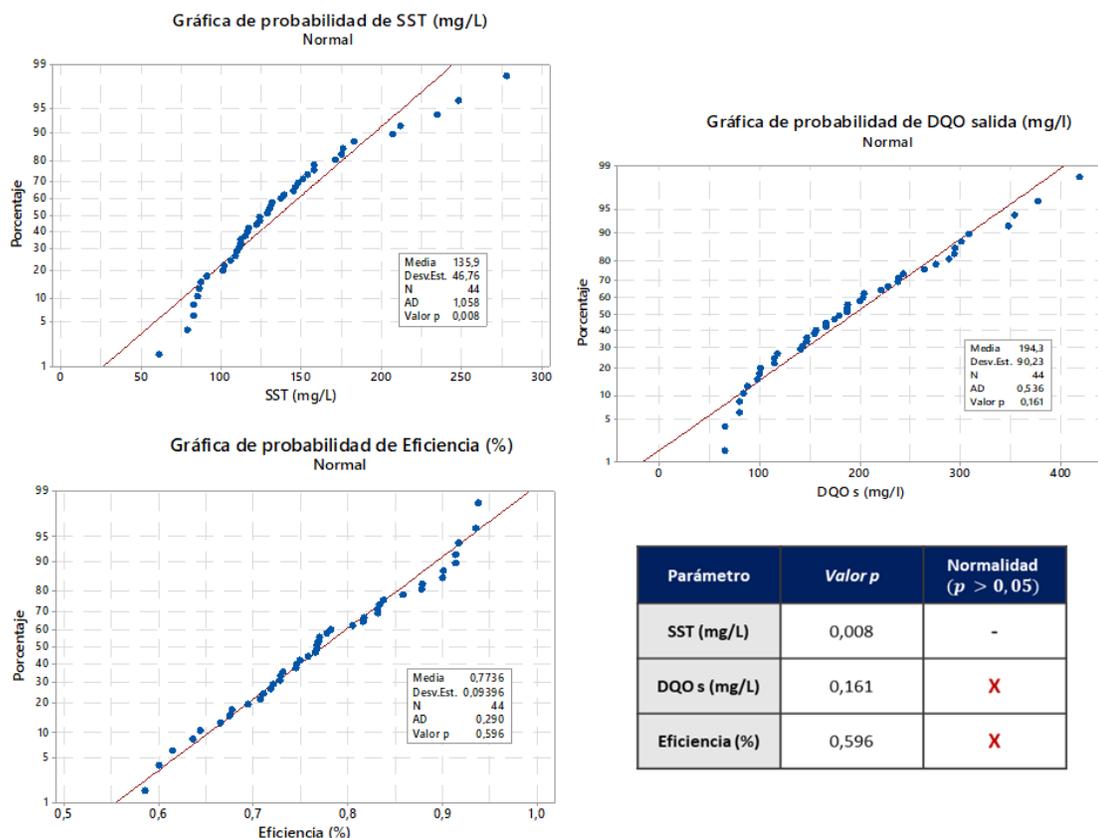


Figura 9. Prueba de normalidad aplicada en data depurada.
Fuente: Cerezo (2023).

Con referencia a las anteriores deducciones, en el cuadro 6 se muestran los resultados para las variables críticas estudiadas. En cuanto a la concentración de sólidos, esta no sigue una distribución normal y, por ello, fue representado a través de un rango, donde los valores más altos no superan 300 mg/L. Por su parte, los valores para la concentración de DQO en el efluente se encuentran inferiores a la norma estatal

vigente (350 mg/L), tomando en cuenta su desviación estándar, la cifra más alta que puede alcanzar es 284,53 mg/L. Finalmente, la eficiencia en el reactor tiene un promedio del 77,36%, con baja dispersión entre sus valores.

Cuadro 6. Resultados para parámetros críticos de calidad obtenidos.

SST EN EL AGUA (mg/L)	DQO SALIDA (mg/L)	EFICIENCIA (%)
(61 – 278)	194,3 ± 90,23	77,36 ± 9,40

Fuente: Cerezo (2023).

Finalmente, se objetó el porcentaje de eficiencia promedio conseguido, ya que se estaba apuntando a un porcentaje cercano al 90%. La eficiencia evaluada para el sistema se obtuvo según la remoción de DQO y no de DBO, este parámetro engloba compuestos que pueden ser degradados químicamente y algunos de ellos no pueden ser degradados de forma biológica, por lo que los microorganismos no tienen la capacidad para disminuir esta porción. En este sentido, no es posible comparar los resultados conseguidos respecto a los valores referenciales de Bengtson (2017), ya que están basados en parámetros distintos.

Conclusiones

El presente estudio demostró que la tecnología MBBR (por sus siglas en inglés, moving bed biofilm reactor) o biorreactor de lecho móvil puede ser aplicada para tratar las aguas residuales generadas en la industria de alimentos, específicamente, para efluentes con una importante concentración de grasas y aceites, asegurando una eficiencia en remoción de la demanda química de oxígeno promedio del 77,36%. La investigación comprobó las ventajas de un tratamiento biológico por crecimiento adherido, como lo son, la baja concentración de sólidos suspendidos, la capacidad del sistema independiente al volumen de agua dentro del biorreactor y la resiliencia de la biomasa ante condiciones tóxicas gracias a la protección de la biopelícula.

Según se ha citado, el diseño del reactor biológico a escala con tecnología MBBR estuvo basado en bibliografía desarrollada por expertos, agrupando todos los requerimientos técnicos para el correcto funcionamiento del sistema y comprobando su importancia de forma experimental. Entre los requerimientos con mayor influencia en el resultado obtenido, se señala la selección de un modelo de biosoporte adecuado a las condiciones y al efluente generado por la producción, donde este deberá ser más amplio para evitar la obstrucción por sólidos provenientes de tratamientos anteriores, así como mantener la eficiencia del proceso a realizar. En este sentido, se debe procurar la efectividad del tratamiento fisicoquímico, para evitar la entrada eventual de compuestos perjudiciales al sistema biológico.

El período de experimentación fue dividido en dos etapas según del método de alimentación implementado. Durante el método de alimentación por cargas secuenciales no fue observado desarrollo de biopelícula en los medios de soporte, en

su lugar, se encontró que los microorganismos se reproducían en el medio líquido. Al implementar el método de alimentación continuo, el aspecto de los biosoportos cambió con rapidez, evidenciando qué condiciones favorecen el desarrollo de los microorganismos en el medio sólido. El análisis estadístico de los parámetros críticos de calidad entregó que la concentración SST estuvo en un rango entre 61 a 278 mg/L y la DQO de salida tuvo un promedio de 195 mg/L.

Referencias

- Balarezo, K. (2018). Evaluación del Sistema Biológico MBBR en la Ampliación de Capacidad de Tratamiento en PTARI existente para Aguas Residuales de la Industria de Alimentos. [Trabajo especial de grado]. Universidad Nacional Agraria.
- Bengston, H. (2017). Biological Wasterwater Treatment II: MBBR Processes. [Archivo PDF].
- Gutiérrez, H., De la Vara, R. (2009). Control estadístico de Calidad y Seis Sigma. McGraw-Hill Interamericana.
- Mcquarrie, J., Roltz, J. (2011). Moving Bed Biofilm Reactor Technology: Process Applications, Design and Performance.
- Mendenhall., W, Beaver, R., Beaver, B. (2010). Introducción a la probabilidad y estadística. Cengage Learning Editores.
- Metcalf y Eddy (1995). Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, vertido y reutilización. (3era ed.). Mcgraw-Hill.
- Sanabria, A. y Pacheco, J. (2019). Diseño y Evaluación de un Reactor Biológico de Lecho Móvil de Cargas Secuenciales como Alternativa de Tratamiento para un vertimiento procedente de una Industria Farmacéutica. [Trabajo especial de grado]. Universidad de la Salle.
- Van Haandel A., Van der Lubbe J., (2012). Handbook of Biological Wastewater Treatment. IWA Publications.

Resumen curricular de autores citados

1. Kevin Balarezo realizó su trabajo de investigación titulado "Evaluación del sistema biológico MBBR en la ampliación de capacidad de tratamiento en PTARI existente para aguas residuales de la industria de alimentos" en el año 2018 para optar al título de ingeniero ambiental en la Universidad Nacional Agraria en Lima, Perú.
2. Harlan Bengtson es un ingeniero graduado de la Universidad del Estado Iowa con un PhD de la Universidad de Colorado, experto en la ingeniería ambiental, hidráulica y energía renovable. Actualmente se dedica a la docencia, al igual que al desarrollo de hojas de cálculo para varios proyectos de ingeniería en sus sitios web www.engineeringexceltemplates.com y www.EngineeringExcelSpreadsheets.com.
3. Humberto Gutiérrez es un doctor en probabilidad y estadística, graduado del Centro de Investigaciones en Matemáticas de México dedicado al desarrollo y aplicación de la tecnología para el aprendizaje y la enseñanza de las matemáticas, siendo autor de más de diez (10) libros de texto.
4. Román de la Vara es un consultor en control de la calidad y estadística en el Centro de Investigación en Matemáticas de México desde el año 1992 hasta la actualidad, dedicado al análisis de la estadística industrial.
5. James Mcquarrie es un especialista en evaluación y diseño de procesos de tratamiento de aguas residuales con más de diez (10) años de experiencia, ha estado involucrado con distintos proyectos MBBR en diversos niveles, participando en una de las primeras instalaciones del sistema en Estados Unidos.
6. Joshua Boltz es un líder técnico dedicado a la ejecución de proyectos innovadores con un impacto positivo en el medio ambiente, contando con veinte (20) años de experiencia en el tratamiento de aguas residuales municipales.

7. William Mendenhall es un investigador responsable de haber desarrollado más de cinco (5) libros de texto dedicados a la probabilidad y a la estadística, basado en la Universidad de Florida.
8. Robert J. Beaver fue un profesor de estadística estadounidense, si bien empezó como profesor de educación secundaria, dedicó el resto de su carrera a ser profesor de estadística en la Universidad de California, contando con un máster y un doctorado en la materia.
9. Barbara M. Beaver es una profesora de estadística de la Universidad de California.
10. Metcalf y Eddy, Inc. es una compañía fundada en el año 2000, dedicada a prestar servicios de ingeniería profesional. Los autores principales que participaron en el libro referenciado son: George Tchobanoglous, profesor de ingeniería civil en la Universidad de California en Davis y Franklin L. Burton, vicepresidente e ingeniero jefe de la Oficina Regional del Oeste de la compañía.
11. Alexander Sanabria y Juan Pacheco realizaron su trabajo de investigación título “Diseño y evaluación de un reactor biológico de lecho móvil de cargas secuenciales como alternativa de tratamiento para un vertimiento procedente de la industria farmacéutica” en el 2019 para optar al título de ingeniero ambiental y sanitario en la Universidad de la Salle, ubicada en Bogotá Colombia.
12. Adrianus Van Haandel es un ingeniero químico dedicado a la investigación de tratamiento biológico en la Universidad Federal de Campina Grande en Brasil, con múltiples publicaciones y siendo autor de diferentes libros alrededor del tema.
13. Jeroen Van der Lubbe es el gerente de tecnología de la empresa Biothane, compañía líder en proveer sistemas de tratamiento de aguas residuales alrededor del mundo.