



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA
MBBR COMO ALTERNATIVA DE
AMPLIACIÓN DE LA CAPACIDAD
DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO
BIOLÓGICO EN ALIMENTOS POLAR
COMERCIAL C.A.**

Autor:
Isis María Cerezo Soto

Urb. Yuma II, calle N° 3. Municipio San Diego
Teléfono: (0241) 8714240 (master) – Fax: (0241) 871239



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA MBBR COMO ALTERNATIVA DE
AMPLIACIÓN DE LA CAPACIDAD DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO
BIOLÓGICO EN ALIMENTOS POLAR COMERCIAL C.A.**

Proyecto del Trabajo de Grado para optar al título de
INGENIERO INDUSTRIAL

Autor:

Cerezo, Isis C.I.: 29.727.396

Tutor:

Ing. Viky Mujica C.I.: 12.033.474

San Diego, junio del 2023



ACTA DE APROBACIÓN

INFORME FINAL DE PASANTÍA

TRABAJO DE GRADO

El jurado designado por la Facultad de Ingeniería para la evaluación del Informe Final de Pasantía o Trabajo de Grado titulado: Evaluación de la tecnología MBBR como alternativa de ampliación de la capacidad del sistema de tratamiento biológico en alimentos Polar Comercial C.A

Realizado por el (la) Br. Isis Cerezo

C.I. N° 29.724.396 cursante de la carrera de Ingeniería Industrial

hace constar después de analizar su contenido y oída la exposición oral, considera que el Informe Final o Trabajo de Grado ha obtenido la calificación de:

APROBADO

NO APROBADO

El Jurado

[Signature]
Tutor Académico (Coordinador)
Nombre: [Signature]
C.I.: 12.033.474

[Signature]
Jurado
Nombre: Ana Amador
C.I.: 7.187.788

[Signature]
Jurado
Nombre: [Signature]
C.I.: 9.224.592

Fecha: 03/07/2023





REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**CONSTANCIA DE APROBACIÓN PARA LA PRESENTACIÓN PÚBLICA
DEL TRABAJO DE GRADO**

Quien suscribe, Ing. Viky Mujica, portador de la cédula de identidad N° 12.033.474, en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por el ciudadano Isis María Cerezo Soto, portador de la cédula de identidad N° 29.727.396, titulado **EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA MBBR COMO ALTERNATIVA DE AMPLIACIÓN DE LA CAPACIDAD DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO EN ALIMENTOS POLAR COMERCIAL C.A.**, presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Industrial, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los 14 días del mes de junio del año dos mil veintitrés.

Ing. Viky Mujica
C.I.: 12.033.474



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA

FI I 008 2022-3CR TG

Valencia, 14 de abril de 2023

Ciudadano:
CEREZO SOTO, ISIS MARÍA
29.727.396
Presente -

Cumplo con informarle que la comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 03-2023 de fecha 08/02/2023 aprobó el proyecto de grado titulado:

Evaluación de la tecnología MBBR como alternativa de ampliación de la capacidad del sistema de tratamiento biológico en Alimentos Polar Comercial C.A.

Presentado por usted como requisito para optar al título de Ingeniero Industrial.

Se ratifica la designación del Tutor Académico que lo asesorará en el desarrollo de este proyecto a:
Ing. Viky Coromoto Mujica Figueredo, titular de la cédula de identidad V-12.033.474

Atentamente

Dra. Laura Aurora Sáenz Palencia
Decana de la Facultad de Ingeniería



c.c. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado de la Facultad de Ingeniería

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por ser mi guía en todas las circunstancias.

A mis padres, por motivarme constantemente a alcanzar una mejor versión de mí, brindarme su apoyo incondicional ante cualquier reto y enseñarme que con pasión, determinación y responsabilidad todo es posible.

A mi hermano menor, por hacerme reír y ser mi mejor amigo.

A mis profesores, por ser un ejemplo de constancia y compromiso.

A mis compañeros, por mostrarme todos los días algo nuevo y nunca rendirse.

A mi tutora, Viky Mujica, por creer en mí y darme un espacio para explorar conceptos nuevos.

A Víctor García y a David Gomes, por abrirme las puertas hacia algo desconocido que se volvió muy especial para mí. Gracias por compartir sus conocimientos conmigo, orientarme y enseñarme con tanta amabilidad y disposición.

Finalmente, pero no menos importante, a Yan, Alfredo, Rommy, Javier y Ramón, por darme un espacio en su área de trabajo y acompañarme de lunes a viernes a lo largo de la prueba.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	Pp.
ÍNDICE DE CUADROS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO

I EL PROBLEMA

1.1	Planteamiento del problema.....	3
1.2	Formulación del problema.....	9
1.3	Objetivos de la investigación.....	9
	1.3.1 Objetivo general.....	9
	1.3.2 Objetivos específicos.....	9
1.4	Justificación de la investigación.....	10
1.5	Alcance y limitaciones de la investigación.....	11

II MARCO TEÓRICO

2.1	Antecedentes de la investigación.....	12
2.2	Teorías centrales de la investigación.....	16
2.3	Bases teóricas.....	17
	2.3.1 Aguas residuales.....	17
	2.3.2 Características de las aguas residuales.....	18
	2.3.3 Tipos de tratamiento de aguas residuales.....	24
	2.3.4 Tecnología MBBR.....	28
	2.3.5 Modelización matemática en la investigación de operaciones.....	34
	2.3.6 Ajuste de Curvas.....	37
2.4	Bases Legales.....	38
	2.4.1 Constitución de la República Bolivariana de Venezuela.....	39
	2.4.2 Ley Orgánica del Ambiente.....	39
	2.4.3 Ley Penal del Ambiente.....	39
	2.4.4 Ley Sobre Sustancias, Materiales y Desechos Peligrosos.....	40
	2.4.5 Ley Orgánica de Precios Justos.....	41
	2.4.6 Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de las Aguas de la Cuenta del Lago de Valencia	41
2.5	Definición de términos básicos.....	42

III MARCO METODOLÓGICO

3.1	Tipo de la investigación.....	43
-----	-------------------------------	----

3.2	Diseño de la investigación	45
3.3	Nivel de la investigación.....	45
3.4	Población y muestra.....	46
	3.4.1 Población.....	46
	3.4.2 Muestra.....	46
3.5	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	46
	3.5.1 Técnicas de recolección de datos.....	46
	3.5.2 Instrumentos de recolección de datos.....	48
3.6	Técnicas de análisis de la información.....	49
	3.6.1 Validación del Instrumento	52
	3.6.2 Cuadro de Operacionalización de Variables	52
3.7	Fases metodológicas.....	52

IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	FASE I: Diagnóstico de la situación actual en el sistema de tratamiento biológico, para la determinación de las condiciones operacionales del mismo.....	54
	4.1.1 La Empresa.....	55
	4.1.2 Proceso de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales.....	60
	4.1.3 Diagramas esquemáticos de equipos del sistema de tratamiento biológico.....	68
	4.1.4 Comportamiento del sistema biológico.....	71
	4.1.5 Resultado de la lista de observación aplicada al sistema biológico de la planta de tratamiento de aguas residuales.....	72
	4.1.6 Resultado de la entrevista aplicada al personal que opera el sistema biológico	74
4.2	FASE II: Análisis de oportunidades de mejora encontrada en el sistema de tratamiento biológico.	82
	4.2.1 Organización de las causas encontradas mediante el diagrama Causa-Efecto..	83
	4.2.2 Evaluación de alternativas para el aumento de la capacidad del sistema de tratamiento biológico.....	85
	4.2.3 Modificaciones requeridas en el sistema biológico para la implementación de la tecnología MBBR.....	92
	4.2.4 Resumen de resultados obtenidos con el análisis de debilidades en el sistema biológico.	97
4.3	FASE III: Diseño de un reactor biológico piloto a escala que simule las condiciones reales de los efluentes de la planta con tecnología MBBR.....	98
	4.3.1 Premisas de diseño.....	99
	4.3.2 Selección de biosoporte a utilizar en reactor piloto MBBR.....	100
	4.3.3 Memoria de cálculos para el diseño del reactor piloto MBBR.....	103
	4.3.4 Elaboración de programa de inspección de variables operativas en la prueba piloto planteada.....	109

4.4	FASE IV: Evaluación de la propuesta a través del desempeño de la tecnología.....	110
	4.4.1 Métodos de alimentación empleados.....	110
	4.4.2 Resultados para parámetros críticos de calidad.....	119
	4.4.3 Microbiología MBBR.....	121
	4.4.4 Modelización matemática del desempeño del reactor piloto en función de los resultados obtenidos en el plan de inspección y ensayo.....	124
4.5	FASE V: Determinación de la factibilidad operativa, técnica, ambiental, social y económica de la propuesta.....	134
	4.5.1 Factibilidad Operativa	134
	4.5.2 Factibilidad Técnica.....	135
	4.5.3 Factibilidad Ambiental.....	137
	4.5.4 Factibilidad Social.....	139
	4.5.5 Factibilidad Económica.....	140
	CONCLUSIONES	148
	RECOMENDACIONES	152
	REFERENCIAS	153
	ANEXOS	158
	ANEXO A. Validación de instrumento de recolección de datos	158
	ANEXO B. Cuadro de operacionalización de variables	163
	ANEXO C. Memoria de fórmulas para cálculos	164
	ANEXO D. Instalación del reactor piloto con tecnología MBBR	165
	ANEXO E. Materiales requeridos para la construcción del reactor piloto MBBR	166
	ANEXO F. Gráficos de control para variables críticas de calidad medidas	167
	ANEXO G. Resultado de prueba de jarras para definir dosis de polímeros	172

LISTA DE CUADROS

DESCRIPCIÓN

CUADRO		pp.
1	Valores de diseño típicos de SALR y su relación con el porcentaje de remoción.....	31
2	Velocidades típicas de flujo de aire en función del diámetro de la tubería.....	34
3	Parámetros de control para el vertimiento de líquidos en el Lago de Valencia	42
4	Lista de productos APC – “Planta Salsas y Untables” activos	56
5	Principios de Empresas Polar.....	58
6	Valores de Empresas Polar.....	58
7	Políticas Ambientales de la Organización.....	58
8	Válvulas e instrumentos relacionados al reactor biológico.....	70
9	Válvulas e instrumentos relacionados al DAF II.....	71
10	Características de los afluentes y efluentes del reactor biológico en la planta de tratamiento de aguas residuales industriales.....	72
11	Lista de observaciones de sistemas de tratamiento biológico enfocada en disponibilidad de los equipos y normalización de las operaciones.....	74
12	Entrevista a operador 1.....	76
13	Entrevista a operador 2.....	77
14	Entrevista a operador 3.....	78
15	Características de la Unidad DAF II.....	86
16	Ventajas y desventajas de instalar una unidad DAF con otras dimensiones....	87
17	Ventajas y desventajas de implementar un tratamiento biológico en un biorreactor de membrana (MBR).....	88
18	Ventajas y desventajas de implementar un tratamiento biológico en un biorreactor de lecho móvil (MBBR).....	89
19	Asignación de valores para cada uno de los criterios de selección.....	90
20	Escala de valoración de criterios	91
21	Matriz de puntuación para selección de alternativas.....	91
22	Características técnicas de modelos estándar de biosoportos.....	101
23	Leyenda para corrientes en DFP reactor piloto MBBR.....	108
24	Programa de inspección de variables operativas en la prueba piloto planteada	109
25	Resultados finales para parámetros críticos de calidad.....	121

26	Resultados de modelo matemático de programación no lineal – SALR.....	128
27	Intervalos de tiempo para etapas de regulación de biopelícula.....	132
28	Planificación de capacitación para el equipo de trabajo.....	135
29	Equipos y materiales requeridos para el desarrollo óptimo del proyecto.....	136
30	Plan de mantenimiento para implementar tecnología MBBR.....	137
31	Sanciones relacionadas con el vertido de aguas residuales sin tratar.....	138
32	Sanciones relacionadas con el vertido de aguas residuales cerca de comunidades.....	139
33	Cotización de proveedor de medios de soporte plásticos.....	140
34	Cotización de proveedor de sopladores.....	141
35	Inversión Inicial.....	142
36	Depreciación y amortización de activos.....	143
37	Ahorros al evitar sanciones legales.....	144
38	Estimación de costo de producción por unidad de producto en Alimentos Polar.....	145
39	Utilidad estimada por cada gramo de producto fabricado.....	146
40	Utilidad estimada para una producción de 18.000 TON/mes.....	146
41	Utilidad estimada para una producción de 11.500 TON/mes.....	146
42	Costo de oportunidad estimado.....	147

LISTA DE FIGURAS

DESCRIPCIÓN

FIGURA		pp.
1	Descripción gráfica del tratamiento de aguas residuales industriales aplicado en Alimentos Polar C.A. – Planta Salsas Untables.....	5
2	Características del agua residual a través de los procesos de tratamiento.	7
3	Ejemplo de acción para contener lodos en el reactor biológico.	8
4	Fraccionamiento del agua residual.....	17
5	Relación entre temperatura y actividad biológica.....	19
6	Presencia relativa de microorganismos según la edad del lodo biológico.....	23
7	Proceso de un sistema de Fangos Activados.....	26
8	Patologías frecuentes en sistemas de lodos activados.....	27

9	Esquema del movimiento de los soportes en un reactor MBBR en condiciones aerobias, anóxicas o anaerobias.....	28
10	Diagrama de flujo para un reactor MBBR de una sola etapa.....	31
11	Hoja de cálculos en Excel para MBBR.....	32
12	Tamaño de burbujas según tipo de difusor.....	33
13	Ubicación geográfica de Alimentos Polar Comercial – “Planta Salsas y Untables”.....	55
14	Tanquilla principal de planta de tratamiento.....	61
15	Raspanatas de planta de tratamiento.....	62
16	Tanques Homogenizadores de planta de tratamiento.....	63
17	Tanque de Mezcla Rápida y Tanque de Mezcla Lenta.....	64
18	Unidad DAF n. 1.....	65
19	Reactor Biológico de planta de tratamiento.....	65
20	Unidad DAF n. 2.....	66
21	Mapa Hidrográfico del Lago de Valencia.....	67
22	Diagrama de Flujo de pretratamiento y tratamiento primario.....	68
23	Diagrama de Flujo de tratamiento secundario.....	69
24	Diagrama esquemático de reactor biológico.....	70
25	Diagrama esquemático de DAF II.....	71
26	Resultados de la lista de observación.....	75
27	Diagrama Causa-Efecto Limitación en la capacidad del tratamiento biológico..	85
28	MBR con membrana sumergida.....	87
29	Elementos típicos de un MBBR aeróbico.....	88
30	Filtro horizontal cilíndrico para MBBR aerobio.....	92
31	Filtro vertical para MBBR anaeróbico.....	93
32	Difusores de burbuja fina actuales.....	95
33	Ejemplo de difusor de burbuja gruesa de acero inoxidable.....	95
34	Sistema de lodos activados vs. Sistema MBBR.....	97
35	Herramienta Biologyx para PTAR SyU.....	99
36	Modelos estándar de biosoportes.....	101
37	Ficha técnica de medio de soporte EVEE675.....	102
38	Hoja de cálculos parámetros MBBR.....	103

39	Hoja de entrada de datos para el requerimiento de aire en reactor MBBR.....	104
40	Resultados de requerimiento de aire en reactor MBBR.....	105
41	Diseño de difusor de burbuja gruesa para reactor piloto MBBR.....	106
42	Área activa de difusor diseñado.....	107
43	Diagrama de flujo de proceso (DFP) del reactor piloto MBBR.....	108
44	Cursograma analítico de proceso de alimentación por batch.....	111
45	Características de reactor piloto MBBR con alimentación por batch.....	113
46	Gráfica de serie de tiempo prueba piloto MBBR con alimentación por batch...	114
47	Características de reactor piloto MBBR con alimentación continua.....	115
48	Gráfica de serie de tiempo prueba piloto MBBR con alimentación continua....	118
49	Determinación de valores atípicos recolectados en la prueba.....	119
50	Prueba de normalidad aplicada a la data depurada.....	120
51	Imágenes representativas de flóculo formado capturadas en el microscopio....	122
52	Imágenes representativas de microorganismos presentes en el reactor piloto MBBR.....	123
53	Gráfica de línea ajustada SARR/SALR.....	125
54	Porcentaje de relleno de biosoportes como variable del parámetro SALR.....	127
55	Modelo matemático de programación no lineal – SALR.....	128
56	Peso de Biosoportes vs. Días de Prueba.....	129
57	Gráfica de modelo evolución de biopelícula en soportes.....	130
58	Valor máximo para el peso de biosoportes según modelo matemático.....	131
59	Peso para comenzar a ganar eficiencia superior al 70%.....	131
60	Modelo regulación de biosoporte – intervalo $53 \leq t \leq 81$	132
61	Modelo regulación de biosoporte – intervalo $81 < t \leq 114$	133
62	Modelo regulación de biosoporte – intervalo $114 < t \leq 158$	133
63	Adyacencias de APC – SyU.....	140
64	Mix de productos proporcionado por la empresa para evaluar el costo de oportunidad.....	145



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA MBBR COMO ALTERNATIVA DE
AMPLIACIÓN DE LA CAPACIDAD DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO
BIOLÓGICO EN ALIMENTOS POLAR COMERCIAL C.A.**

Autor: Cerezo, Isis

Tutor Académico: Ing. Viky Mujica

Fecha: junio 2023

RESUMEN INFORMATIVO

La presente investigación se desarrolló en la empresa Alimentos Polar Comercial – “Planta Salsas y Untables”, ubicada en la Urbanización Industrial Municipal en la ciudad de Valencia, estado Carabobo. Se trata de una de las compañías pertenecientes al conglomerado Empresas Polar, encargada de la fabricación de productos como salsas de tomate, queso fundido, mayonesa, vinagre y margarina a nivel nacional con los mejores estándares de calidad para satisfacer al consumidor venezolano. Actualmente, existe la necesidad de ampliar la capacidad del sistema de tratamiento biológico dentro de su planta de tratamiento de aguas residuales, debido a que este no es capaz de asimilar los residuos que serán generados al aumentar la producción como respuesta a la demanda del mercado, de mantenerse de esta forma, la utilidad esperada no será percibida, generando un costo de oportunidad, así como el riesgo de contaminar las aguas de la cuenca endorreica Lago de Valencia. Por todo lo anterior, el objetivo de este trabajo de grado fue evaluar la aplicación de la tecnología MBBR como alternativa para ampliar la capacidad del sistema biológico actual sin mayores modificaciones estructurales. La investigación requirió el seguimiento diario de parámetros críticos de calidad desde el 28 de noviembre del 2022 hasta el 12 de mayo del 2023, totalizando 165 días de estudio. Como resultado, se obtuvo una base de datos confiable que respalda la aplicabilidad de la tecnología en el sistema biológico de Alimentos Polar – “Planta Salsas y Untables”, garantizando una eficiencia superior al 70%. El estudio estuvo enmarcado dentro de la modalidad de un proyecto factible, siguiendo la línea de investigación Ciencias Cognitivas y Aplicadas, con un diseño de investigación experimental, fueron utilizadas técnicas de recolección de datos como la observación directa, entrevista estructurada, revisión documental y bibliográfica.

Descriptores: Tratamiento de Aguas Residuales Industriales, Tratamiento Biológico, MBBR, Modelo Matemático, Análisis Estadístico, Reactor Piloto.



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA MBBR COMO ALTERNATIVA DE
AMPLIACIÓN DE LA CAPACIDAD DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO
BIOLÓGICO EN ALIMENTOS POLAR COMERCIAL C.A.**

Autor: Cerezo, Isis

Tutor Académico: Ing. Viky Mujica

Fecha: junio 2023

ABSTRACT

The present investigation was developed in the company Alimentos Polar Comercial - "Planta Salsas y Untables", located in the Municipal Industrial Urbanization in the city of Valencia, Carabobo state. It is one of the companies from the Empresas Polar conglomerate, in charge of manufacturing products such as tomato sauces, processed cheese, mayonnaise, vinegar and margarine nationwide with the best quality standards to satisfy the Venezuelan consumer. Currently, there is a need to expand the capacity of the biological treatment system within its wastewater treatment plant because it is not capable of assimilating the organic load that will be generated by increasing production in response to market demand. If it is maintained in this way, the expected utility will not be perceived, generating an opportunity cost, as well as the risk of contaminating the waters of the endorheic Lago de Valencia basin. Due to all the above, the objective of this study was to evaluate the application of MBBR technology as an alternative to expand the capacity of the current biological system without major structural modifications. The research required daily monitoring of critical quality parameters from November 28, 2022, to May 12, 2023, totaling 165 days of investigation. The results obtained from analysing the collected data prove the technology is perfectly applicable to the biological system from the wastewater treatment plant at Alimentos Polar – “Planta Salsas y Untables”, assuring an average efficiency of 70%. The study was framed within the modality of a feasible project, following the Cognitive and Applied Sciences research line, with an experimental research design. Data collection techniques such as direct observation, structured interview, documentary, and bibliographic review were used.

Descriptors: Industrial Wastewater Treatment, Biological Treatment, MBBR, Mathematical Model, Statistical Analysis, Pilot Reactor.

INTRODUCCIÓN

Los objetivos del tratamiento biológico son: eliminar la materia orgánica en suspensión, reducir la materia orgánica biodegradable y eliminar los organismos patógenos (Metcalf y Eddy, 1995). La necesidad por el desarrollo sostenible y el constante avance de la tecnología compelen a la búsqueda de mejoras en la efectividad de los tratamientos para aguas aplicados. Los esfuerzos para la conservación del recurso hídrico son presentados a las comunidades mediante normativas y legislaciones, en particular, en Venezuela la normativa ambiental referente a vertidos de aguas residuales exige el cumplimiento de parámetros críticos según las características del cuerpo acuífero destinado para su descarga.

La empresa venezolana Alimentos Polar Comercial C.A. – “Planta Salsas y Untables”, ubicada en Valencia, Carabobo, Venezuela, se encarga de producir seis (6) productos diferentes: mayonesa, margarina, salsas de tomate, vinagre, queso fundido y mermelada. Los efluentes generados por las áreas productivas son dirigidos a la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), estos cuentan con características extremadamente variables según qué productos se estén manufacturando. Una vez en la PTAR, el agua residual pasa por procesos físicos y químicos hasta llegar al tratamiento biológico, en esta última etapa el agua es introducida en un tanque de aireación, el cual cuenta con microorganismos encargados de remover la carga orgánica presente. Como resultado de su digestión se generan flóculos de biomasa denominados “lodo biológico”. Una combinación de lodo biológico y efluente tratado pasa a la unidad de flotación por aire disuelto (DAF), donde es separada la fracción líquida de las partículas sólidas, parte del lodo removido es recirculado al reactor biológico y otra fracción es purgada del sistema.

Actualmente, la empresa cuenta con una capacidad instalada de 18.000 TN/mes en combinación de su maquinaria para el total de productos, sin embargo, la utilización de estos equipos está limitada por la habilidad del sistema biológico de asimilar los afluentes. De manera específica, al aumentar la carga orgánica será producida una mayor cantidad de sólidos dirigida a la unidad DAF, dificultando la remoción de lodos superficiales. Lo anterior implica el riesgo de entregar efluente con carga orgánica a la canal municipal, que posteriormente confluye hasta la cuenca del Lago de Valencia.

La presente investigación pretende evaluar a la tecnología MBBR o, biorreactor de lecho

móvil, como una alternativa para ampliar la capacidad del sistema de tratamiento biológico de la planta de tratamiento de aguas residuales de Alimentos Polar Comercial C.A. – “Planta Salsas y Untables”, de modo que pueda hacer uso de la totalidad de su capacidad instalada. En este sentido, el estudio fue estructurado de la siguiente forma:

En el Capítulo I, El Problema, donde inicialmente se expuso el problema que se estudió y la forma en que éste se presentaba, se describió la formulación del problema, así como también el objetivo general y los objetivos específicos para su resolución. De igual forma, se presenta la justificación, alcance y limitaciones de la investigación.

En el Capítulo II, Marco Teórico, se desarrollaron los antecedentes bibliográficos y avances que se presentan sobre el tema. También, contiene los fundamentos teóricos y legales con los cuales el investigador sustenta su investigación. Además, se definieron términos característicos que guardan relación directa con el tema estudiado.

En el Capítulo III, Marco Metodológico, se delimitó el diseño metodológico, donde se puntualizó el tipo, nivel y diseño de la investigación, se caracterizó la población y la muestra, asimismo se describieron las técnicas empleadas para la recolección de información tales como: observación directa, entrevistas y revisión documental. Como también, las técnicas de análisis y procesamiento de datos, que finalmente requiere de la validación de los instrumentos aplicados en la investigación, además fueron descritas las fases metodológicas para el desarrollo del estudio.

Por último, en el Capítulo IV, Resultados, se recopila el desarrollo de las fases metodológicas con los hallazgos encontradas con cada una de ellas, permitiendo al lector realizar el seguimiento de la investigación realizada.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

Este capítulo pretende dar a conocer la situación objeto de estudio en Alimentos Polar Comercial C.A. – “Planta Salsas y Untables”, a través de ubicarla en una perspectiva general para luego, delimitarla y definir sus causas como también sus posibles consecuencias. Así mismo, son descritos el objetivo general y los objetivos específicos de la investigación, la justificación basada en la importancia que presenta en términos ambientales y en la mejora de procesos de la organización, y, para concluir, se plantea la viabilidad del estudio según su alcance y limitaciones.

1.1 Planteamiento del problema.

El desarrollo de la vida en las comunidades es responsable por la generación constante de residuos que al ser liberados resultan perjudiciales para el medio ambiente, la parte líquida de estos se denomina aguas residuales y puede provenir de residencias, comercios o establecimientos industriales. El autor Picazo (1995), explica que la preocupación por la degradación de los recursos hídricos es justificada, pues ocasiona graves consecuencias como reducción de la calidad del agua, limita su abastecimiento, e incide sobre la fauna y flora que albergan los ecosistemas acuáticos, y sobre la salud humana.

Específicamente, el vertimiento del recurso contaminado amenaza la conservación de los ecosistemas debido al crecimiento de algas nocivas para la vida marina, como también colabora a la propagación de patologías provocadas por los microorganismos presentes en él, como la diarrea, la cólera, la disentería, la fiebre tifoidea, entre otras. La Organización Mundial de la Salud (2022), dio a conocer que en el mundo hay 2000 millones de personas que consumen agua contaminada, causando 485.000 muertes cada año.

De esta manera, se introduce el concepto de tratamiento de aguas residuales, según la Oficina de Información Científica y Tecnológica de México (2019) afirman que “es un proceso que limpia y permite la reincorporación del agua a los mantos acuíferos o a los sistemas de agua potable” (p. 8). Entonces, se refiere a la curación del líquido en búsqueda de que alcance un nivel de contaminación de confianza para su reutilización o descarga al medio ambiente. Las operaciones aplicadas en las plantas de tratamiento de aguas residuales dependerán de las características del efluente: según su potencial de hidrógeno, al considerar su alcalinidad y acidez, según la demanda

biológica de oxígeno para descomponer la materia orgánica presente y según los nutrientes disueltos que contenga como fósforo y nitrógeno, entre otros.

Se cuentan con distintos procesos importantes para el saneamiento del agua divididos en etapas, a grandes rasgos se identifican los siguientes: los tratamientos primarios, consisten en la reducción de sólidos suspendidos mediante medios mecánicos, entre ellos se encuentran las trampas de grasa, tanques desarenadores, equipos de flotación de aire disuelto y más, ellos están apoyados por la aplicación de químicos para la agrupación de las partículas, mientras que los secundarios, se encargan de disminuir la materia orgánica presente en el líquido a través de microorganismos capaces de consumir y transformar la materia orgánica en biomasa. Si bien el objetivo de la depuración de aguas domésticas e industriales utilizadas es el mismo, los métodos aplicados para el tratamiento de efluentes industriales suelen ser superiores en dificultad, debido a la variabilidad de las características fisicoquímicas del líquido a partir de los procesos que se realicen con ellos.

Así mismo, el tratamiento empleado dependerá de las legislaciones regentes en el estado, los países han originado normativas con intención de garantizar el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales. En el caso de Venezuela, el estado se ha encargado de establecer una serie de leyes, en vista de la preocupación en relación con el deterioro ambiental y la seguridad de las futuras generaciones. Estas leyes están respaldadas con acciones en caso de ser incumplidas; el daño causado será evaluado objetivamente en los aspectos técnicos, económicos, jurídicos, socioculturales y ecológicos a fin de conocer su valor real. El asumir la responsabilidad no aborda únicamente el pago de sanciones, sino que incluye la corrección de las actividades negativas realizadas o la detención de estas por completo, por lo que acarrea pérdidas a desarrollar en el tiempo.

Entre las revisiones realizadas por el estado para determinar cuerpos de agua prioritarios en necesidad de control y manejo, surge la cuenca del lago de Valencia. Se trata de una cuenca endorreica, es decir, su nivel disminuye únicamente por infiltración o evaporación, por lo cual tiende a acumular contaminantes orgánicos, microbianos, tóxicos, o sólidos. Su crecimiento y nivel de contaminación están alterados como consecuencia a la industrialización de las ciudades de Maracay y Valencia. El decreto N° 3.219, expone como objetivo conseguir un lago más oxigenado a través de la definición de parámetros claves para su conservación.

La empresa venezolana: Alimentos Polar Comercial C.A. – “Planta Salsas y Untables”, se encuentra en la zona industrial municipal de la ciudad de Valencia, Estado Carabobo. La organización está encargada de fabricar seis (6) productos alimenticios: mayonesa, margarina, salsas de tomate, vinagre, queso fundido y mermelada, contribuyendo a la calidad vida de los venezolanos a través de una excelente relación precio-valor. El recurso hídrico está presente en la producción de estos productos como insumo para la fabricación y para realizar labores de limpieza en las maquinarias, generando residuos que son dirigidos a su planta de tratamiento de aguas residuales industriales.

Las características del efluente generado dependerán de las áreas productivas que estén operativas. En el caso de la margarina, los residuos son ricos en grasas libres, mientras que los obtenidos en la fabricación de mayonesa, queso fundido y salsas de tomate, contienen abundantes grasas emulsionadas. Los residuos emergentes de la fabricación del vinagre tienen una alta carga orgánica soluble y requieren grandes cantidades de oxígeno para descomponer la materia orgánica presente. Es importante destacar, la mayonesa y las salsas de tomate cuentan con vinagre en su formulación, por lo que aportan una considerable carga orgánica que debe ser tratada por el sistema biológico. Por lo tanto, el tratamiento seleccionado debe ser capaz de ajustarse a las variaciones provocadas por cambios dados en producción.

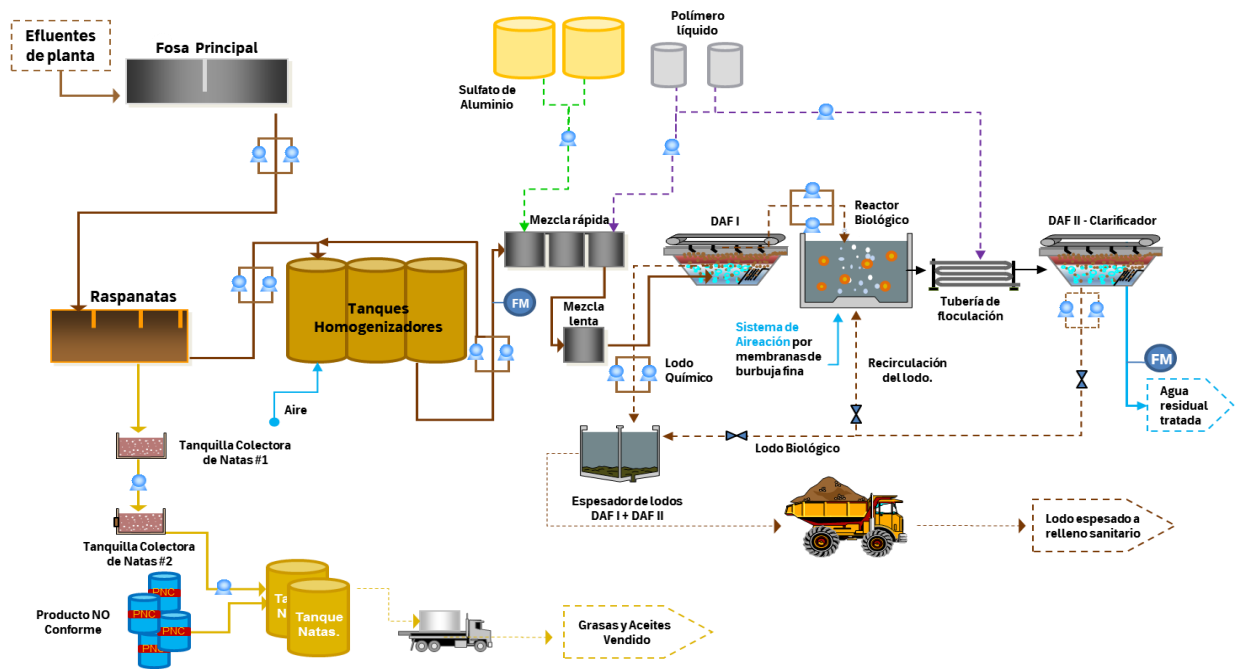


Figura 1. Descripción gráfica del tratamiento de aguas residuales industriales aplicado en Alimentos Polar Comercial C.A. – “Planta Salsas y Untables”.

Fuente: Alimentos Polar Comercial C.A., Planta Salsas y Untables (2022).

En la figura 1, se observa la descripción gráfica del tratamiento aplicado a los residuos líquidos industriales. Empezando el proceso, el área encargada de procesar la margarina cuenta con su propia fosa de captación, mientras que, las encargadas de producir vinagre, salsas de tomate, mayonesa y queso fundido, tienen una fosa de captación compartida. Ambas confluyen a una general, la cual está encargada de bombear los efluentes recolectados hasta la planta de tratamiento de aguas residuales.

Seguidamente, son separadas las grasas libres de la fase líquida en el separador primario, este cuenta con un movimiento mecánico que le permite raspar los sólidos de la superficie. Las grasas recolectadas son despachadas a la tanquilla recolectora de natas, luego son agrupadas en contenedores y enviados para su comercialización. Después de esto, la fracción líquida pasa a los tanques homogenizadores, con la intención de amortiguar las variaciones de los efluentes a favor de la fluidez del tratamiento.

Luego, empieza el tratamiento físico-químico, donde son adicionados coagulante y floculante, siendo estos sulfato de aluminio y polímero líquido, respectivamente. Tan pronto como son agregados, ocurre la agrupación de los sólidos suspendidos en el medio hídrico, mantenidos en suspensión en un tanque de mezcla lenta. Continuando, se alcanza la unidad de flotación por aire disuelto (DAF), gracias a la fuerza ascensional que experimentan las burbujas fijas adheridas a las partículas, los sólidos agrupados suben hasta la superficie del líquido, una vez las partículas están en la parte superior, son barridas con un rascado superficial.

Entonces, el agua obtenida tiene una apariencia clarificada, sin embargo, su concentración de carga orgánica es alta, por lo que se requiere un segundo tratamiento. En esta etapa se llega al sistema biológico, compuesto por un reactor biológico, en donde se encuentran bacterias aireadas por medio de sopladores y un segundo sistema de flotación por aire disuelto. Por la naturaleza del reactor biológico, las bacterias presentes se encargan de consumir la carga orgánica recibida, a través de su proceso metabólico estos microorganismos generan biomasa, es decir, conforman flóculos de materia inerte y población bacteriana, también denominado lodo biológico. Este lodo pasará al sistema de flotación por aire disuelto y será removido de la superficie mediante un mecanismo de raspado, con ayuda de polímero líquido para facilitar la agrupación de los flóculos formados. Una fracción del lodo biológico es expulsado del sistema al ser enviado al espesador de lodos, mientras que la otra fracción es recirculada al reactor biológico.

Finalmente, el agua tratada es descargada a la canal municipal, conduciendo hasta la cuenca del Lago de Valencia, por lo tanto, la composición fisicoquímica de los afluentes debe cumplir con lo dispuesto en el decreto N° 3.219. En la figura 2 se muestra el aspecto del agua residual en cada etapa, así como su concentración de carga orgánica medida en mgDQO/L según los datos revisados de un día de muestreo.

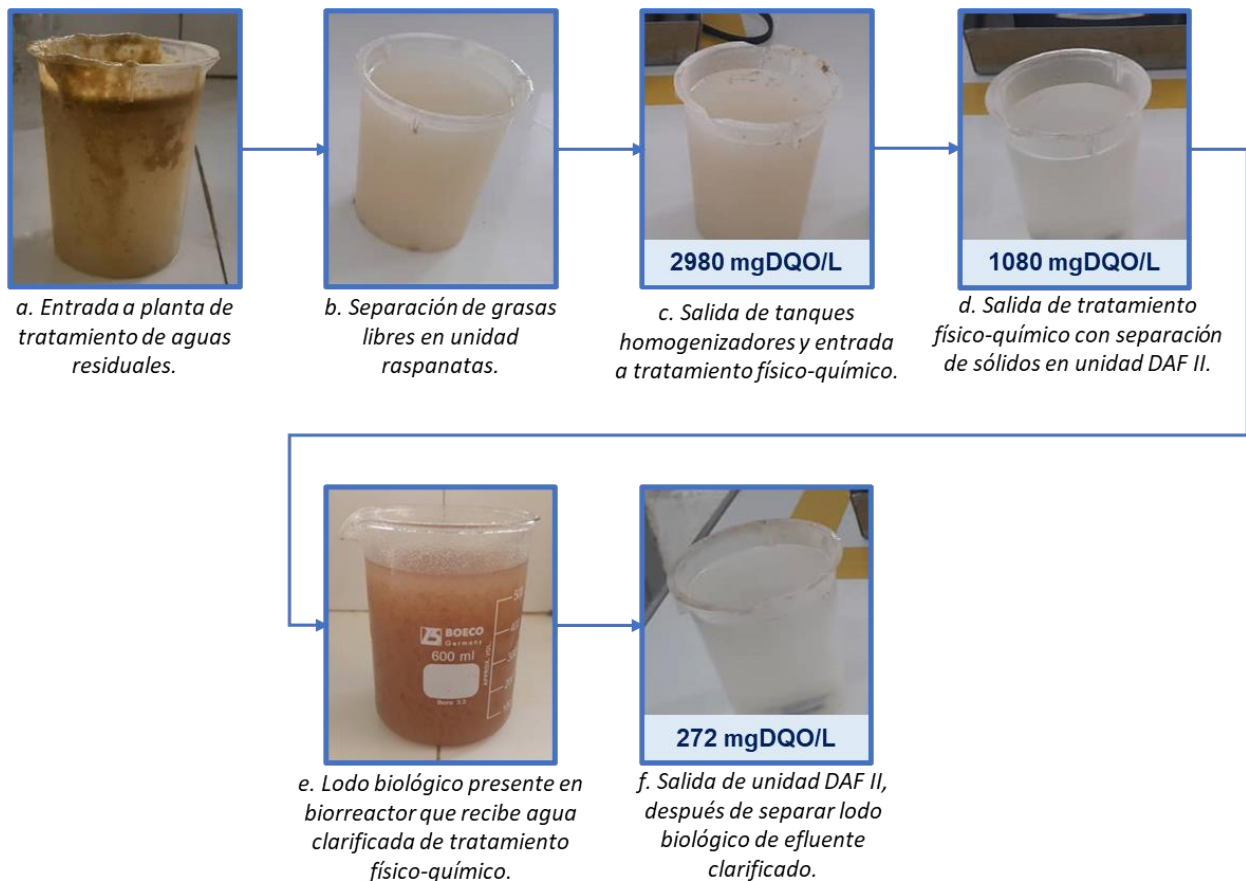


Figura 2. Características del agua residual a través de los procesos de tratamiento.

Fuente: Cerezo, 2023.

Actualmente, la empresa tiene la capacidad instalada para la fabricación de un máximo de 18.000 TON/mes de su familia de productos. Sin embargo, existe una limitación para el aprovechamiento de estos equipos, debido a que, el proceso de tratamiento de aguas residuales explicado no es capaz de ajustarse a los efluentes que se generarían al aumentar la producción. La razón principal para esta restricción es la deficiencia del sistema biológico para asimilar la cantidad de demanda química de oxígeno que estaría presente.

Hoy en día, los operadores del área experimentan descompensaciones de los equipos que forman parte del sistema biológico al variar el volumen promedio de agua recibido y las concentraciones de carga orgánica usuales, provocando sobrecarga de lodos. Ante estos eventos, se realizan acciones para contener los lodos biológicos en el reactor. En la figura 3, a la izquierda se aprecia el reactor biológico en condiciones normales de trabajo y, a la derecha, se muestra el reactor biológico sin suministro de aire. La ausencia de aireación es empleada para permitir decantar a los lodos biológicos, y otorgar un tiempo de recuperación al barrido en la unidad DAF, donde sólo recibirá agua clarificada por un tiempo a criterio del operador. No obstante, al tratarse de un reactor biológico aerobio, esta acción es perjudicial para la preservación de los microorganismos, afectando su supervivencia y eficiencia de degradación posteriormente.



Figura 3. Ejemplo de acción para contener lodos en el reactor biológico.

Fuente: Cerezo, 2023.

En ese mismo sentido, al elevarse la producción, aumentará proporcionalmente el oxígeno requerido para degradar la carga orgánica soluble en el residuo líquido, así como aumentará la cantidad de agua recibida en la planta de tratamiento y, en consecuencia, se necesitará una mayor concentración de lodos biológicos para entregar un efluente dentro de los parámetros normativos. En el caso de que la carga másica de sólidos suspendidos supere la capacidad total de la unidad DAF, no se podrá lograr la separación efectiva entre la fracción sólida y líquida del efluente, lo que afectaría directamente la calidad del agua tratada en la última etapa del tratamiento.

Las consecuencias de la fuga de lodos acarrearán colaborar a la degradación de la cuenca del Lago de Valencia, al promover el crecimiento de algas consumidoras de oxígeno disuelto, provocando la anoxia dentro del espacio y así, la reducción de la flora y fauna que habitan la zona. Además, la legislación venezolana ha establecido no sólo sanciones económicas, sino también sanciones administrativas como ocupación temporal, total o parcial de las fuentes contaminantes,

clausura temporal o definitiva de las fábricas, prohibición temporal o definitiva de la actividad origen de la contaminación, entre otras medidas con el propósito de reparar los daños causados y evitar la continuación de los actos perjudiciales para el medio ambiente. Añadido a esto, existe el riesgo de afectar la imagen de la empresa por incumplimiento de las leyes, en términos de su relación con su ambiente externo, como proveedores, consumidores e incluso competencia.

Tomando en cuenta las condiciones anteriores, la organización estableció que la carga orgánica permisible en el sistema biológico tiene un tope de 740 Kg DQO/d, precisando de una vez que, solo se podrán tratar las aguas residuales generadas en la fabricación de 11.500 TON/mes. Según se ha visto, esto conlleva a una pérdida de oportunidad en un mercado competitivo, en el que los beneficios dados al cubrir la demanda insatisfecha dejan de percibirse.

En consideración de las causas y consecuencias de la problemática planteada, surge la necesidad de ampliar la capacidad del sistema de tratamiento biológico de la PTAR en Alimentos Polar Comercial –“Planta Salsas y Untables”, con la intención principal de alcanzar una mejora en el aprovechamiento de la capacidad instalada en el área productiva y, además, promover la conservación del medio ambiente.

1.2 Formulación del problema.

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, se plantea: ¿Qué tan eficiente es la tecnología MBBR como alternativa para ampliar la capacidad del sistema de tratamiento biológico en la planta de tratamiento de aguas residuales de Alimentos Polar Comercial C.A. – “Planta Salsas y Untables”?

1.3 Objetivos de la investigación.

1.3.1 Objetivo general.

Evaluar la aplicación de la tecnología MBBR como alternativa de ampliación de la capacidad del sistema de tratamiento biológico de la planta de tratamiento de aguas residuales de Alimentos Polar Comercial C.A. – “Planta Salsas y Untables”.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Diagnosticar la situación actual en el sistema de tratamiento biológico, con el fin de determinar las condiciones operacionales del mismo.
- Analizar las oportunidades de mejora encontradas en el sistema de tratamiento biológico.
- Diseñar un reactor biológico piloto a escala que simule las condiciones reales de los efluentes de la planta con tecnología MBBR.

- Evaluar la propuesta a través del desempeño de la tecnología.
- Determinar la factibilidad operativa, técnica, ambiental, social y económica de la propuesta.

1.4 Justificación de la investigación.

La presente investigación se sustenta en evaluar la aplicación de la tecnología MBBR como alternativa para elevar la capacidad del tratamiento biológico en la Alimentos Polar Comercial C.A. – “Planta Salsas y Untables”, como respuesta a la restricción que el sistema actual ha generado respecto al aprovechamiento de los recursos instalados para la producción. Si la situación persiste, conlleva a un costo de oportunidad, al no percibir la utilidad que podría ser obtenida a partir de las ventas. Además, en caso de que las medidas de control no sean efectivas, las sanciones por un efluente con parámetros fuera de norma son tanto económicas, como administrativas, a la vez que perjudican la imagen de la empresa.

Por otro lado, se justifica el estudio desde el ámbito de desarrollo sostenible, al reconocer el daño que vertimientos residuales sin previo tratamiento provocan en el ambiente. Alimentos Polar Comercial C.A. – “Planta Salsas y Untables” está comprometida con minimizar (y eliminar) los efectos adversos de sus operaciones para el medio ambiente, considera fundamental la mejora continua, la capacitación del personal y el responder por sus acciones, es así como la empresa constantemente se involucra en la búsqueda de nuevas alternativas para tener un proceso más limpio y priorizar su responsabilidad social empresarial.

Asimismo, desde el punto de vista de innovación y desarrollo tecnológico, no se tienen registros de tecnología MBBR aplicada en Venezuela, contando con pocos casos en el resto de Latinoamérica. Este trabajo de grado propone conocer cómo funciona esta tecnología, a través de entender su comportamiento frente a efluentes variables y determinar qué tan eficiente es de caras al tratamiento biológico, con la intención de promover futuras investigaciones y servir de sustento a próximos proyectos relacionados a esta tecnología.

Seguidamente, al autor le permite obtener experiencia al momento de aplicar las técnicas industriales aprendidas durante los estudios de la carrera de Ingeniería Industrial, al igual que el desenvolvimiento en la resolución de problemas que se presenten a la hora de aplicar dichas técnicas. De forma particular, este trabajo se atreve a indagar en la adaptabilidad de la Investigación de Operaciones para ofrecer soluciones que permitan tomar mejores decisiones, no sólo en ámbitos de costos o distribución de recursos, sino también experimentales. De la misma

manera, se da la oportunidad de explorar la versatilidad del Ingeniero Industrial, como un profesional con conocimientos integrales, capaz de involucrarse y colaborar a la mejora de las diferentes áreas de una empresa. Respecto a la Universidad José Antonio Páez, tomaría un mayor grado de prestigio dando resultado a dicha problemática planteado en este trabajo de investigación por estudiantes egresados de su casa de estudios.

Finalmente, se desea aclarar que el presente estudio se inserta en la línea de investigación de Ciencias Cognitivas y Aplicadas. Por ello, se aportará el conocimiento teórico adquirido de los diferentes temas durante la carrera y el obtenido a partir de la práctica en los procesos de tratamiento de aguas residuales, para brindar información técnica-operativa suficiente que le permita a la Alta Dirección de la empresa evaluar los resultados obtenidos.

1.5 Alcance y limitaciones de la investigación.

El desarrollo de la investigación se llevará a cabo en la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa Alimentos Polar Comercial C.A. – “Planta Salsas y Untables”, ubicada en Valencia, Carabobo, Venezuela, a fin de evaluar la tecnología MBBR como alternativa para ampliar la capacidad del sistema biológico, a través del diseño e instalación de un reactor piloto a escala, que reflejará las condiciones dadas en el reactor biológico propio de la planta de tratamiento estudiada. Todo ello, con la intención de comprobar si la propuesta es conveniente para la mejora del proceso, en términos de garantizar el cumplimiento de la legislación venezolana que rige las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua, a la vez que priorizar el aprovechamiento de los recursos instalados en producción.

No obstante, no se considera la implementación de la tecnología en el reactor biológico real. Se establece como límite determinar la eficiencia de la tecnología MBBR para la degradación de la materia orgánica presente en el efluente con características variables de la planta de tratamiento de aguas residuales de Alimentos Polar Comercial C.A. – “Planta Salsas y Untables”, quedando en manos de la compañía la decisión de poner en marcha esta propuesta.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Según Arias (2012), el Marco Teórico “es el producto de la revisión documental–bibliográfica, y consiste en una recopilación de ideas, posturas de autores, conceptos y definiciones, que sirven de base a la investigación por realizar.” (p. 78). Se tiene entonces, que es indispensable utilizar bases y fuentes teóricas confiables y avaladas por el método científico, con la finalidad de entender todos los procesos esenciales que forman parte del trabajo de investigación y de esta forma alcanzar soluciones apropiadas para el problema planteado.

De esta manera, el presente capítulo comprende un grupo de teorías y proposiciones previamente establecidas que ofrecen un fundamento para abordar la problemática planteada.

2.1 Antecedentes de la investigación.

A continuación, se revisan pasados trabajos de grado e investigaciones científicas que guardan relación directa o indirecta con la situación estudiada, con el propósito de conocer los avances actuales en el ámbito local, nacional e internacional, al igual que identificar situaciones similares que puedan utilizarse como referencia y que servirán como punto de apoyo para el desarrollo del tema y, a su vez, serán útiles para la extracción de aspectos fundamentales inherentes a la investigación, los cuales son:

Castellanos (2021), realizó una investigación que llevaba por título **“Planta de Tratamiento para el Manejo Adecuado de los Desechos Sólidos generados en la empresa Granja El Cedro JGC, C.A.”** Presentado para optar por el título de Ingeniero Industrial en la Universidad “José Antonio Páez” (UJAP), ubicada en San Diego, Carabobo, Venezuela. El objeto de estudio estuvo enfocado en diseñar una planta de tratamiento que permita disminuir el impacto ambiental generado por los residuos sólidos obtenidos en la empresa Granja El Cedro JGC, C.A., al igual que aprovechar la oportunidad de agronegocio que existe al transformar los desechos en compost, y así añadirle un valor comercial a beneficio de la organización. Presentándose una investigación de tipo proyecto factible, elaborado bajo un enfoque mixto, con un nivel de investigación descriptivo.

Con base en ello, se utilizaron técnicas de recolección de datos, revisión documental, observación directa, y entrevistas para determinar los requerimientos técnicos y operativos de

diseño de una planta de compostaje para la empresa de estudio. Los datos analizados demostraron que la compañía no poseía un sistema de gestión ambiental, donde la disposición final de los desechos sólidos era desconocida, estos sin recibir algún tipo de tratamiento capaz de mitigar su posible impacto en las aguas y suelos. El aporte de esta investigación es una solución para una problemática ambiental, que fortalece el compromiso de la organización con su responsabilidad social empresarial y, además pretende generar una utilidad a través de la comercialización de sacos de compostaje.

En relación con el presente trabajo, las herramientas aplicadas por el autor para determinar la factibilidad económica, técnica y operativa, como también el establecimiento de los requerimientos organizacionales, ambientales y de seguridad industrial para el desarrollo de la propuesta, son tomadas como ejemplo en la formulación de soluciones ante la problemática planteada.

Seguidamente, se presenta la investigación realizada por González y Ojeda (2019), titulada **“Estrategias del Uso de Lodo Residual como Materia Prima en Smurfit Kappa Cartón De Venezuela S.A.”** para optar al título de Ingeniero Industrial en la Universidad “José Antonio Páez”, (UJAP) ubicada en San Diego, Carabobo, Venezuela. Se trató de un proyecto factible, con un diseño de campo apoyado en una investigación documental, tuvo como objetivo principal proponer distintas estrategias que permitieran utilizar el lodo residual generado en la organización como materia prima con ayuda de herramientas de la Ingeniería Industrial, la investigación fue justificada por los costos que acarreaba el traslado del residuo, al igual que las consecuencias ambientales provenientes por la saturación con desechos almacenados de los vertederos del estado Carabobo.

Con el propósito de introducir el lodo residual como materia prima, fue necesario revisar el proceso, conocer las variables que intervienen en él, al igual que las condiciones actuales del sistema. A partir del análisis, se lograron proponer estrategias para la reutilización del residuo, la factibilidad de la implementación fue evaluada a través de la relación beneficio-costos, obteniendo resultados positivos. Como conclusión del estudio, se logró diseñar una estrategia altamente factible para la recuperación del lodo generado en la planta de tratamiento, con la finalidad de disminuir los costos asociados, mitigar el impacto ambiental generado en los vertederos municipales debido al volumen de lodo dispuesto, teniendo como prioridad mejorar el proceso y aprovechar los recursos disponibles, todo esto, mediante una propuesta con modificaciones de bajo

impacto en el proceso de tratamiento del lodo.

Es preciso señalar que, este trabajo investigativo colabora como guía a la investigación presente al ser un ejemplo detallado de los análisis a realizar, ya que se deben definir las oportunidades como también las modificaciones necesarias en el sistema biológico de la PTAR de Alimentos Polar Comercial – “Planta Salsas y Untables” para implementar la tecnología MBBR.

Continuando con estudios realizados alrededor de la tecnología MBBR, Fuentes e Ingrid (2019) presentaron una investigación titulada **“Evaluación de la influencia de la proporción de llenado de un biorreactor de lecho móvil con biopelícula (MBBR) utilizando *saccharomyces cerevisiae* para la biodepuración de colorante en efluentes textiles”**. Presentado para optar por el título de Ingeniera Biotecnóloga en la Universidad Católica de Santa María, ubicada en Arequipa, Perú. El objeto de estudio estuvo enfocado en analizar cómo afectaba el porcentaje de llenado de biocarriers al tratamiento aplicado en aguas residuales de la industria textil. Presentándose una investigación del tipo experimental, utilizando un alcance correlacional, donde se espera establecer una relación estadística entre la proporción de soportes dentro de tres reactores biológicos (60%, 40% y 20%, respectivamente) y la calidad del efluente textil.

Los datos recolectados demostraron que la densidad de biomasa formada fue mayor en el biorreactor con mayor porcentaje de soportes, mientras que los resultados iban disminuyendo proporcionalmente con la cantidad de soportes empleados. Es decir, cuanto más biocarriers existan dentro del reactor, habrá más superficie que pueda ser colonizada por los microorganismos presentes en el afluente y, por lo tanto, mayor cantidad de biomasa.

Ahora bien, la calidad de efluente obtenido del tratamiento se evaluó mediante la concentración de demanda química de oxígeno (DQO). Luego de realizar un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia del 0.05 se obtuvo que, para las distintas proporciones de llenado comparadas, la diferencia en remoción de contaminación del agua no es significativa, específicamente los porcentajes conseguidos fueron de 59.73% para el 20% de llenado, 72,21% para el 40% de llenado y 68,21% para el 60% de llenado. Con referencia al presente trabajo especial de grado, son considerados los parámetros aplicados para el diseño de los reactores, la metodología estadística implementada y las conclusiones alcanzadas del experimento.

Por su parte, Sanabria y Pacheco (2019) desarrollaron un trabajo de grado titulado **“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”**, para optar al

título de Ingeniero Ambiental y Sanitario en la Universidad de La Salle, ubicada en Bogotá, Colombia. Esta investigación fue calificada como experimental, donde se analizaron diferentes variables en un lapso de 3 meses. El estudio pretende evaluar el comportamiento de un reactor biológico de lecho móvil de cargas secuenciales (SBMBBR) a escala, donde se encargaron de diseñar una unidad piloto para analizar los parámetros fisicoquímicos relacionados con la degradación de materia orgánica y el crecimiento de la biomasa en los soportes.

En el estudio, establecen los cálculos para el diseño de un reactor MBBR, en particular, el parámetro de diseño clave para dimensionar el tanque es la tasa de carga del área superficial (SALR o SCLR), el cual cuenta con unidades $gDQO/m^2d$, esto es, gramos de DQO en el afluente del tanque MBBR por metro cuadrado de área de superficie del portador al día, a partir de este parámetro se calculó el volumen de portador requerido, volumen del tanque y el volumen líquido en el reactor.

Entra las conclusiones más importantes que se relacionan con el estudio actual, se encuentra que el reactor piloto alcanzó eficiencias en remoción de DQO de hasta un 92%, dicho hallazgo se atribuyó a la biomasa que se encontraba en suspensión, debido a que, en los soportes no se logró notar adherencia de biomasa en ningún momento. Durante la investigación, la cantidad de aire inyectada al reactor no era un factor controlado, y, en consecuencia, pudo provocar el desprendimiento de la biomasa de los portadores.

Por último, se presenta al 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**” presentado en la Universidad Nacional Agraria La Molina de Lima-Perú para optar el título de Ingeniero Ambiental. Debido al incremento de la demanda de la industria de alimentos y al reducido espacio que se les asignan a las plantas de tratamiento de aguas residuales industriales, se decidió evaluar si la tecnología MBBR resulta una opción viable para tratar para aguas residuales industriales de la empresa Golosinas y Chocolates Perú S.A. Se trató de un proyecto factible que consistió en la caracterización del agua residual afluente y efluente, los parámetros analizados fueron: pH, temperatura (T), demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos (SS) y, aceites y grasas (AyG).

Los resultados demostraron que con este sistema de tratamiento era posible mantener e incluso mejorar la calidad del agua residual industrial tratada. La aplicación del sistema biológico

MBBR ha sido evaluado para el tratamiento de efluentes en una industria de alimentos (golosinas), el cual ha permitido una disminución en los parámetros DBO5, DQO, SST y AyG, respectivamente, así como un incremento de caudal con respecto a la PTARI antes de la ampliación.

Con dicho estudio se obtuvo información de gran aporte para el presente proyecto que tiene por objetivo evaluar la aplicación de la tecnología MBBR como alternativa de ampliación de capacidad del sistema de tratamiento biológico de la planta de tratamiento de aguas residuales de APC – “Planta Salsas y Untables”. Demostrándose a través de esta investigación que el sistema MBBR es reconocido por maximizar la capacidad y eficiencia en actualizaciones de sistemas de tratamiento existentes, generando una huella mínima. Así como también, el requerimiento de una menor área en comparación con lo necesitado para otros tipos de expansiones de tratamiento biológico.

2.2. Teorías centrales de la investigación.

- **Teoría de las restricciones.**

Introducida en el año 1984 en el libro *The Goal* por el autor Eliyahu M. Goldratt, la teoría de las restricciones es una metodología fundamentada en la búsqueda de las limitaciones que impiden el logro de objetivos establecidos dentro de una organización. En otras palabras, identifica y estudia las situaciones problemáticas que atrasan el progreso dentro de la empresa, con el propósito de direccionar los esfuerzos de mejora con forma lógica y siguiendo un orden sistemático (Goldratt, 1993). La teoría tiene como principio la continuidad empresarial, expresa que debe realizarse un estudio de todas las operaciones que conforman el proceso para conocer cuáles son las políticas contraproducentes y modificarlos en beneficio de la mejor gestión.

- **Teoría de sistemas.**

La teoría de sistemas se basa en la importancia de la relación que existe entre distintos sujetos y los grupos que se forman a partir de estas uniones (Arnold y Osorio, 1998), permite una visión holística de los conjuntos, con el propósito de integrar conceptos, leyes y modelos. Según los autores previamente citados, existen dos perspectivas para el estudio de los sistemas:

- ✓ Las perspectivas de sistemas en donde las distinciones conceptuales se concentran en una relación entre el todo (sistema) y sus partes (elementos).
- ✓ Las perspectivas de sistemas en donde las distinciones conceptuales se concentran en los procesos de frontera (sistema/ambiente).

Hecha la observación anterior, la presente investigación está enfocada en el estudio del sistema de tratamiento biológico, donde se dará importancia a los eventos provocados por los tratamientos previos al estudiado, así como a las condiciones exteriores que tienen incidencia directa en las condiciones dadas dentro de la planta de tratamiento.

2.3 Bases teóricas.

Según Arias (2012) las bases teóricas consisten “en un desarrollo amplio de los conceptos y proposiciones que conforman el punto de vista o enfoque adaptado, para sustentar o explicar el problema planteado” (p.107). En este sentido, serán desarrollados los contenidos que permiten abordar el tema de la investigación, para mayor entendimiento de las variables analizadas con propósito de resolver la problemática existente.

2.3.1 Aguas residuales.

Se denomina aguas residuales al líquido que, después de ser empleado para el desarrollo de la vida en las comunidades, no puede ser utilizado por el consumidor directo nuevamente. En las palabras de Metcalf y Eddy (1995) la acumulación de las aguas residuales provoca la proliferación de microorganismos patógenos, crecimiento de plantas acuáticas, esparcimiento de compuestos tóxicos y generación de gases malolientes. Generalmente, el destino de estos líquidos después de ser recogidos son cuerpos de agua receptores o incluso, el mismo terreno.

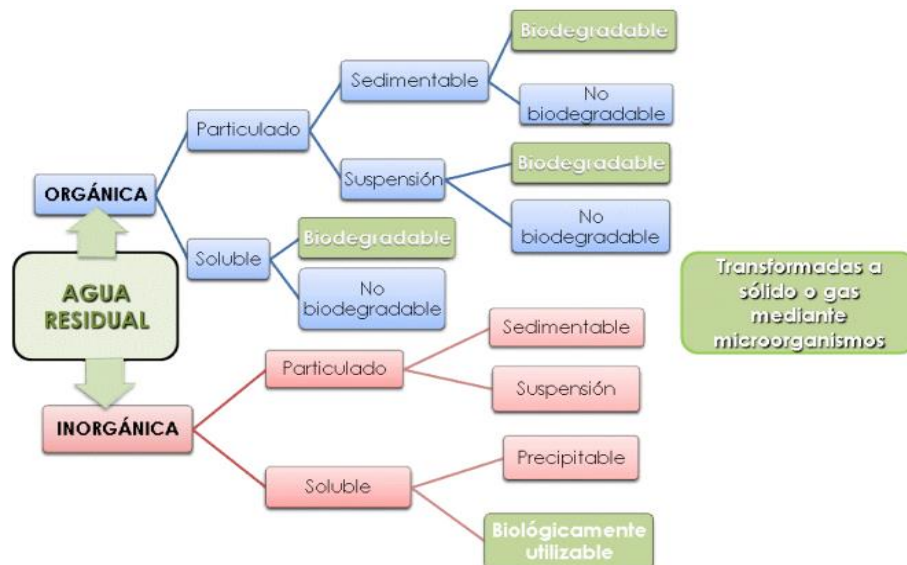


Figura 4. Fraccionamiento del agua residual

Fuente: Revilla, M. (2017).

Como se muestra en la Figura 4, las aguas residuales son caracterizadas por contener una fracción orgánica y una fracción inorgánica; a su vez, cada fracción se subdivide en distintas fracciones en función de diferentes características tales como la solubilidad, sedimentabilidad, biodegradabilidad, utilizables biológicamente y precipitables (Henze et al., 2008). Las fracciones orgánicas biodegradables son transformadas por los microorganismos en productos estables químicamente y en nuevos microorganismos, y las fracciones inorgánicas solubles biológicamente utilizables son absorbidos por los microorganismos formando parte de estos o transformándose a gas.

2.3.2 Características de las Aguas Residuales

Dependiendo del uso que se le haya dado al agua tendrá ciertas características físicas, químicas y biológicas, a través de ellas se diagnostican las condiciones y necesidad de tratamiento del líquido, tomando en cuenta los avances en tecnología, así como la legislación y normas reguladoras de la calidad del agua en la región.

Características Físicas

- **Sólidos Suspendidos**

El agua residual contiene pequeñas partículas de contaminantes sólidos que flotan o se encuentran suspendidas, medidas en unidades mg/L. (Agencia de Protección Ambiental, 2022). Son visibles, es decir, aportan turbidez al efluente según la concentración en la que se encuentren, así mismo, pueden ser retenidos mediante filtración.

- **Sólidos Sedimentables**

Los sólidos sedimentables se definen como aquellos que sedimentan en el fondo de un recipiente de forma cónica (cono de Imhoff) en el transcurso de un período de 60 minutos. Su medida implica la cantidad de fango que se obtendrá en la decantación primaria del agua residual, expresado en unidades ml/L. (Metcalf y Eddy, 1995).

- **Sólidos Coloidales y Disueltos**

La fracción filtrable de los sólidos corresponde a los sólidos coloidales y disueltos. Los primeros están compuestos por las partículas de materia de tamaños entre 0,001 y 1 micrómetro, para eliminarlos es necesaria la oxidación biológica o la coagulación, mientras que, la segunda está compuesta de moléculas orgánicas e inorgánicas en disolución en el agua. (Metcalf y Eddy, 1995).

- **Olor**

La descomposición de la materia orgánica presente en las aguas residuales libera gases, el agua residual reciente tiene un olor particular, más tolerable que el del agua residual séptica, es decir, en condiciones no aireadas. Específicamente, las aguas residuales industriales pueden contener olores propios de los compuestos utilizados en los procesos productivos, o compuestos capaces de producir olores en las etapas del tratamiento. Para la caracterización del olor, autores sugieren cuatro factores independientes: la intensidad, el carácter, la sensación de desagrado y la detectabilidad. (Metcalf y Eddy, 1995).

- **Temperatura**

La temperatura tiene está estrechamente relacionada con la actividad bacteriana, el rango establecido para actividad bacteriana aerobia está entre 25 y 32 °C. De esta forma, a altas temperaturas las bacterias se vuelven más activas, por lo que, a menores temperaturas la actividad bacteriana se ve reducida. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México, 2019). En la siguiente figura, se presenta gráficamente el efecto de la temperatura en el tratamiento biológico de aguas residuales.

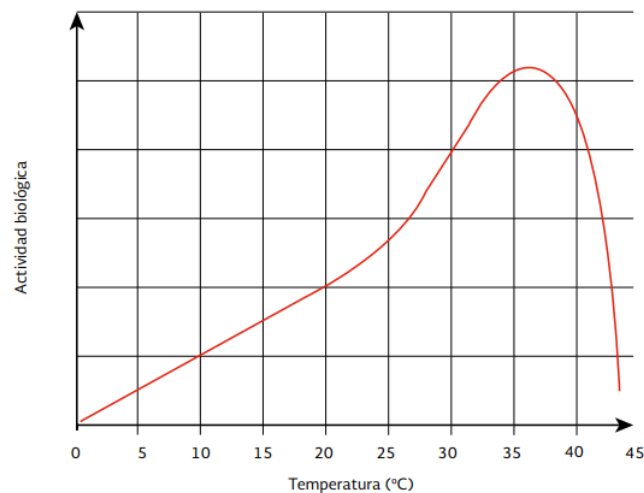


Figura 5. Relación entre temperatura y actividad biológica.

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México, (2019).

- **Color**

El color en las aguas residuales es causado por los sólidos suspendidos, material coloidal y sustancias en solución. El color causado por los sólidos suspendidos es llamado color aparente y el que es causado sustancias disueltas y coloidales se denomina color verdadero, este último se obtiene al filtrar la muestra. (Crites & Tchobanoglous, 2000).

En particular, en la etapa del tratamiento biológico, el color es un indicador de la edad del lodo; un lodo activado aireado en buenas condiciones cuenta con un color café achocolatado, por otro lado, un lodo oscuro o negro podrá indicar que no se transfiere el suficiente oxígeno y que el lodo es anaerobio. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México, 2019)

Características Químicas

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)**

De acuerdo con Metcalf y Eddy (1995) este parámetro señala la cantidad del oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica, la determinación del valor está limitada por el largo período de tiempo necesario para obtener resultados. Al haber una gran cantidad de desechos orgánicos en el agua, aumenta la probabilidad de tener más bacterias presentes trabajando en la descomposición, con lo que la demanda de oxígeno será más alta, esto aumenta el nivel de DBO. Cuando se tienen niveles altos de DBO el oxígeno disuelto disminuye porque el oxígeno que está disponible es consumido por las bacterias en los distintos procesos internos del cuerpo de agua, esto afecta a los demás organismos ya que tienen menos oxígeno disponible para sus procesos biológicos (IICA, 2000).

Su importancia radica en que es empleado para: determinar la medición de oxígeno requerida para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente, medir la eficacia de algunos procesos de tratamiento, controlar el cumplimiento de las normativas a las que estén sujetos los vertidos.

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

Esta medición engloba el contenido de materia orgánica que contiene compuestos tóxicos para la vida biológica. Es posible establecer una relación entre los valores de DBO y DQO, ello es de gran utilidad debido a que, en lugar de invertir los 5 días necesarios para determinar la DBO, se emplearían aproximadamente 3 horas. Vale la pena mencionar, la DQO de un agua residual es mayor que su correspondiente DBO, ya que existen mayor número de compuestos cuya oxidación tiene lugar vía química frente a los que se oxidan por vía biológica. (Metcalf y Eddy, 1995).

- **pH**

El intervalo adecuado de pH para que se desarrolle la vida tiene un margen estrecho, en un rango de pH 5 y 9, las aguas residuales con valores menores a 5 y superiores a 9 tienen un tratamiento más complicado mediante agentes biológicos. Si dicho pH del agua residual tratada no es ajustado antes de ser vertido nuevamente al cuerpo de agua, el pH de este cuerpo receptor será

alterado; de allí la necesidad de que los efluentes de las plantas de tratamiento deben ser descargados dentro de los límites específicos para descargas a cuerpos receptores (Crites & Tchobanoglous, 2000).

- **Nitrógeno**

La importancia del nitrógeno radica en que es esencial para la síntesis de proteínas, necesitan conocer sobre la presencia de este nutriente para evaluar el tratamiento del agua residual mediante procesos biológicos. El contenido total de nitrógeno está compuesto por nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos y nitrógeno orgánico (Crites & Tchobanoglous, 2000).

- **Fósforo**

Este elemento tiene relevancia en el crecimiento y desarrollo de distintos organismos en un cuerpo de agua, pero ya en cantidades excesivas provoca una proliferación de algas y otros organismos biológicos perjudiciales. Las formas más comunes en las que se puede encontrar el fósforo son los ortofosfatos, polifosfatos y fósforo orgánico. Los ortofosfatos más comunes de las aguas residuales están disponibles para el metabolismo biológico sin necesidad de que los organismos tengan que realizar una ruptura posterior del mismo (Crites & Tchobanoglous, 2000).

- **Grasas y aceites**

Químicamente tanto las grasas y aceites de origen vegetal o animal son similares, ya que básicamente son ésteres compuestos de ácidos grasos, alcohol y glicerina. Aquellos que se encuentran en estado líquido a temperatura ambiente denominados aceites y los que se han convertido en sólido llamados grasas. Su presencia causa muchos problemas en tanque sépticos, en sistemas de recolección y en el tratamiento de aguas residuales (Crites & Tchobanoglous, 2000).

Características Biológicas

- **Microorganismos**

Los microorganismos no sólo están presentes como agentes patógenos, sino que intervienen en los tratamientos biológicos. Ellos cumplen dos funciones: una de ellas es depurativa, metabolizando la materia orgánica presente en el efluente a tratar y otra es “constructiva”, en el sentido de generar la biofloculación, esta es una agregación de partículas finamente suspendidas en el medio líquido de origen, la cual conduce a la formación de estructuras cuyas dimensiones y peso específico permiten su separación del medio líquido por decantación. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México, 2019)

A modo de introducción a los principales grupos de microorganismos presentes en aguas residuales, como también en superficiales, se describe las características de cada uno de ellos, entendiendo que colaboran a la eliminación de la DBO, la coagulación de los sólidos coloidales no sedimentales y a la estabilización de la materia orgánica, de acuerdo con los autores Metcalf y Eddy (1995).

- **Bacterias:** En función de su forma, las bacterias pueden clasificarse en cuatro grandes grupos: esferoidales (o también llamadas cocos, con un diámetro aproximado entre 1 y 3 micras), bastón (o también llamadas bacilos, con tamaños muy variables), bastón curvo (con dimensiones que varían entre 0,6 y 1,0 micras de ancho entre 2 y 6 micras de longitud) y filamentosas (superando las 100 micras en sus dimensiones).
- **Hongos:** Muchos de los hongos basan su alimentación en materia orgánica muerta. Junto con las bacterias, son los principales responsables de la descomposición del carbono en la biosfera, así colaborando a evitar la acumulación de la materia orgánica. Ellos tienen la capacidad de desarrollarse en medios de baja humedad y bajos valores de pH, presentando ventajas sobre las bacterias.
- **Algas:** Pueden reproducirse rápidamente en condiciones favorables, son los primeros causantes de la eutrofización de los lagos. Puesto que el efluente de las plantas de tratamiento del agua residual contiene grandes cantidades de nutrientes biológicos, la descarga en los lagos provoca el crecimiento de algas y de esta manera, su tasa de eutrofización. Para evitar estas situaciones, la gestión de calidad del agua se enfoca en la eliminación de las distintas formas de nitrógeno y fósforo.
- **Protozoos:** Se alimentan de bacterias y otros microorganismos microscópicos. Su presencia es importante dentro del tratamiento de aguas residuales, colaboran en el tratamiento biológico, como también en la purificación de los cursos de agua, a través de mantener el equilibrio natural entre los diferentes microorganismos. Los protozoos más relevantes para la purificación de aguas son las amebas, los flagelados, los ciliados libres y los ciliados fijos.
- **Metazoarios:** Organismos más complejos que los protozoarios, sus células pueden agruparse para la formación de órganos y tejidos (Hernández, 2015). En las aguas residuales suelen encontrarse como nematodos o rotíferos, estos últimos ejercen una acción

de refino de los efluentes al consumir cualquier partícula biológica pequeña que no haya sedimentado.

En la figura 6 se muestran los diferentes microorganismos predominantes y cómo contribuyen a conocer la edad del lodo biológico. De este modo, un lodo maduro tendrá mayor presencia relativa de rotíferos en conjunto con protozoarios.

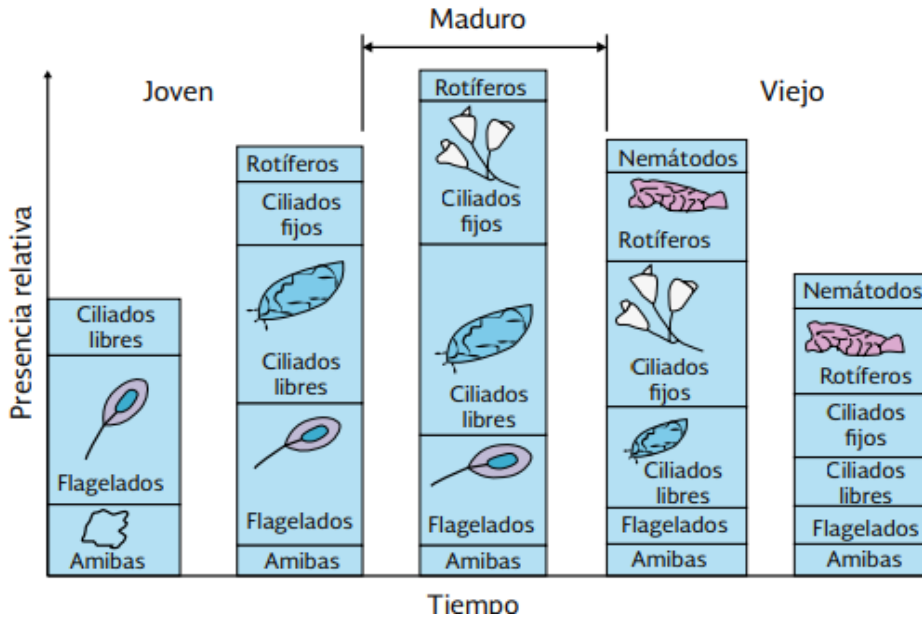


Figura 6. Presencia relativa de microorganismos según la edad del lodo biológico.

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México, (2019).

En este sentido, es relevante mencionar las características microscópicas de los sólidos obtenidos a partir de la digestión bacteriana denominados flóculos. Ante condiciones ideales de trabajo en sistemas convencionales suelen tener un tamaño relativamente grande sin crecimiento disperso, con una forma irregular y se mantienen unidos mediante la presencia de bacterias filamentosas (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México, 2019).

Sin embargo, debe existir un control de la presencia de las bacterias filamentosas y hongos, debido a que surgen en exceso cuando se tienen condiciones ambientales desfavorables para los microorganismos, como son: alta carga orgánica, pH bajo, deficiencia de nutrientes o falta de oxígeno disuelto (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México, 2019).

2.3.3 Tipos de Tratamiento de Aguas Residuales

Con el avance en las restricciones de efluentes como respuesta a su efecto en el medio ambiente, se ha impulsado una demanda de mayor eficiencia en el tratamiento de aguas residuales. Estos tratamientos se agrupan en tres grupos principales: operaciones físicas unitarias, procesos químicos unitarios y procesos biológicos unitarios.

Operaciones físicas unitarias

Se trata del uso de operaciones físicas para la eliminación de los sólidos sedimentales y flotantes presentes en el agua residual. Entre las operaciones físicas comúnmente empleadas se encuentra la homogenización, flotación, entre otros.

- **Homogenización de caudales**

La homogenización consiste, en amortiguar las variaciones de caudal, con el objeto de conseguir un caudal constante o casi constante. (Metcalf y Eddy, 1995). Además, reduce o elimina las cargas de choque, estabiliza el pH, como también mejora la calidad del efluente al entregar cargas de sólidos constantes. De esta manera, contribuye a la neutralización para la fluidez del tratamiento.

- **Flotación**

La flotación es una operación unitaria que se emplea para la separación de partículas sólidas de una fase líquida. La separación se consigue introduciendo finas burbujas de gas, normalmente aire, en la fase líquida, estas se adhieren a las partículas, y la fuerza ascensional que experimenta el conjunto partícula-burbuja de aire hace que suban hasta la superficie del líquido. Una vez las partículas se hallan en la superficie, pueden recogerse mediante un rascado superficial. (Metcalf y Eddy, 1995).

Procesos químicos unitarios

Contempla procesos implicados en el tratamiento de aguas residuales en los que las transformaciones se producen mediante reacciones químicas. Entre ellos se encuentran, la clarificación, precipitación química, desinfección, entre otros.

- **Clarificación**

El proceso de clarificación tiene como objetivo la eliminación de sustancias en suspensión, sustancias disueltas y la supresión de la flora microbiana, además de la posible corrección de algunas características fisicoquímicas. Consta de cuatro etapas: coagulación, floculación y separación de partículas por sedimentación, filtración o flotación. (Pérez, 2021).

- **Coagulación:** Consiste en la desestabilización de partículas en suspensión coloidal, a través de neutralizar sus cargas eléctricas, con lo que dejan de actuar fuerzas de repulsión. Entre los coagulantes empleados se encuentran sales de aluminio o hierro.
- **Floculación:** También llamados coadyuvantes de coagulación son productos que favorecen la formación del flóculo, al actuar como puente para unir mecánicamente las partículas previamente desestabilizadas. Entre los floculantes empleados se encuentran los polímeros.

La diferencia entre coagulante y floculante se encuentra en que el coagulante anula las fuerzas repulsivas entre las partículas coloidales, generando la formación de microflóculos, mientras que el floculante atrapa estos microflóculos aumentando su tamaño y densidad de modo que sedimenten más fácil y rápidamente. (Pérez, 2021).

Procesos biológicos unitarios

En este caso, se trata de procesos biológicos utilizados para eliminar la mayor parte de la materia orgánica presente en las aguas residuales. Estos pueden ser divididos en procesos aerobios y procesos anaerobios, los primeros son procesos que se dan en presencia de oxígeno, mientras que los segundos se dan en ausencia de oxígeno.

Al tratarse de procedimientos que dependen de fenómenos naturales, es a través del control del medio ambiente y del entorno de los microorganismos que se puede acelerar la descomposición de los residuos, tomando en cuenta: los requerimientos nutricionales de los microorganismos, la relación entre el crecimiento microbiano y la carga orgánica suministrada o características como las previamente tratadas. (Metcalf y Eddy, 1995).

- **Proceso de Fangos Activados**

Se trata de un proceso desarrollado en Inglaterra en 1914, donde es introducido el residuo orgánico en un reactor, en el cual permanece un cultivo bacteriano aerobio en suspensión denominado “lodo activado”, encargado de asimilar dicha carga orgánica y llevarla a ser dióxido de carbono y agua. La mezcla entre los lodos activados y el agua residual se conoce como “licor mixto”. (Metcalf y Eddy, 1995).

El ambiente aerobio se consigue mediante el uso de difusores o aireadores mecánicos, que también colaboran a la mezcla del líquido. Una vez pasado un período determinado, la mezcla de las nuevas células con las viejas son llevadas hasta un tanque de sedimentación o flotación, que permita separar el lodo biológico del efluente tratado. Seguidamente, una fracción de las células

separadas se recircula para mantener en el reactor la concentración de células deseadas, mientras que el resto es purgado del sistema. (Metcalf y Eddy, 1995). Acto seguido, se muestra gráficamente el proceso de fangos activados en la figura 7.

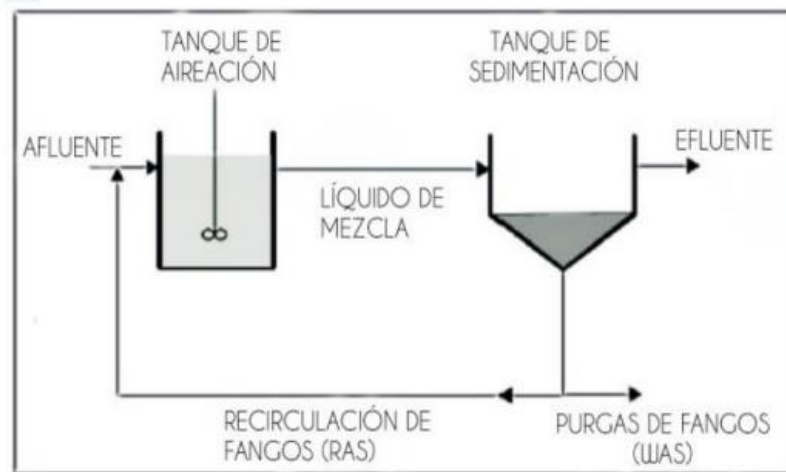


Figura 7. Proceso de un sistema de Fangos Activados

Fuente: Valdivielso, (2021).

En este tratamiento los microorganismos principales son las bacterias, ellas se encargan de descomponer la materia orgánica del afluyente con el fin de obtener energía para la síntesis del resto de la materia orgánica, además, están encargadas de la formación de un flóculo adecuado, colaborando a la separación de los sólidos biológicos en las instalaciones de sedimentación. Se puede tener una buena formación de flóculos, sin embargo, el efluente del sistema podría contener altos sólidos biológicos, debido a problemas con la unidad secundaria para la separación, mal funcionamiento de dispositivos de aireación o presencia de bacterias filamentosas (Metcalf y Eddy, 1995).

- **Relación F/M o A/M (Alimento/Microorganismos):** Se debe tener presente la cantidad de alimento que entra al sistema (DBO), así como la cantidad de microorganismos que se encuentran en el reactor biológico, los cuales están encargados de oxidar la materia orgánica efluente. Es importante recordar, el alimento (A) no se puede controlar, debido a que, incluso con tanques de homogenización, este suele variar diariamente, mientras que los microorganismos (M), compuestos por los sólidos volátiles, se controlan a través de la recirculación y la purga de lodos activados. El rango establecido para este parámetro dependerá de las características del proceso, en particular, para mezcla completa

convencional se encuentra entre 0,2 y 0,6 1/d. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México, 2019). Esta relación es calculada de la siguiente manera:

$$\frac{A}{M} = \frac{g \text{ de DBO afluente al tanque de aireación por día}}{g \text{ de SSVLM en el tanque de aireación}}$$

Para relaciones A/M por debajo del límite inferior establecido: No existe suficiente alimento para el crecimiento de los microorganismos, por lo que se ven obligados a vivir bajo el sistema de respiración endógena. El residuo obtenido del metabolismo endógeno son cápsulas celulares muy ligeras, que sedimentan pobremente. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México, 2019).

Para relaciones A/M por encima del límite superior establecido: Predominan los microorganismos filamentosos. Este tipo de colonias no decanta adecuadamente, por lo que los sólidos se mantienen en suspensión. El lodo esponjado obtenido se denomina bulking. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México, 2019).

Para finalizar esta sección, se muestra en la figura 8 una serie de desviaciones posibles en sistemas convencionales de lodos activados, las causas y posibles indicadores microbiológicos para la situación observada.

Problema	Causas	Observación al microscopio
Efluente turbio, ausencia de flóculos sedimentables dispersos en el medio	Alta A/M, elevada temperatura de entrada, fase inicial del sistema, elevada DQO altamente biodegradable	Ausencia de flóculos, células dispersas en el medio líquido, no ocurre biofloculación
Pérdida permanente de pequeños flóculos con el efluente final, SVI bajo (<100 mg/L)	Excesiva turbulencia o tiempo de retención celular, elevado lodo mineralizado, baja A/M	Flóculos presentes muy pequeños, débiles, como cabeza de alfiler
Estrato de lodo espeso en la superficie del sedimentador	Surgimiento del lodo desde el fondo del sedimentador por desnitrificación, exceso de turbulencia, algas.	Flóculos ricos en burbujas de gas con o sin filamentos, espuma y barro de igual aspecto
Espuma sutil, blanquecina, inestable sobre la superficie del agua	Presencia de sustancias difícilmente biodegradables, tensoactivas	Ninguna influencia sobre las estructuras de los flóculos
Espuma espesa amarillada, estable principalmente en el tanque aerobio	Presencia de bacterias filamentosas u hongos actinomicetos. Formación de espuma	Espuma rica de Nocardia, Microthrix parvicella o Tipo 1863
Lodo de consistencia gelatinosa, IVL alto, espuma grisácea en el tanque aerobio, pérdida de flóculos con el efluente final	Aglomerado viscoso o no filamentosos, carencia de nutrientes y alto A/M	Flóculos ricos en formas Zoogleales y presencia de polisacáridos exocelulares evidenciados con la prueba de tinta china. Presencia de Thauera sp.
IVL alto o muy alto (>150 mg/L) dificultad para separar fase líquida de sólida, inicio con un efluente limpio de excelente calidad hasta la pérdida masiva de flóculos. Lodo de recirculación poco concentrado	Aglomerado filamentosos, presencia de bacterias filamentosas en exceso, las causas varían en relación al tipo de organismo presente	Flóculos con crecimiento de filamentosos desde la periferia hacia el líquido circundante, puentes entre flóculos o filamentosos creciendo en el interior y definiendo la forma de los flóculos o en tramas que dejan espacios vacíos en su estructura

Figura 8. Patologías frecuentes en sistemas de lodos activados.

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México, (2019).

2.3.4 Tecnología MBBR.

La tecnología MBBR (Biorreactor de Lecho Móvil) fue desarrollada por el profesor Ødegaard a finales del año 1980 y se basa en el crecimiento de microorganismos adheridos a las paredes de soportes de polipropileno o polietileno de densidad próxima a 1 g/cm^3 , estos soportes se mantienen móviles y en suspensión dentro del reactor. Existen más de 1200 plantas de tratamiento para aguas residuales industriales y urbanas 22, distribuidas en 50 países diferentes que utilizan la tecnología MBBR (Van Haandel y Van der Lubbe, 2012).

Los soportes son de pequeño tamaño, pero son diseñados con una elevada área superficial por unidad de volumen (superficie específica, m^2/m^3) lo que posibilita el crecimiento de mayor cantidad de biomasa y de mayor efectividad que la de los flóculos biológicos de reactores convencionales. Un porcentaje del volumen del reactor es ocupado por los soportes y el porcentaje máximo de llenado es de un 67%. Los soportes dentro del reactor se mueven libremente, incluso a un 70% de llenado, debido a que su densidad es parecida a la del agua y el movimiento es provocado mediante sistemas de aireación (procesos aerobios) o mediante agitación mecánica (proceso anóxico y anaerobio). Los soportes son retenidos en el reactor mediante la instalación de colectores circulares perforados en la salida de los reactores (Ver Figura 9).

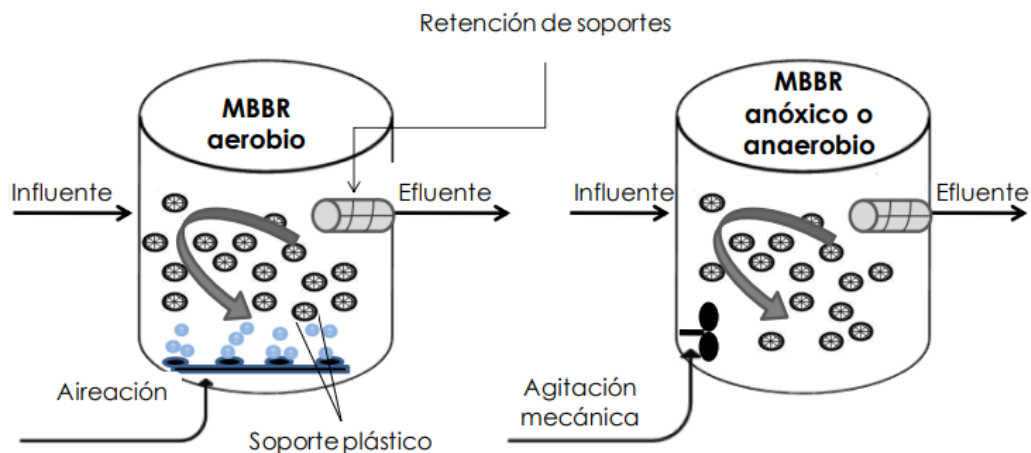


Figura 9. Esquema del movimiento de los soportes en un reactor MBBR en condiciones aerobias, anóxicas o anaerobias.

Fuente: Revilla, M. (2017).

En procesos aerobios, el sistema de aireación dispone de una parrilla de tubos perforados para generar burbujas de aire de tamaño medio que aumentan la capacidad de mezcla de los soportes. Estas parrillas cubren toda la superficie del fondo de los reactores con el fin de garantizar

el aporte de oxígeno necesario para el tratamiento y asegurar una correcta agitación del agua y de los soportes plásticos (Van Haandel y Van der Lubbe, 2012).

Los soportes plásticos están en continuo movimiento dentro del reactor y debido al efecto de cizalladura por los choques entre ellos, el exceso de biopelícula se desprende de forma automática (auto-regulación del espesor de la biopelícula), evitando la colmatación en el soporte y dando lugar a un reactor biológico con una elevada concentración de biomasa activa. La biomasa desprendida de los soportes será el fango en exceso del tratamiento y no es necesaria su recirculación al reactor biológico (Van Haandel y Van der Lubbe, 2012).

Ventajas del proceso MBBR.

El proceso MBBR tiene una serie de ventajas frente a otros procesos de tratamiento de aguas residuales (Zalakain, 2009; Zalakain y Manterola, 2011):

- Reducción del volumen del reactor biológico debido al empleo de un soporte que proporciona una superficie específica protegida elevada. La superficie de terreno necesaria para la instalación de un proceso de lecho móvil es muy inferior a la necesaria para un proceso de fangos activos; esta reducción de volumen es mayor a medida que aumenta la biodegradabilidad de las aguas a tratar.
- Supone un proceso con gran flexibilidad ya que, en función del porcentaje de soporte plástico empleado en el reactor, se consigue modificar la superficie específica protegida y en consecuencia la eficiencia del proceso.
- No requiere recirculación de biomasa al reactor. En estos casos, la concentración de sólidos en suspensión que llegan al decantador secundario es muy inferior a la concentración que recibiría en un proceso de fangos activos, por lo que los decantadores secundarios son también de menor tamaño.
- La operación y control de este tipo de procesos son sencillos. Por un lado, el proceso evita los problemas de obstrucción y consecuentemente periodos de limpieza continuados, y por otro, no es necesario un control de la purga de fangos ya que el sistema mantiene la biomasa en el reactor hasta que se desprende del soporte.
- Permite la generación de una biomasa característica de cada tipo de reactor (aerobio, anóxico o anaerobio) dando lugar a la obtención de una biopelícula con una elevada actividad.

- En los procesos de biopelícula no proliferan microorganismos filamentosos, lo que conlleva a la eliminación de uno de los mayores problemas de los procesos de fangos activos, el denominado “bulking filamentoso”, que impide que la biomasa sedimente en el decantador secundario.
- La edad de fango (parámetro de control crítico de un proceso de fangos activos), desaparece, por lo que la operación del mismo se simplifica notablemente.
- Recuperación rápida del proceso ante inhibiciones. La formación de biopelícula en el soporte plástico es de forma estratificada con lo que, ante la presencia de inhibidores o posibles picos de carga, serán primordialmente las capas externas de la biopelícula las que se vean afectadas, produciéndose una disminución en la eficiencia del proceso, pero una muy rápida recuperación una vez pasado el inhibidor. A diferencia de los procesos de fangos activos la generación de la nueva biomasa y la recuperación total de la actividad biológica se ve restablecida rápidamente tras el paso del inhibidor.

Diseño de un reactor piloto MBBR.

Según Bengston (2017) el parámetro clave para diseño de un reactor MBBR es el índice de carga orgánica por área superficial (SALR) con unidades en $gDBO/m^2d$. Representa los gramos al día de DBO o DQO que se reciben, frente al área protegida por los soportes dentro del reactor MBBR. A partir de este valor se definen las características de la biopelícula formada de la siguiente manera: Si es mayor a $30 gDBO/m^2d$, la biopelícula que se genera es compacta, existen bacterias cómodamente, ya que los microorganismos depredadores están ausentes, si se encuentra entre $10-15 gDBO/m^2d$, la biopelícula es esponjosa, existen bacterias y diversidad de microorganismos depredadores y si es inferior a $5 gDBO/m^2d$, predominan los microorganismos depredadores en la biopelícula (Van Haandel y Van der Lubbe, 2012).

En este propósito, se debe mencionar el papel del SARR (carga orgánica removida por área superficial), también medido en unidades de $gDBO/m^2d$, donde el numerador pasa a ser los gramos de DBO o DQO removidos al día. Bengston (2017) comprobó que la relación SARR/SALR sigue una recta, permitiendo estimar la eficiencia en remoción de carga orgánica (Ver cuadro 1), atendiendo a que se puede expresar como:

$$\eta = \frac{\text{Entrada} - \text{Salida}}{\text{Entrada}} = \frac{\text{SARR}}{\text{SALR}}$$

Cuadro 1. Valores de diseño típicos de SALR y su relación con el porcentaje de remoción.

Valores típicos de diseño de SALR para reactores MBBR a 15 °C		
Descripción	Porcentaje de remoción objetivo (%)	SALR de diseño (g/m^2d)
Carga alta	75-80	25
Carga normal	85-90	15
Carga baja	90-95	7,5

Fuente: Bengtson, 2017.

La planta de tratamiento de aguas residuales de Alimentos Polar Comercial – “Planta Salsas y Untables”, contiene dentro de su sistema biológico un tanque de aireación por lodos activados de una sola etapa, por lo tanto, la aplicación de la tecnología MBBR debe adaptarse a esta condición. Un diagrama de flujo típico para un proceso MBBR de una sola etapa enfocado en la remoción de DBO se muestra en la figura 10.

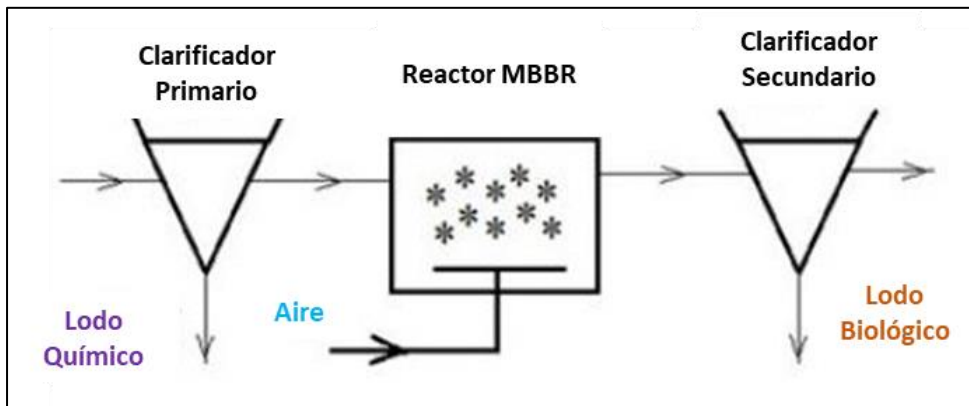


Figura 10. Diagrama de flujo para un reactor MBBR de una sola etapa.

Fuente: Bengtson, 2017.

Bengtson (2017) recomienda hacer cada uno de los cálculos mencionados a través de una hoja de Excel y comparte un ejemplo de cómo realizar esta hoja de trabajo (Ver figura 11). En la imagen mostrada, se introducen los datos en las celdas con tono azul, mientras que las celdas amarillas son calculadas con los datos introducidos y las ecuaciones presentadas. Además, la hoja de trabajo permite introducir la forma del tanque de aireación para la mayor exactitud en los resultados a obtener.

MBBR Process Design Calculations - U.S. units					
Single-Stage Process for BOD Removal					
Instructions: Enter values in blue boxes. Spreadsheet calculates values in yellow boxes					
1. General Inputs					
Design ww Flow Rate, Q =	1.5	MGD	Data points for SARR/SALR vs SALR		
Prim. Eff. BOD, S_0 =	175	mg/L	SALR (g/m ² /d):	7.5	15.0
Peak Hour Factor =	4		SARR/SALR:	0.925	0.875
(default values above are based on the table of typical values of % BOD removal vs SALR at the right)					
Design Value of BOD Surface Area Loading Rate (SALR) =	7.5	g/m ² /d	Slope, SARR/SALR vs SALR:	-0.007	
See information on typical design values for SALR below right.			Intercept, SARR/SALR vs SALR:	0.975	
			Est. of SARR/SALR Ratio =	0.925	
			(Surf. Area Removal Rate/Surf. Area Loading Rate) (for SALR value specified at left)		
2. Calculation of Carrier Volume and Required Tank Volume & Dimensions					
Inputs					
Carrier Spec. Surf. Area =	600	m ² /m ³	Liquid Depth in Tank =	8	ft
(value from carrier mfr/vendor)			Tank L:W ratio =	1.5	
			(target L:W - only used if tank is rectangular)		
Design Carrier Fill % =	40%		Click on green box and then on arrow to Select Tank Shape:		rectangular
(Carrier fill % is typically between 30% and 70%. Lower values are more conservative, allowing future capacity expansion or reduction of SALR by adding more carrier.)			Carrier % Void Space =	60%	
			(from carrier mfr/vendor - only needed to calculate hydraulic detention time)		
Calculations					
BOD Daily Loading =	2189	lb/day	Calculated Tank Volume =	551.7	m ³
	993,022	g/day	=	19,482	ft ³
			=	145,723	gal
Carrier Surf. Area needed =	132,403	m ²	Calculated Tank Width =	40.3	ft
Calculated Carrier Volume =	220.7	m ³	Calculated Tank Length =	60.4	ft
Tank Liquid Volume =	16,365	ft ³	Nominal Hydraulic Retention Time at		
			Design Average Flow =	118	min
Estimate of BOD Surface Area			Peak Hourly Flow =	29	min
Removal Rate, SARR =	6.94	g/m ² /d	Calculated Eff BOD Conc.:	13	mg/L
Est. of BOD Removal Rate	918,545	g/day	If the calculated Effl. BOD conc. is too high, the design value of SALR (in cell C13) should be reduced.		
	2025.1	lb/day			

Figura 11. Hoja de cálculos en Excel para MBBR.

Fuente: Bengston, 2017.

Requerimientos de aireación de la tecnología MBBR.

Como se ha citado, los reactores MBBR aerobios requieren suministro de oxígeno para lograr la movilidad de los biosoportres y su distribución uniforme dentro del tanque. En este sentido, se recurre las reglas generales de estimación de los requerimientos de aire y/o oxígeno recopiladas por Bengston (2009) gracias a información proporcionada por Sanitaire, una empresa encargada de manufacturar difusores de aire:

1. La relación AOTE/SOTE típica para sistema de aireación de burbuja gruesa es 0,5.
2. La relación AOTE/SOTE típica para sistema de aireación de burbuja fina es 0,3.
3. El SOTE típico es 0,75% por pie (o 2,46%/m) de sumersión de difusor en un sistema de aireación de burbuja gruesa.
4. El SOTE es 2,0% por pie (o 6,56%/m) de sumersión de difusor en un sistema de aireación de burbuja fina.
5. 1 SCF (pie cúbico estándar) de aire pesa $0,075\text{lb}/\text{ft}^3$ ($1,20\text{kg}/\text{m}^3$) y contiene 23% de oxígeno por peso, entonces: el aire contiene 0,0173 lbm de oxígeno por SCF.
6. Para tratamientos biológicos con un tiempo de retención de sólidos (SRT) de 5 a 10 días, las $\text{lb } O_2 \text{ requerido}/\text{lb } DBO \text{ removida}$ se encuentran en un rango entre 0,92 a 1,1 $\text{lb } O_2 \text{ requerido}/\text{lb } DBO$. Valores más altos de SRT resultan en valores más altos de $\text{lb } O_2 \text{ requerido}/\text{lb } DBO$. En el caso de un sistema MBBR, con un SRT bastante alto, este valor suele encontrarse alrededor de 1,5 $\text{lb } O_2 \text{ requerido}/\text{lb } DBO \text{ removida}$.
7. La oxidación de 1 libra de nitrógeno amoniacal requiere típicamente entre 4,1 a 4,6 libras de oxígeno.

Así mismo, se vuelve relevante establecer diferencias entre un difusor de burbuja gruesa frente a un difusor de burbuja fina. Los difusores de burbuja gruesa realizan burbujas con diámetros mayores a 3 mm hasta 50 mm, mientras que los difusores de burbuja fina mantienen diámetros de hasta 3 mm (Ver figura 12).



Figura 12. Tamaño de burbujas según tipo de difusor.

Fuente: Mooers Products, 2014.

Igualmente, para el diseño de una parrilla de difusores es importante considerar y tener presente los límites para el flujo de aire según el diámetro de la tubería utilizada, con el propósito de conocer su capacidad. Estos están resumidos en el cuadro 2.

Cuadro 2. Velocidades típicas de flujo de aire en función del diámetro de la tubería.

Velocidad típica del aire en las conducciones principales	
Diámetro de la tubería, mm	Velocidad, m/s
25-75	6,10-9,15
100-250	9,15-15,25
300-600	13,70-20,30
750-1.500	19,30-33,00

Fuente: Aguas y aguas de Pereira, 2013.

2.3.5 Modelización Matemática en la Investigación de Operaciones

Los modelos matemáticos son una representación de los procesos a través de ecuaciones planteadas, ellos se realizan con el propósito de predecir, controlar, diseñar e incluso para fines educativos, debido a que son una herramienta para la comprensión del comportamiento de fenómenos (Grau y Soler, 1997). Dentro de la investigación de operaciones, son empleados modelos matemáticos para la coordinación de actividades dentro de las organizaciones, sin importar el área de desarrollo de esta, por lo que es aplicable tanto a industrias de manufactura, transporte, planeación financiera, cuidado de la salud, fuerzas armadas, entre otros (Hillier y Lieberman, 2010).

En general, se pueden describir los pasos de un estudio de investigación de operaciones de la siguiente manera: primeramente, la observación cuidadosa de la situación a estudiar con el objetivo de definir la problemática de forma clara, esto incluye la recolección de datos pertinentes. Luego, sigue la construcción de un modelo matemático que refleje el problema, la hipótesis de este modelo es que captará la esencia de la situación, por lo que las soluciones obtenidas podrán ser extendidas al problema real. Después, se valida el método mediante experimentos que prueben la hipótesis, como también se abre paso a realizar modificaciones en caso de que sean necesarias. Finalmente, son establecidas conclusiones sobre los resultados conseguidos, con el fin de proporcionar una orientación a la administración o a los encargados de tomar decisiones. (Hillier y Lieberman, 2010).

La investigación de operaciones pretende, no sólo conseguir una solución buena para el problema planteado, sino también encontrar la mejor solución entre el grupo de soluciones. Esta solución es llamada “solución óptima”. En las palabras de Hillier y Lieberman (2010), en lugar de conformarse con mejorar el estado de las cosas, la meta será identificar el mejor curso de acción posible.

Fases usuales de un estudio de Investigación de Operaciones

En el párrafo anterior, las fases de un estudio de Investigación de Operaciones fueron abordadas de forma concisa. A continuación, se describe de manera amplia el procedimiento para llevar a cabo un estudio por medio de la Investigación de Operaciones según Hillier y Lieberman (2010):

- **Definición del problema de interés y recolección de datos relevantes**

Esta etapa engloba el estudio de la situación problemática con el propósito de desarrollar un resumen claro del problema, este resumen debe contener los objetivos de la investigación a realizar, las interrelaciones del área estudiada con las otras áreas que conforman la organización, los límites de tiempo para tomar una decisión basada en los resultados, por nombrar algunos aspectos importantes. De esta manera, se verifica que la intención por la cual se realizará la investigación esté en línea con los objetivos de niveles más elevados de la empresa.

Luego, se deben recolectar los datos relevantes del problema. Es posible que esta etapa consuma un largo tiempo del equipo de Investigación de Operaciones, se necesitan muchos datos para captar la esencia de la situación problemática y así tener la información suficiente para establecer el modelo matemático en el paso siguiente. Con frecuencia, no se tienen los datos necesarios previamente almacenados, ya que estos fueron recolectados erróneamente, los equipos donde fueron guardados son obsoletos, o, nunca fue recopilada la información. Como consecuencia de esto, se deben desarrollar o instalar nuevos sistemas de información general para reunir los datos sobre la marcha y apropiadamente.

- **Formulación de un modelo matemático que represente el problema**

El modelo matemático de un problema industrial está compuesto por un sistema de ecuaciones, o expresiones matemáticas que captan la esencia de la situación estudiada. Los parámetros que describen a los modelos matemáticos industriales son: **las variables de decisión** (x_1, x_2, \dots, x_n), representan las variables cuantificables sobre las que se debe tomar una decisión, por lo que su valor es el resultado del modelo matemático. Continuando, se tiene **la función**

objetivo ($Z = 3x_1 + 2x_2 + \dots + 5x_n$), se trata de la medida de desempeño adecuada expresada en función de las variables de decisión. De la misma manera, se toman en cuenta las limitaciones que pueden imponerse frente a las variables de decisión, en forma de ecuaciones o desigualdades (por ejemplo, $x_1 + 2x_2x_1 + 5x_3 \leq 10$), estas limitaciones son denominadas **restricciones**. Finalmente, los coeficientes que acompañan a las variables de decisión en las restricciones y en la función objetivo, son llamados **parámetros** del modelo. Sobre las bases de lo anteriormente expuesto, se define el problema como encontrar los valores para las variables de decisión que maximicen o minimicen la función objetivo, tomando en cuenta las restricciones a las que está sujeta.

- **Desarrollo de un procedimiento basado en computadora para derivar una solución para el problema a partir del modelo**

En esta etapa, se realiza un procedimiento, generalmente utilizando un software de computadora, para obtener la solución del problema planteado mediante el modelo matemático. Se aplica uno de los dos algoritmos (procedimientos iterativos de solución) inherentes a la Investigación de Operaciones, a través de paquetes de software matemáticos como TORA, Excel Solver o AMPL.

Como se explicó anteriormente, el propósito del modelo matemático es encontrar la solución óptima, es decir, la mejor solución dentro de un conjunto de soluciones posibles. Sin embargo, se debe aclarar que, esta solución es sólo respecto al modelo matemático elaborado, donde, además, este es una idealización o aproximaciones a los eventos reales que se desarrollan, por lo tanto, no se puede garantizar que sea la mejor solución posible para implementarse. Debido a esto, más que conseguir lo imposible, el estudio de Investigación de Operaciones pretende establecer una guía u orientación para la toma de decisiones.

Entre las otras etapas que componen un estudio de investigación de operaciones se encuentra: prueba del modelo y mejoramiento de acuerdo con las necesidades, preparación para la aplicación del modelo prescrito por la administración e implementación.

La investigación de operaciones pretende, no sólo conseguir una solución buena para el problema planteado, sino también encontrar la mejor solución entre el grupo de soluciones. Esta solución es llamada “solución óptima”. En las palabras de Hillier y Lieberman (2010), en lugar de conformarse con mejorar el estado de las cosas, la meta será identificar el mejor curso de acción posible.

2.3.6 Ajuste de Curvas

Según Salvador (2008) el ajuste de curvas se trata de un proceso que determina una función matemática $f(x)$ para un grupo de N valores pares de la forma $\{x_i, y_i\}$ basándose en que “la suma de los cuadrados de la diferencia entre la imagen real y la correspondiente obtenida mediante la función ajustada en cada punto sea mínima” (Salvador, 2008). Lo anterior se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \min \left(\sum_i^N (y_i - y_i^{calc})^2 \right) = \min \left(\sum_i^N (y_i - a_0 - a_1 x_i)^2 \right)$$

Además, el autor indica que es posible seleccionar una función genérica $f(x)$, donde se ajuste el valor de los parámetros que la describen para minimizar la diferencia cuadrática entre los valores reales y los proyectados. Para ilustrar se tiene el caso de la regresión lineal, en ella se plantea encontrar la ecuación de una recta que minimice el error cuadrático, es decir:

$$\varepsilon = \min \left(\sum_i^N (y_i - f(x_i))^2 \right)$$

Ahora bien, es posible que se presenten problemas de mínimos cuadrados distintos a una recta. Para ello, es implementado el algoritmo Levenberg-Marquadt, ya que si la función genérica que mejor se adapta no tiene parámetros lineales, la solución requiere iteraciones que actualicen los valores del modelo lógico hasta encontrar aquellos que reducen la diferencia cuadrada (Gavin, 2022).

El método de Levenberg-Marquadt resulta de la unión de dos métodos para la minimización: el método de descenso de gradiente y el método de Gauss-Newton. El primero se encarga de actualizar los parámetros en una dirección descendiente, en otras palabras, elige valores que hacen que la función genérica obtenga un resultado más pequeño. Mientras que, el método de Gauss-Newton, asume que la función genérica es aproximadamente cuadrática en los parámetros que se acerquen a la función objetivo (Gavin, 2022).

En el algoritmo de Levenberg-Marquadt la actualización iterativa dependerá de un parámetro λ , encargado de suavizar el gráfico. Entonces, si λ es pequeño se utiliza el método Gauss-Newton y, en caso de que sea alto, se utiliza el método de descenso de gradiente (Gavin, 2022). Matemáticamente, el algoritmo de Levenberg-Marquadt se expresa como:

$$(J^T J + \lambda I) \zeta = J^T [y - f(\beta)]$$

Donde, J corresponde a la matriz de las derivadas parciales de primer orden, cuya fila i es igual al gradiente de la función genérica $f(x)$ con respecto a la estimación inicial de los parámetros propuesta para el método (β) e I es la matriz de identidad, dando un incremento ζ para el vector de parámetros buscado β .

Coefficiente de determinación (R^2)

Utilizado para conocer la bondad del ajuste de curvas realizado, es un valor establecido entre 0 y 1, donde los valores cercanos a 1 indican un ajuste perfecto y los cercanos a 0 señalan que no existe relación entre los pares $\{x_i, y_i\}$ con el modelo lógico propuesto para el ajuste (Salvador, 2008). El coeficiente R^2 es calculado al dividir la varianza de los datos obtenidos con el modelo, entre la varianza de los datos experimentales, en este sentido, se puede expresar como:

$$R^2 = \frac{\sum_i^N (y_i^{calc} - \bar{y})^2}{\sum_i^N (y_i - \bar{y})^2}$$

Donde, \bar{y} es el promedio de valores para la variable dependiente e y_i^{calc} son los valores calculados por el modelo que se espera logre ajustarse a los datos (Salvador, 2008).

2.4 Bases legales.

La política ambiental venezolana está enmarcada entre los instrumentos legales que definen los principios rectores en esta materia y se dispone mediante una organización jerárquica. Se cita, en primer lugar, la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela, que constituye la fuente primaria del derecho administrativo, civil, penal y ambiental y, en segundo lugar, la Ley Orgánica del Ambiente, que representa el documento donde se hace más concreta esta definición. En la misma escala se encuentran las demás leyes orgánicas y la Ley Penal del Ambiente. Seguidamente, se encuentran las leyes comprendidas dentro del Código Civil, las cuales son enriquecidas por los Reglamentos, Decretos y Resoluciones que amplían con mayor detalle aspectos específicos expuestos en las anteriores.

2.4.1 Constitución de la República Bolivariana de Venezuela.

Aprobada en Asamblea Nacional en diciembre de 1999, publicada en Gaceta Oficial Extraordinaria N° 5.453, el 24 de marzo de 2000. Por primera vez en la historia constitucional de

Venezuela, esta Constitución incluye un capítulo dedicado a los derechos ambientales. En su Artículo 129, hace mención de la obligatoriedad de la realización de los Estudios de Impacto Ambiental y Sociocultural cuando se trate de actividades susceptibles de generar daños a los ecosistemas.

2.4.2 Ley Orgánica del Ambiente (2006).

El 22 de diciembre de 2006. Esta Ley tiene por objeto establecer las disposiciones y los principios rectores para la gestión del ambiente, en el marco del desarrollo sustentable como derecho y deber fundamental del Estado y de la sociedad, para contribuir a la seguridad y al logro del máximo bienestar de la población y al sostenimiento del planeta, en interés de la humanidad. De igual forma, establece las normas que desarrollan las garantías y derechos constitucionales a un ambiente seguro, sano y ecológicamente equilibrado.

2.4.3 Ley Penal del Ambiente.

Por otra parte, en relación con las sanciones en que pueden incurrir las organizaciones por un mal manejo de los aspectos ambientales, se citan a continuación los artículos más relevantes de la Ley Penal del Ambiente en Venezuela, según la publicación en Gaceta Oficial N°39.913 del 02 de mayo de 2012.

TÍTULO III. DE LOS DELITOS CONTRA EL AMBIENTE.

Capítulo VIII.

Artículo 84. Vertido de Materiales Degradantes en Cuerpos de Agua.

La persona natural o jurídica que vierta o arroje materiales no biodegradables, sustancias, agentes biológicos o bioquímicos, efluentes o aguas residuales no tratadas según las disposiciones técnicas dictadas por el Ejecutivo Nacional, objetos o desechos de cualquier naturaleza en los cuerpos de aguas, sus riberas, cauces, cuencas, mantos acuíferos, lagos, lagunas o demás depósitos de agua, incluyendo los sistemas de abastecimiento de aguas, capaces de degradarlas, envenenarlas o contaminarlas, será sancionada con prisión de uno a dos años o multa de un mil unidades tributarias (1.000 U.T.) a dos mil unidades tributarias (2.000 U.T.).

Artículo 99. Disposición Indevida de Residuos o Desechos Sólidos no Peligrosos.

La persona natural o jurídica que infiltre o entierre en los suelos o subsuelos, sustancias, productos o materiales no biodegradables, agentes biológicos o bioquímicos, agroquímicos, residuos o desechos sólidos o de cualquier naturaleza que no sean peligrosos, en contravención a las normas técnicas que rigen la materia, que sean capaces de degradarlos, esterilizarlos, envenenarlos o alterarlos nocivamente, será

sancionada con arresto de uno a tres años o multa de trescientas unidades tributarias (300 U.T.) a un mil unidades tributarias (1000 U.T.).

Artículo 100. Disposición Indevida de Residuos o Desechos Sólidos Peligrosos. Serán sancionados con arresto de uno a tres años o multa de trescientas unidades tributarias (300 U.T.) a unas mil unidades tributarias (1.000 U.T.) quienes:

1. Introduzcan en los servicios de manejo integral de residuos y desechos no peligrosos otras sustancias, materiales y desechos peligrosos.
2. Mezclen en los servicios de manejo integral de residuos y desechos no peligrosos con desechos peligrosos y los descarguen en rellenos sanitarios o sitios de disposición final no construidos especialmente para tal fin.
3. Construyan, operen o mantengan lugares para la disposición de desechos peligrosos, sin autorización de las autoridades correspondientes.
4. Operen, mantengan o descarguen desechos peligrosos en sitios no autorizados.
5. Exporten desechos peligrosos en contravención con las disposiciones de la Ley.
6. Incumplan la normativa técnica o los planes de gestión del manejo integral de los desechos peligrosos.

2.4.4 Ley Sobre Sustancias, Materiales y Desechos Peligrosos (2001).

A continuación, se muestran los artículos considerados pertinentes en relación con lo establecido en la Ley Sobre Sustancias, Materiales y Desechos Peligrosos según la Gaceta Oficial N°5554 Ext. Del 13 de noviembre de 2001.

TÍTULO VII. DE LAS SANCIONES

Artículo 78. Toda persona natural o jurídica, pública o privada que use, maneje, genere sustancias, materiales o desechos peligrosos sin estar registrado por ante el organismo competente, según sea el caso y de conformidad con la reglamentación técnica que rige la materia será sancionada con una multa comprendida entre cincuenta unidades tributarias (50 U.T.) a cien unidades tributarias (100 U.T.), y arresto de la persona natural o del representante legal de la persona jurídica proporcional a la sanción. Igualmente, se le concederá un plazo de diez (10) días hábiles para que se inscriba en el registro respectivo. Si no lo hiciere en el lapso establecido, en esta Ley, se procederá a la clausura de las instalaciones.

Artículo 79. Toda persona natural o jurídica, pública o privada que no cumpla con las disposiciones establecidas en esta Ley o en la reglamentación técnica sobre la generación, uso y manejo de sustancias, materiales y desechos peligrosos, cuyo incumplimiento no constituya delito, será sancionada con multa de doscientas unidades tributarias (200 U.T.) a dos mil unidades tributarias (2.000 U.T.).

Artículo 82. Serán sancionadas con prisión de cuatro (4) a seis (6) años y multa de cuatro mil unidades tributarias (4.000 U.T.) a seis mil unidades tributarias (6.000 U.T.), las personas naturales o el representante legal o el

responsable de la persona jurídica que en contravención a las disposiciones de esta Ley y a la reglamentación técnica sobre la materia:

1. Generen, usen o manejen sustancias, materiales o desechos clasificados como peligrosos provocando riesgos a la salud y al ambiente.
2. Transformen desechos peligrosos que impliquen el traslado de elementos contaminantes a otro medio receptor.
3. Desechen o abandonen materiales o desechos clasificados como peligrosos, en forma tal, que por falta de controles adecuados puedan contaminar la atmósfera, las aguas superficiales o subterráneas, los suelos o el ambiente en general.
4. Mezclen desechos de tipo doméstico con desechos comerciales o industriales y los dispongan en rellenos sanitarios o vertederos no contruidos especialmente para tal fin.
5. Construyan, operen o mantengan lugares para la disposición de desechos clasificados como peligrosos, sin autorización de las autoridades correspondientes.
6. Operen, mantengan o descarguen desechos peligrosos en sitios no autorizados.
7. Omitan las acciones previstas en los planes para el control de emergencias.

2.4.5 Ley Orgánica de Precios Justos (2015).

Según Gaceta Oficial N° 40.787, esta ley se encarga de establecer las normas para la determinación de precios de bienes y servicios, los márgenes de ganancia, los mecanismos de comercialización, y los controles que deben ejercerse para permitir el acceso a las personas a los productos que permiten cubrir sus necesidades en condiciones de justicia y equidad.

CAPÍTULO IV. DEL SISTEMA DE ADECUACIÓN CONTINUA DE PRECIOS.

Artículo 31. Margen máximo de ganancia. El margen máximo de ganancia que puede corresponder a los sujetos de aplicación respecto de los precios de determinados bienes o servicios podrá ser establecido periódicamente, atendiendo a los criterios económicos de la Superintendencia Nacional para la Defensa de los Derechos Socioeconómicos, tomando en consideración las recomendaciones emanadas de los ministerios del poder popular con competencia en las materias de comercio, industria y finanzas. Ningún margen de ganancia superará el treinta por ciento (30%) de la estructura de costos del bien producido o servicio prestado en el territorio nacional.

2.4.6 Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de las Aguas de la Cuenca del Lago de Valencia (1999).

El 13 de enero de 1999 fue publicado este decreto N° 3.219, publicado en la Gaceta Oficial N° 5.305. En él, se establece la cuenca del Lago de Valencia como un cuerpo de agua prioritario para su manejo y control, debido a sus condiciones de desarrollo industrial y poblacional,

tratándose de una cuenca endorreica con un inmenso potencial, por lo que debe garantizarse la calidad de sus aguas mediante una regulación técnico-normativa especial.

En su artículo 36, se fijan rangos y límites máximos de concentraciones para los parámetros de control en los vertidos líquidos que sean o vayan a ser descargados, en forma directa o indirecta, al Lago de Valencia y red hidrográfica tributaria. A continuación, los más representativos de estos son plasmados en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Parámetros de control para el vertimiento de líquidos en el Lago de Valencia.

PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS	LÍMITES MÁXIMOS O RANGOS
Aceites y grasas vegetales y animales	20 mg/l
Demanda Bioquímica de Oxígeno	60 mg/l
Demanda Química de Oxígeno	350 mg/l
Detergentes	2,0 mg/l
Espuma	Ausente
Fósforo total	1,0 mg/l
Nitrógeno total	10 mg/l
pH	6 – 9
Sólidos flotantes	Ausentes
Sólidos sedimentales	1,0 mg/l
Sólidos suspendidos	80 mg/l

Fuente: Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de las Aguas de la Cuenca del Lago de Valencia. (1999).

2.5 Definición de términos básicos.

Aprovechamiento Sustentable: Proceso orientado a la utilización de los recursos naturales y demás elementos de los ecosistemas, de manera eficiente y socialmente útil, respetando la integridad funcional y la capacidad de carga de los mismos, en forma tal que la tasa de uso sea inferior a la capacidad de regeneración.

Biopelícula: Comunidades de microorganismos que crecen agregados y rodeados por una matriz extracelular que ellos mismos producen, la cual favorece la adhesión covalente sobre superficies

inertes y vivas; además, les ayuda a desarrollar alta tolerancia a las moléculas con actividad antimicrobiana.

Capacidad instalada: Se refiere a la disponibilidad de infraestructura necesaria para producir determinados bienes o servicios.

Contaminación: Liberación o introducción al ambiente de materia, en cualquiera de sus estados, que ocasione modificación al ambiente en su composición natural o la degrade.

Costo de Oportunidad: Beneficio perdido al tomar una decisión o hacer una acción. Se puede expresar como: Costo de Oportunidad = (Valor de opción no elegida) – (Valor de opción elegida).

Daño Ambiental: Toda alteración que ocasione pérdida, disminución, degradación, deterioro, detrimento, menoscabo o perjuicio al ambiente o a alguno de sus elementos.

Desarrollo Sostenible: Proceso de cambio continuo y equitativo para lograr el máximo bienestar social, mediante el cual se procura el desarrollo integral, con fundamento en medidas apropiadas para la conservación de los recursos naturales y el equilibrio ecológico, satisfaciendo las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las generaciones futuras.

Eficiencia: Expresión que mide la capacidad o cualidad de la actuación de un sistema o sujeto económico para lograr el cumplimiento de un objetivo determinado, minimizando el empleo de recursos.

Eutrofización: Proceso natural en ecosistemas acuáticos, especialmente en lagos, caracterizado por un aumento en la concentración de nutrientes. Más allá de ciertos límites, el proceso reviste características negativas al aparecer grandes cantidades de materia orgánica cuya descomposición microbiana ocasiona un descenso en los niveles de oxígeno.

Relación beneficio – costo: Razón existente entre los costos que presenta un proyecto y los beneficios que se podían obtener a partir de él, se expresa como beneficios netos/costos de inversión. En este sentido, ayuda a medir la rentabilidad, si la relación es mayor a uno (1) el proyecto es rentable, si es igual a uno (1) no hay ganancias ni pérdidas, y si es menor a uno (1), el proyecto no es rentable.

Responsabilidad Social Empresarial: Contribución al desarrollo humano sostenible, a través del compromiso y la confianza de la empresa hacia sus empleados y las familias de éstos, hacia la sociedad en general y hacia la comunidad local, en pro de mejorar el capital social y la calidad de vida de toda la comunidad.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

A continuación, se caracteriza la investigación a través del marco metodológico, según Arias (2012), esta sección “es el “cómo” se realizará el estudio para responder al problema planteado” (p.110). Incluye el tipo de investigación, el diseño de la investigación, el nivel de la investigación, la población y muestra que protagonizarán el proyecto, los métodos que serán aplicados para obtener los datos y, para concluir, las etapas que compondrán la investigación.

3.1 Tipo de investigación.

El propósito del presente trabajo de grado es evaluar la aplicación de la tecnología MBBR como alternativa para aumentar la capacidad dentro del sistema biológico de una planta de tratamiento de aguas residuales, lo cual responde a la necesidad de mejorar sus procesos expresada por la empresa caso estudio. En este sentido, se establece el tipo de investigación como un proyecto factible, según Figueredo et al. (2020) estos trabajos “conllevan a propuestas viables para atender necesidades demostradas a través de una investigación de campo o documental ya sea de una organización, grupo social o institución, a ser usados como solución al problema delimitado” (p. 14).

Así mismo, los autores anteriormente citados definen las dos etapas generales que comprenden el desarrollo proyecto factible, desglosando los procedimientos y temas tratados en cada una de ellas de la siguiente manera:

Primera, diagnóstico, planeamiento y fundamentación teórica de la propuesta; procedimiento metodológico, actividades y recursos necesarios para su ejecución, análisis y conclusiones sobre la viabilidad y realización del proyecto; segunda, en caso de su desarrollo, la ejecución de la propuesta y la evaluación tanto del proceso como de sus resultados. (Figueredo y otros, 2020; 14).

La investigación por realizar tendrá un enfoque mixto, es decir, tanto cualitativo como cuantitativo. Parte de los datos serán recolectados a través de observaciones directas al fenómeno estudiado y los resultados estarán basados en la opinión del investigador, mientras que la otra proporción de los datos serán recolectados numéricamente y analizados mediante la estadística descriptiva, al igual que otros métodos matemáticos.

3.2 Diseño de la investigación.

El diseño de la investigación permite definir cómo se hallará la información requerida para dar respuesta a la formulación previamente realizada en el estudio. En las palabras de Arias (2012) se trata de “la estrategia general que adopta el investigador para responder al problema planteado.” (p. 27). Se precisa de una vez, que la evaluación de la tecnología MBBR para ser aplicada en el sistema biológico de una planta de tratamiento de aguas residuales se hará a través de una prueba piloto donde se modificarán las distintas variables que afectan el resultado del proceso, por ejemplo: volumen del reactor piloto, alimentación de carga orgánica, suministro de aireación, concentración de nutrientes, entre otros, con intención de conocer cuál combinación de estas abrirá paso a alcanzar el resultado deseado en términos de eficiencia en remoción de DBO y adherencia de biomasa.

Hecha la observación anterior, el diseño seleccionado para esta investigación será experimental de campo, según Arias (2012) este se desenvuelve como “un proceso que consiste en someter a un objeto o grupo de individuos, a determinadas condiciones, estímulos o tratamiento (variable independiente), para observar los efectos o reacciones que se producen (variable dependiente)” (p. 34). Considerando la revisión de documentos requerida para la realización de la investigación, se establece que su diseño también es documental, el autor citado previamente indica que está basado en “la búsqueda, recuperación, análisis, crítica e interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales” (p. 27).

3.3 Nivel de la investigación.

Según se ha visto, se espera establecer una relación causa y efecto, que permita determinar las condiciones en que la tecnología MBBR es una alternativa factible para aumentar la capacidad del sistema biológico. Por lo tanto, el nivel de la investigación que corresponde será explicativo, es relevante traer la cita de lo explicado por Figueredo et al. (2020) sobre los estudios realizados desde un nivel explicativo:

Son investigaciones que tratan de descubrir leyes y principios o de generar modelos explicativos y/o teorías. Con ellas se establecen relaciones de causalidad o de contingencia entre dos o más fenómenos para buscar razones y mecanismos que permitan explicar los procesos o fenómenos en estudio, a través de observaciones o de razonamiento (inductivo o deductivo). (p. 11)

Significa entonces que se pretende encontrar el porqué del comportamiento de un fenómeno y conocer cuáles son las condiciones exteriores que lo provocan. Todo ello con el fin de beneficiar a la empresa caso estudio tanto operativa como jurídicamente, conservar el medio ambiente y contribuir a las investigaciones previamente realizadas sobre la tecnología MBBR.

3.4 Población y muestra.

3.4.1 Población.

Para Arias (2012) el término población se refiere a: “Un conjunto finito o infinito de elementos con características comunes para los cuales serán extensivas las conclusiones de la investigación. Ésta queda delimitada por el problema y por los objetivos del estudio”. (p. 81). En este caso, la población estará limitada a la planta de tratamiento de aguas residuales en la empresa Alimentos Polar Comercial C.A. – “Planta Salsas y Untables”.

3.4.2 Muestra.

Parafraseando las palabras de Arias (2012), la muestra “Es un subconjunto representativo de la población, debido a que su tamaño y características parecidas a las del conjunto total, que permite generar los resultados para el resto de los miembros” (p. 95). Atendiendo lo anterior, la investigación será desarrollada teniendo como muestra al sistema biológico de la planta de tratamiento de aguas residuales en la empresa Alimentos Polar Comercial C.A. – “Planta Salsas y Untables”, conformado por el reactor biológico y el sistema de flotación por aire disuelto.

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

3.5.1 Técnicas de recolección de datos.

Después de lo expuesto, en esta sección se describirán las técnicas e instrumentos a utilizar con el fin de obtener y almacenar los datos requeridos para conseguir los objetivos propuestos en la investigación.

- **Observación directa.**

Arias (2012) afirma que se trata de “una técnica que consiste en visualizar o captar mediante la vista, en forma sistemática, cualquier hecho, fenómeno o situación que se produzca en la naturaleza o en la sociedad, en función de unos objetivos de investigación preestablecidos.” (p. 69). En relación con el presente estudio, a través de esta técnica se identificarán aspectos relevantes entorno a las condiciones de operación del sistema biológico, como también, al tratarse de la evaluación de una tecnología como alternativa para mejorar el rendimiento del tratamiento, existen parámetros sensoriales a analizar, los

cuales serán observados por el investigador; entre ellos se encuentra el olor, el color, la turbidez, la mezcla homogénea del agua, entre otros.

- **Entrevista estructurada.**

Según Arias (2012) la entrevista estructurada” Se refiere a una situación en la que un entrevistador pregunta a cada entrevistado una serie de interrogantes preestablecidos con una serie limitada de categorías de respuesta.” (p.44). Este método ofrecerá al investigador organizar previamente las preguntas que se desean realizar al personal de la empresa Alimentos Polar Comercial “Planta Salsas y Untables”, ubicada en Valencia, Carabobo, que estén en contacto con el sistema biológico dentro de la planta de tratamiento de aguas residuales, ya que son los informantes claves del estudio. Todo ello con el propósito de conocer la forma de operar, las características generales del sistema al igual que el comportamiento que esté presentando en la actualidad con detalles.

Entonces, será empleada la guía de preguntas, así como la grabadora para registrar las respuestas obtenidas en la entrevista estructurada a realizar a los empleados que hagan vida en la planta, específicamente, cerca del sistema biológico.

- **Revisión documental.**

La revisión documental consiste en recolectar información sobre datos anteriormente registrados. En la opinión de Hernández et al. (2006), estos datos “le sirven al investigador cualitativo para conocer los antecedentes de un ambiente, las experiencias, vivencias o situaciones y su funcionamiento cotidiano”. (p. 614).

Para el desarrollo de la investigación, se estarán visitando registros organizacionales, es decir, reportes pasados sobre el desempeño de la planta de tratamiento de aguas residuales, fotografías internas, como también la política ambiental que maneja la empresa en relación con las operaciones practicadas para el tratamiento del recurso hídrico.

- **Revisión bibliográfica.**

De acuerdo con Sierra, C. (2004) la revisión bibliográfica “Es la técnica que ayuda a determinar si un tópico de investigación seleccionado merece la pena profundizar y si la misma es factible, dado el grado de conocimiento sobre este” (p.163). La misma comprenderá todas las actividades relacionadas con la búsqueda de información escrita sobre un tema acotado previamente y sobre el cual, se reúne y discute críticamente, toda la información recuperada y utilizada. Igualmente, serán consultados documentos públicos y

archivos que traten la tecnología MBBR para comprender la tecnología.

- **Métodos analíticos de laboratorio.**

Para el seguimiento de la prueba, se deben evaluar constantemente los indicadores operacionales o parámetros fisicoquímicos, ellos reflejan el rendimiento del sistema, así como las condiciones que podrían favorecer o perjudicar la efectividad de la tecnología MBBR. Entre estos indicadores operacionales se encuentran unos sensoriales, como olor, generación de espuma, color, entre otros y unos analíticos, como demanda química de oxígeno (DQO), concentración de nutrientes, potencial de hidrógeno (pH), temperatura, sólidos suspendidos totales (SST) y más.

Las mediciones de los parámetros analíticos se realizarán siguiendo las instrucciones de los métodos de laboratorio establecidos en la planta de tratamiento de aguas residuales de Alimentos Polar Comercial – “Planta Salsas y Untables”, los cuales están basados en los métodos estandarizados por Hach, los que, a su vez, en su mayoría responden a los métodos estandarizados APHA, 20va edición. Resulta oportuno destacar que la frecuencia de los análisis estará limitada por la disponibilidad de los equipos y los reactivos necesarios. Los resultados obtenidos serán registrados en un cuaderno de campo, para luego ser almacenados en computadoras y unidades de almacenaje.

3.5.2 Instrumentos de recolección de datos.

Sabino, C. (2014), establece como un instrumento de recolección de datos “cualquier recurso de que se vale el investigador para acercarse a los fenómenos y extraer de ellos información” (p.114). Los instrumentos que se utilizaran son las siguientes:

- **Instrumentos para la observación directa.**

Arias (2012), menciona que en la observación libre o no estructurada “se emplean instrumentos tales como: diario de campo, libreta o cuaderno de notas, cámara fotográfica, cámaras de video, cronómetros...” (p.70). Hernández et al. (2006) señalan que se pueden tomar anotaciones que señalen lo importante y contribuyan a la descripción de las experiencias o del ambiente. Estas anotaciones son registradas en lo que se denomina diario de campo o bitácora y pueden incluir: mapas, diagramas o relatos para el contexto. Además de ello, será utilizada una cámara fotográfica para captar los cambios dados en la prueba.

- **Guía de entrevista.**

Hurtado (2008), plantea que “El guion de entrevista debe contener los datos generales de codificación del entrevistado, datos sociológicos y datos convencionales al tema de investigación” (p.46). Comprende un conjunto de preguntas para obtener información con algún objetivo en concreto.

- **Lista de chequeo.**

También llamada lista de cotejo o de verificación, según Arias (2012) “es un instrumento en el que se indica la presencia o ausencia de un aspecto o conducta observada.” (p.70). El autor explica que su estructura consiste en tres columnas: en la primera se mencionan los elementos a observar, la segunda guarda un espacio para marcar si está presente la característica y la tercera indica si no está presente la característica.

- **Unidades de almacenamiento digital.**

Arias (2012) establece que los instrumentos de recolección de datos pueden ser cualquier recurso, sea digital o en papel, que permita almacenar la información. En este sentido, se utilizaron unidades de almacenamiento digital como computadoras y dispositivos de almacenamiento externo para registrar los documentos revisados.

- **Programa de inspección de variables operativas (PIVO).**

Según la Real Academia Española (2023) un programa es una “serie ordenada de operaciones necesarias para llevar a cabo un proyecto”. En este sentido, se desarrollará un programa para el seguimiento diario de los parámetros críticos de calidad involucrados en la prueba.

3.6 Técnicas de análisis de la información.

A continuación, se describen las técnicas y herramientas utilizadas para el procesamiento y análisis de la información recolectada.

- **Diagrama de flujo de proceso.**

Loaiza et al. (1990) definen el diagrama de flujo de proceso como la representación esquemática de un proceso, con ciertos pasos a seguir para lograr la solución de un problema. Igualmente, añaden, “es una representación reticular de un sistema, el cual lo contempla en términos de sus componentes indicando el enlace entre los mismos”.

- **Cursograma analítico de proceso.**

También llamado diagrama de flujo de proceso, no sólo representa las operaciones e inspecciones de un proceso, sino que “muestran todos los retrasos de movimientos y almacenamientos a los que se expone un artículo a medida que recorre la planta.” (Benjamin y Fraivalds, 2009). Hace uso de distintos símbolos para representar las distintas actividades, sea operaciones, transporte, almacenamiento, retrasos o inspecciones, e incluso permite la utilización de símbolos no estándar para señalar operaciones administrativas entre otros.

- **Matriz multicriterio.**

Para Grajales et al. (2013) los métodos multicriterio logran descomponer en partes más simples un problema, haciendo posible la comparación considerando un número amplio de datos, relaciones y criterios, desde un punto cualitativo y cuantitativo. En este sentido, se aplicará el método multicriterio expresado en una matriz para la toma de decisiones en la presente investigación.

- **Pruebas de hipótesis.**

Forma parte de los métodos para realizar inferencias, según Mendenhall et al. (2010) consiste en la toma de “una decisión acerca del valor de un parámetro, con base en alguna idea preconcebida acerca cuál podría ser su valor”. (p. 298). La prueba de hipótesis se encuentra entrelazada con el concepto de *valor p* y significancia. Por ejemplo, para una prueba de valores atípicos se puede establecer:

H_0 : Todos los valores de la muestra son de la misma población, normalmente distribuida.

H_1 : Uno de los valores de la muestra no es de la misma población, normalmente distribuida.

Luego, para determinar si existe un valor atípico, se compara el *valor p* obtenido con el nivel de significancia establecido. Se elige trabajar con un nivel de significancia de 0,05, es decir, existirá un riesgo del 5% de identificar un valor atípico que, en realidad, no lo es. Entonces, si el *valor p* es inferior o igual al nivel de significancia escogido, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que existe un valor atípico en la muestra analizada. Por el contrario, si el *valor p* es superior al nivel de significancia, no se puede concluir que exista un valor atípico (Minitab, LLC, 2021).

- **Prueba de distribución normal.**

Según Gutiérrez y De la Vara (2009) es una distribución continua cuya densidad tiene forma de campana, donde su centro coincide con la media, y su amplitud está determinada por su desviación estándar. Se tienen distintas formas de comprobar la normalidad de los datos, entre ellos se encuentra la gráfica de probabilidad, en la cual “si la distribución propuesta describe de manera adecuada los datos, los puntos en el gráfico tenderán a ubicarse a lo largo de una línea recta.” (Gutiérrez y De la Vara, 2009; 54).

- **Regresión lineal.**

Consiste en encontrar una ecuación capaz de describir la interacción entre dos variables. Al respecto, Mendenhall et al. (2010) destacan que “utilizamos la ecuación de una recta para describir la relación entre x y y y describimos la fuerza de la relación usando el coeficiente de correlación R ”. (p. 503), a esto se le llama modelo probabilístico lineal simple. Como se indica, el coeficiente de correlación R indica qué tan cerca están los datos de la línea de regresión ajustada generada.

- **Gráficos de control.**

También llamado carta de control, para Gutiérrez y De la Vara (2009) no son más que herramientas para estudiar la variabilidad de los datos, tomando en cuenta la secuencia en la que fueron tomados, es decir, su cambio a través del tiempo. Mediante su implementación es posible “monitorear el proceso para asegurar que las mejoras se mantienen y para detectar oportunidades adicionales de mejora.” (Gutiérrez y De la Vara, 2009; 184). Las cartas de control pueden ser por variables o por atributos, en el caso de las cartas por variables las más usuales son:

- ✓ \bar{X} (de medias)
- ✓ R (de rangos)
- ✓ S (de desviaciones estándar)
- ✓ X (de medias individuales)

- **Diagrama causa – efecto.**

En las palabras de Burgasí y otros (2021) el diagrama causa-efecto abarca dos puntos de vista que permiten definir y dar profundidad a las causas y los efectos del problema planteado, mediante el análisis de su origen y cómo se induce. Se utilizará el diagrama causa-efecto para clasificar las debilidades detectadas en el diagnóstico de la situación

actual en el sistema de tratamiento biológico de la planta de tratamiento de aguas residuales, mostrando una visión sistemática del problema planteado.

3.6.1 Validación del Instrumento.

Según Palella y Martins (2010) “la validez se define como la ausencia de sesgos. Representa la relación entre lo que se mide y aquello que realmente se quiere medir”. (p 160). Por consiguiente, para la aplicación de la entrevista estructurada a los operadores que laboran en la planta de tratamiento de aguas residuales caso estudio, fue requerida la validación del guion de entrevista por parte de expertos en el rubro de la investigación, con el propósito de asegurar que las preguntas a realizar permitieran obtener información precisa y útil para el alcance de los objetivos propuestos. En este sentido, se consultó la opinión de tres (3) expertos, quienes aprobaron la aplicación del instrumento diseñado por el investigador. El guion de entrevista aplicado, así como los resultados de la validación de este se encuentran recopilados en el Anexo A del presente trabajo.

3.6.2 Cuadro de Operacionalización de Variables

Según Arias (2012), en la investigación científica se utiliza el término operacionalización para englobar “al proceso mediante el cual se transforma la variable de conceptos abstractos a términos concretos, observables y mediables, es decir, dimensiones e indicadores.” (p. 62). En el cuadro 4 en el Anexo B, se presenta el desglose de las variables que serán estudiadas para realizar el diagnóstico de las condiciones dentro del sistema biológico de la planta de tratamiento de aguas residuales de Alimentos Polar Comercial C.A. – “Planta Salsas y Untables”.

3.7 Fases metodológicas

Seguidamente, se describen en orden cronológico describen las fases metodológicas que deben desarrollarse para llevar a cabo la presente investigación:

FASE I: Diagnóstico de la situación actual en el sistema de tratamiento biológico, para la determinación de las condiciones operacionales del mismo.

Para el desarrollo de la primera fase de la investigación, fue aplicada la observación directa al sistema de tratamiento biológico, así mismo, mediante la revisión de documentos propios de la empresa, obtuvieron reportes pasados sobre el desempeño del sistema a estudiar. Seguidamente, se aplicó una entrevista estructurada a los técnicos encargados de operar la planta de tratamiento de aguas residuales, para conocer su perspectiva entorno al rendimiento actual del sistema biológico, los procedimientos aplicados y hechos relevantes. Finalmente, con la información

obtenida, fueron revisados escritos por distintos autores que sirvieron como referencia para establecer un diagnóstico en consideración de lo observado.

FASE II: Análisis de oportunidades de mejora encontradas en el sistema de tratamiento biológico.

Basándose en el diagnóstico obtenido en la fase anterior, a continuación, se analizaron las debilidades detectadas en el diagnóstico del sistema de tratamiento biológico por medio de un diagrama causa-efecto, donde cada problema fue distribuido en criterios, ello colaboró mostrando una visión sistemática del problema planteado.

Posteriormente, se determinaron los requerimientos técnicos para implementar la tecnología MBBR en el sistema biológico actual según la revisión exhaustiva de bibliografía relacionada al diseño, construcción e instalación de un biorreactor de lecho móvil. De esta manera, fueron establecidos los aspectos necesarios en términos de infraestructura, materiales, equipos, entre otros.

FASE III: Diseño de un reactor biológico a escala piloto para simular las condiciones reales de los efluentes de la planta con tecnología MBBR.

Con intención de comprobar la factibilidad operacional de la tecnología MBBR en respuesta a la variabilidad de los afluentes recibidos en la planta de tratamiento de aguas residuales, en esta fase fue diseñado un reactor biológico a escala 1:300 respecto al reactor real, el cual tiene como alimentación el agua residual dirigida al reactor biológico real, como también, cuenta con la accesibilidad para permitir al investigador evaluar el desarrollo de la prueba, tomando como referencia la bibliografía previamente consultada en relación al diseño de un reactor con tecnología MBBR.

FASE IV: Evaluación de la propuesta a través del desempeño de la tecnología.

En esta fase, fueron mostrados los resultados encontrados a lo largo de los ensayos practicados en el reactor piloto con tecnología MBBR, haciendo un recorrido por cada uno de los eventos que afectaron directamente a la eficiencia de la prueba. Además, fueron analizados los datos mediante la estadística permitiendo conocer el rendimiento de la propuesta según su tipo de distribución. Entre los análisis se añade una caracterización microbiológica de las aguas de la planta de tratamiento real, de las del reactor piloto MBBR y de la solución de limpieza de biosoportos, con el propósito de verificar el desarrollo de una comunidad microbiológica.

Concluyendo esta fase, los datos recolectados fueron utilizados para construir modelos matemáticos que representen el desempeño del reactor piloto, es decir, conformar un sistema de ecuaciones y expresiones matemáticas capaces de reflejar el comportamiento de la prueba, de esta manera, será suministrada una herramienta que permita transmitir resultados obtenidos en la prueba a escala al reactor biológico real.

FASE V: Determinación de la factibilidad operativa, técnica, ambiental, social y económica de la propuesta.

Finalmente, fue evaluado lo obtenido desde el punto de vista operativo, técnico, ambiental, social y económico. Para el desarrollo de la factibilidad económica, fueron considerados los costos involucrados en la implementación de la tecnología MBBR, los resultados conseguidos en las pruebas realizadas y la legislación actual. Luego, se hizo una comparación con los ahorros y beneficios que obtendría la organización en el caso de escoger la instauración de la propuesta presentada.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

A continuación, son presentados los resultados de la investigación, siguiendo las fases metodológicas que habían sido anteriormente establecidas en el capítulo III. Todo ello, con el propósito de alcanzar el objetivo general del presente estudio al cumplir con cada uno de los objetivos específicos propuestos, es decir, evaluar la tecnología MBBR como una alternativa para ampliar la capacidad del sistema de tratamiento biológico en Alimentos Polar –“Planta Salsas y Untables”.

4.1 Fase I: Diagnóstico de la situación actual en el sistema de tratamiento biológico, para la determinación de las condiciones operacionales del mismo

En esta etapa, se realizó un diagnóstico de la situación actual en el sistema de tratamiento biológico en Alimentos Polar – “Planta Salsas y Untables”, ubicada en la zona industrial de Valencia, estado Carabobo, cuya extensión es de aproximadamente 71.300 m^2 (figura 13), con el propósito de determinar las condiciones operacionales y oportunidades de mejora existentes.

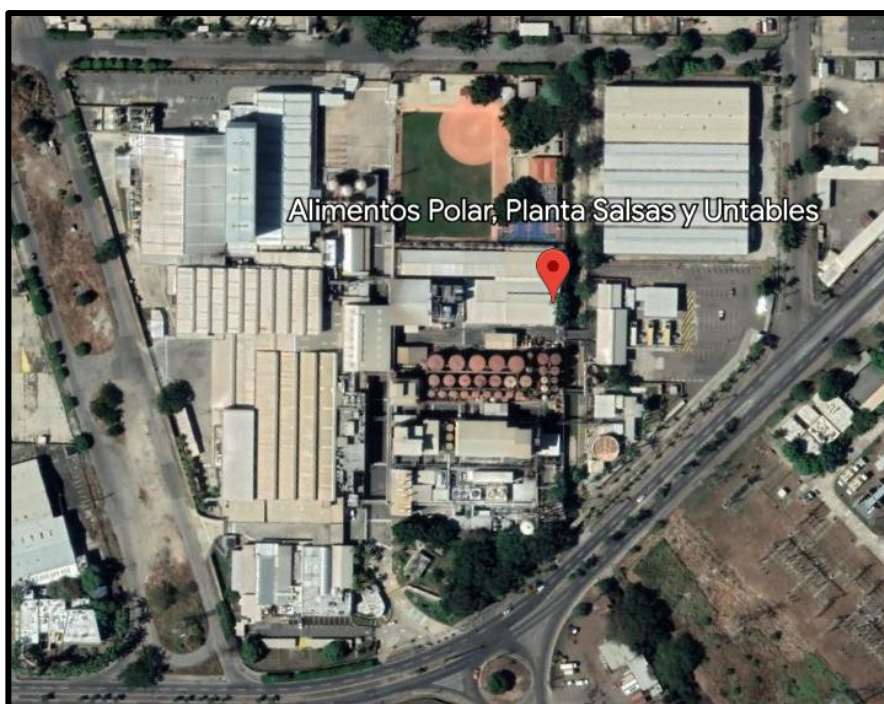


Figura 13. Ubicación geográfica de Alimentos Polar Comercial– “Planta Salsas y Untables”.

Fuente: Google Earth, 2021.



4.1.1 La Empresa.

El conglomerado Empresas Polar está dividido en tres grandes grupos: Cervecería Polar, Pepsi-Cola Venezuela y Alimentos Polar, dedicados a la fabricación y distribución de una variedad de alimentos. Cuenta con marcas preferidas entre todos los venezolanos gracias a su altísimo estándar de calidad y a su excelente relación precio-valor.

En particular, la planta “Salsas y Untables” de Alimentos Polar Comercial, cuenta con una variedad de productos pertenecientes a su portafolio. Estos productos son clasificados en las siguientes categorías: margarinas, mayonesa, vinagre, ketchup, salsa a base de tomate, mermeladas y quesos. Con el objetivo de apreciar la extensión de su catálogo de productos, estos se desglosan en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. Lista de productos APC – “Planta Salsas y Untables” activos.

CATEGORÍA	PRODUCTO	IMAGEN REFERENCIA
MARGARINAS	MAVESA MARGARINA 1Kg	
	MAVESA MARGARINA 500g	
	MAVESA LIGERA MARGARINA 500g	
	MAVESA REPOSTERA PANELITA	
	PANELITA C/SAL 250g	
	MAVESA MARGARINA 250g	
	MAVESA MARGARINA CHIFFON 454g	
	CHEF MARGARINA C/S 5 Kg x 1 UN CFH	
	CHEF MARGARINA S/S 5 Kg x 1 UN CFH	
	NELLY MARGARINA REDUCIDA CAL 250g	
NELLY MARGARINA REDUCIDA CAL 500g		
MAYONESA	MAVESA MAYONESA 910g	
	MAVESA MAYONESA 445g	
	MAVESA ADEREZO MAYONESA 3,6Kg	
	MAVESA MAYONESA 175g	
VINAGRE	MAVESA VINAGRE DE ALCOHOL 1L	
	MAVESA VINAGRE DE ALCOHOL 4L	
KETCHÚP	PAMPERO KETCHUP 397g	
	PAMPERO KETCHUP 198g	
SALSA A BASE DE TOMATE	PAMPERO SALSA BASE TOMATE 4,2 Kg	

MERMELADAS	LA VIENESA FRESA 240g	
	LA VIENESA GUAYABA 240g	
	LA VIENESA FRESAMORA 240g	
QUESOS	RIKESA QUESO BLANCO 200g	
	RIKESA QUESO PARMESANO 200g	
	RIKESA QUESO ORIGINAL 200g	
	RIKESA QUESO ORIGINAL 300g	
	RIKESA TOCINETA 300g	

Fuente: Empresas Polar (2023).

Ahora bien, para conocer cómo opera Empresas Polar, es importante notar que desarrolla su cultura organizacional a partir de los siguientes pilares:

- **Quehacer:** La actividad cotidiana de Empresas Polar es producir, distribuir y ofertar marcas de alimentos y bebidas que satisfagan las necesidades y expectativas de los consumidores, con la mejor calidad y la mejor relación precio-valor. *“Transformamos las dificultades en oportunidades, buscando contribuir a la calidad de la vida diaria de todas y cada una de las personas con las que nos relacionamos, enfocados en nuestra Razón de Ser, Valores y Principios.”*
- **Razón de Ser:** En Empresas Polar el sentido de nuestro trabajo es contribuir a la calidad de la vida cotidiana de los venezolanos y sus familias, por medio de una amplia y accesible oferta de excelentes marcas de alimentos y bebidas, con la mejor relación precio-valor. Cada uno de nosotros trabaja con pasión aportando al bien de las personas, de las comunidades y del país. Nuestro trabajo está al servicio del bien individual y común, en la medida en que cumplimos con los diferentes grupos relacionados y participamos solidariamente con los sectores más vulnerables de la población.
- **Factores distintivos:** En esta sección, se engloban elementos que capturan la esencia de la empresa estudiada, como los principios y valores que rigen sus acciones. Así mismo, a efectos del propósito de la presente investigación y para conocer el compromiso de la compañía con la conservación ambiental, se enuncia la Política Ambiental de Empresas Polar, como también su Política para la Gestión del Agua.

Cuadro 5. Principios de Empresas Polar

Respeto Mutuo	Libertad Responsable	Justicia	Solidaridad
Respetar es actuar o dejar de actuar, procurando no perjudicar ni dejar de beneficiarse a sí mismo ni a los demás. Tenemos derecho a ser respetados y el deber de respetar a las otras personas, sentando las bases para la convivencia, el diálogo y la colaboración.	Creemos que las personas están dotadas de conciencia, voluntad y posibilidades de libre elección. Consideramos que el derecho a la libertad individual de elegir debe estar enmarcado en el deber de responder a los otros por los efectos de dicha elección.	Entendemos la Justicia como la voluntad permanente de dar, reconocer y respetar a cada quien lo que le corresponda. Creemos en la igual dignidad del valor de la vida de cada persona y su diversidad de aportes, para crear condiciones de justicia para todos, al interior de nuestra organización.	Significa concebimos como parte integrante del todo, involucrarnos, identificarnos y actuar con determinación firme y perseverante por el bien común, es decir, por el bien de todos y de cada uno.

Fuente: Empresas Polar (2023).

Cuadro 6. Valores de Empresas Polar

Integridad	Excelencia	Alegría	Pasión por el bien
Implica ser fiel a las propias convicciones. Es "hacer lo correcto", entendido como actuar con honestidad, rectitud, respeto y responsabilidad, cumpliendo con nuestros deberes y obligaciones, conforme a nuestra Razón de ser, Principios y Valores.	Implica dedicación, esfuerzo y cuidado por la obra bien hecha. Lograr un nivel superior de calidad y seguridad en procesos, productos y servicios, en busca de proveer la mejor contribución para el beneficiario.	Energía positiva que ponemos en todo lo que hacemos, con las personas con quienes interactuamos, y celebramos nuestros logros. Es el gozo constante y contagioso del bien. Alegría que se ofrece y se comparte con nuestros productos.	Amor, entusiasmo y esmero con el que trabajamos para cumplir con nuestra gente. Es buscar el bien del otro, compartir y entregarse sin limitar los esfuerzos; siempre y cuando no lesionen a las otras personas, ni a quién lo realiza.

Fuente: Empresas Polar (2023).

Cuadro 7. Políticas Ambientales de la Organización

Política Ambiental de Empresas Polar
<p>Es compromiso de Empresas Polar minimizar el impacto de sus operaciones en el medio ambiente. Para ello, hace uso ecoeficiente de los recursos e incorpora procesos de reducción, reúso y reciclaje, que le permiten ofrecer productos más competitivos para satisfacer a sus clientes, consumidores y a la sociedad.</p> <p>Estos resultados se obtienen mediante un sistema de gestión ambiental responsable que se fundamenta en la mejora continua, la capacitación de personal y la aplicación de auditorías en toda la cadena de valor.</p>

Política de Empresas Polar para la Gestión del Agua

Es compromiso de Empresas Polar hacer un **aprovechamiento sustentable del agua** requerida para sus procesos, en las etapas de captación, uso y descarga, entendiendo que este recurso es indispensable para la continuidad de sus operaciones, la disponibilidad de sus productos y la satisfacción de las necesidades de su entorno.

Principios:

- Utilizar tecnologías de tratamiento que le permitan asegurar la calidad requerida para la elaboración de los productos.
- Evaluar constantemente los procesos, con el fin de identificar e implementar oportunidades de reducción del consumo, para consolidar el uso ecoeficiente del agua, la minimización del volumen de efluentes y la mejora continua.
- Utilizar tecnologías de tratamiento que le permitan asegurar la calidad requerida para la descarga de los efluentes, minimizando el impacto sobre los cuerpos de agua.
- Promover la conciencia del uso racional y el manejo adecuado del agua en los trabajadores y grupos relacionados.
- Proporcionar relaciones con las empresas hidrológicas para que éstas puedan garantizar el suministro de agua a las comunidades más vulnerables lindantes a establecimientos polar.

Fuente: Empresas Polar (2023).

Alimentos Polar Comercial cuenta con un instructivo para el **Manejo de Efluentes o Vertidos Líquidos**, donde se establecen lineamientos para planificar, ejecutar y controlar las actividades de generación, tratamiento y descarga de los efluentes o vertidos líquidos producidos en los establecimientos, con la finalidad de asegurar el cumplimiento de las regulaciones ambientales venezolanas que apliquen a esta actividad. A continuación, se mencionarán algunas normativas presentes en este instructivo que conciernen a la investigación.

✓ Normativas Relativas al Tratamiento de los Efluentes

- Todo efluente generado en las plantas, que no se encuentre dentro de los límites de calidad de vertidos, deberá ser tratado previo a su descarga.
- El tratamiento de dichos efluentes deberá realizarse según los procedimientos e instructivos de operación establecidos por el sistema instalado.
- El encargado del área deberá asegurar el cumplimiento del mantenimiento preventivo de los equipos del sistema de tratamiento de aguas residuales.

- El encargado del área deberá llevar registro mensual del volumen del efluente tratado.
- De planificarse una parada de la planta de tratamiento de aguas residuales por actividades de mantenimiento que afecten la calidad del efluente final, se deberá notificar con tres (3) meses de anticipación al Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (MINAMB).

✓ **Normativas Relativas a la Descarga del Efluente**

No se deberán llevar a cabo las actividades listadas a continuación, su realización puede incurrir en sanciones administrativas o penales:

- Mantener en funcionamiento una instalación o realizar una actividad que descargue efluentes sin cumplir con los límites de calidad de vertidos, a menos que esté en curso un Plan de Adecuación aprobado por el MINAMB.
- Verter materiales no biodegradables, sustancias, agentes biológicos, o bioquímicos, efluentes o aguas residuales no tratadas en los cuerpos de agua, sus riberas, cauces, cuencas, mantos acuíferos, lagos, lagunas o demás depósitos de agua.
- Descargar, infiltrar o inyectar en el suelo o subsuelos vertidos líquidos contaminantes.
- Descargar desechos sólidos a los cuerpos de agua y a las redes cloacales.
- Diluir efluentes con agua limpia para cumplir los límites permisibles.

En efecto, Alimentos Polar Comercial – “Planta Salsas y Untables” posee un marco formal para implementar una **gestión ambiental responsable**. A partir del año 2009, Empresas Polar ha aplicado procesos continuos de diagnóstico y análisis de sus prácticas, siguiendo normativas internacionales como la **Norma ISO 26000: Guía de Responsabilidad Social y Global Reporting Initiative (GRI)**, ambas enfocadas en establecer un Modelo de Gestión de Compromiso Social y Desarrollo Sostenible (CSDS), así mismo, la corporación incluye indicadores propios según las necesidades existentes.

Su compromiso lo demuestran no sólo cumpliendo con una labor industrial consciente y con la normativa legal vigente, agregan el tomar iniciativas (basadas en la mejora continua, la ecoeficiencia y la sustentabilidad), para alcanzar un uso óptimo de los recursos involucrados, disminuir la generación de residuos y promover una cultura en sus trabajadores de responsabilidad ecológica.

4.1.2 Proceso de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales.

La planta de tratamiento de aguas residuales en Alimentos Polar Comercial – “Planta Salsas y Untables” comprende procesos diversos, donde se ocupan operaciones físicas, procesos químicos y procesos biológicos, con el objetivo de entregar un efluente tratado dentro de los límites de confianza para su posterior vertimiento en un cuerpo acuífero protegido.

El proceso para el tratamiento de las aguas residuales comienza con la captación de los efluentes líquidos provenientes de las zonas productivas. El remanente de líquido generado a partir de la producción de la línea de productos, higienización de áreas productivas, derrames de tanques y aguas pluviales, confluye hasta la tanquilla principal, ubicada en las afueras de la planta de tratamiento de aguas residuales. A continuación, en la figura 14 se muestra el aspecto físico de la tanquilla principal, donde se pueden observar las tuberías de entrada de residuos a tratar y grasas libres en la superficie.



Figura 14. Tanquilla Principal de planta de tratamiento

Fuente: Cerezo, 2023.

Seguidamente, el residuo es bombeado hasta la **unidad de separación por flotación** (figura 15), identificado como **raspanatas**. Se trata de una operación física unitaria donde un

mecanismo barredor de acero inoxidable, consigue separar las partículas sólidas superficiales de la fase líquida

De manera específica, este equipo es empleado con el propósito de recoger las grasas libres que flotan sobre el líquido y tiene una capacidad de $12 m^3$. Al finalizar esta etapa del tratamiento, las grasas separadas son depositadas en una tanquilla recolectora y posteriormente, son dirigidas por el sistema de bombeo hasta los tanques de producto no conforme (PNC).



Figura 15. Raspanatas de planta de tratamiento

Fuente: Cerezo, 2023.

Por su parte, la fase líquida separada llega a la estación de bombeo $n^{\circ} 1$, donde un indicador de nivel flotante se encarga de activar la bomba que lleva el agua a los **tanques homogenizadores**. El tratamiento dado en estos tanques homogenizadores consiste en amortiguar las variaciones de caudal, con el objeto de conseguir un caudal constante o casi constante (Metcalf y Eddy, 1995). Además, reduce o elimina las cargas de choque, estabiliza el pH, como también mejora la calidad del efluente al entregar concentraciones de sólidos constantes. De esta manera, contribuye a la uniformidad para la fluidez del tratamiento.

En la figura 16 se pueden apreciar los tres tanques homogenizadores, los cuales están interconectados en la parte inferior, ello con la intención de permitir establecer distintos métodos de operación para armonizar el líquido dependiendo de la calidad del afluente recibido. Cuentan

con una línea de recirculación, como también una tubería donde se comunican directamente con la tanquilla principal, así pues, evitando la unidad de separación por flotación o raspanatas.

Al finalizar esta etapa, el agua pasa por un indicador de flujo instantáneo y acumulado, para dirigirse hacia el **sistema de tratamiento fisicoquímico**.



Figura 16. Tanques Homogenizadores de planta de tratamiento

Fuente: Cerezo, 2023.

Este tratamiento, se realiza con la intención de lograr la clarificación del efluente al separar los sólidos suspendidos o sustancias disueltas con ayuda de productos químicos. En esta etapa, son dosificados coagulantes, para neutralizar las cargas eléctricas de los residuos sólidos y floculantes, capaces de unir las partículas en grandes grupos, denominados flóculos. Posteriormente, se segregan los flóculos en unidades de filtración, flotación o sedimentación. En la planta de tratamiento de aguas residuales caso estudio, se tienen dos unidades encargadas de la mezcla del agua con los productos químicos (Figura 17):

- El **tanque de mezcla rápida**, con dimensiones 1,5 metros de alto, 3,2 metros de ancho y 6 metros de largo, tiene la capacidad de almacenar hasta $15,43 m^3$, cuenta con tres motores reductores generando el movimiento para el mezclado. En uno de sus extremos recibe el agua proveniente de los tanques homogenizadores y se es dosificado el coagulante: sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$), encargado de desestabilizar las grasas emulsionadas presentes en el líquido. En su otro extremo, se agrega polímero líquido, tomando el papel de floculante: tiene la virtud de agrupar los sólidos en flóculos livianos flotantes.

- Seguidamente, el agua llega hasta el **tanque de mezcla lenta**, con dimensiones 2,2 metros de alto, 1,7 metros de ancho y 2 metros de largo, tiene una capacidad de almacenar hasta $7,62 m^3$, cuenta con un único motor reductor, que realiza su movimiento de forma pausada. Esta unidad tiene el trabajo de favorecer la agrupación de los flóculos livianos formados, mediante la agitación paulatina. Cuando se generan grandes agrupaciones de sólidos, al llegar al equipo encargado de la separación líquida-sólida, el tratamiento se hará de forma efectiva.



Figura 17. Tanque de Mezcla Rápida y Tanque de Mezcla Lenta.

Fuente: Cerezo, 2023.

Finalmente, la combinación de agua residual clarificada y sólidos formados confluye hasta la **unidad de flotación por aire disuelto n° 1** (DAF n° 1), observada en la figura 18. Con un régimen de funcionamiento parecido al del raspanatas, se trata de un mecanismo capaz de remover los sólidos suspendidos en el agua por medio de la flotación. Su diferencia radica en la recirculación de una fracción del agua clarificada hasta un sistema de saturación, donde también es inyectado aire presurizado que, al ser despresurizado en su entrada a la unidad, provoca la formación de burbujas finas. Estas burbujas finas están encargadas de elevar los sólidos a la superficie del líquido y permiten que el tratamiento tenga una mayor eficiencia en remoción de sólidos. Los sólidos que son removidos caen en una tolva metálica con dirección a una fosa de lodos y de allí, son bombeados hasta el **espesador de lodos**, cuyo destino final es dispuesto por Desechos Sólidos Carabobo (Desoca C.A).



Figura 18. Unidad DAF n° 1.

Fuente: Cerezo, 2023.

Continuando, el agua clarificada llega hasta la estación de bombeo n° 2 y por medio de succión es elevada hasta el **reactor biológico** (figura 19) de la planta de tratamiento, su forma es cilíndrica con un nivel operativo de 8,59 metros y diámetro de 12,3 m. El tipo de tratamiento llevado a cabo es de lodos activados con digestión aeróbica, realizado con el propósito de eliminar la fracción contaminante biodegradable del agua residual (DBO) a través de la depuración natural, llevada a cabo por los microorganismos presentes en el líquido, capaces de convertir la materia orgánica disuelta en nuevas bacterias, dióxido de carbono y agua.

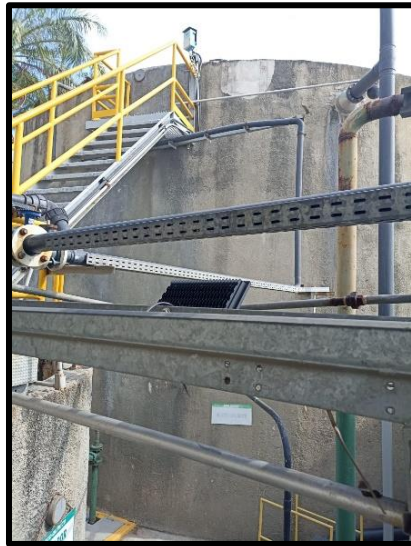


Figura 19. Reactor Biológico de planta de tratamiento.

Fuente: Cerezo, 2023.

La biomasa generada se mantiene suspendida en el reactor y se mezcla con el agua residual para llevar a cabo el tratamiento, el mezclado es posible gracias a sopladores con difusores de membrana de burbuja fina, que, además, proporcionan el oxígeno necesario para la supervivencia de las bacterias.

La combinación de agua tratada y biomasa llega por gravedad hasta la **unidad de flotación por aire disuelto n° 2** (DAF n° 2), observado en la figura 20, con una capacidad hidráulica de 14 l/s, másica de 160 kgSST/h y volumétrica de $0,8 m^3$. En dirección al equipo, parte del polímero líquido preparado para el tratamiento fisicoquímico es dosificado, pretende facilitar la separación del lodo biológico mediante la formación de flóculos. Para proporcionar el tiempo de reacción adecuado, es empleada una tubería de floculación en lugar de agitadores.



Figura 20. Unidad DAF n° 2.

Fuente: Cerezo, 2023.

Al llegar a la unidad DAF n° 2, el procedimiento es similar al utilizado en el tratamiento fisicoquímico: igualmente, consiste en un movimiento de raspado en contra de la corriente hidráulica, capaz de recoger los sólidos suspendidos e impedir su arrastre hasta fuera de la unidad. Cuenta con una tubería de recirculación del agua clarificada, dirigida hacia un tanque hidroneumático para la presurización del aire, que posteriormente, es inyectado mediante mangueras y provoca la formación de burbujas finas, ocupadas de elevar las partículas sólidas para su remoción.

Los sólidos sedimentados en el fondo del equipo son expulsados por medio de válvulas neumáticas y luego, se unen con los sólidos recogidos por el movimiento de raspado, para ser dirigidos por gravedad hasta la **estación de bombeo n° 3**. Este conjunto de bombas tiene el trabajo de enviar una fracción del lodo recogido al **espesador de lodos**, mientras que, la otra fracción es

dirigida nuevamente al reactor biológico, para así mantener el balance de la biomasa dentro del sistema.

Por su parte, el agua clarificada a partir del tratamiento es dirigida por gravedad hasta la canal municipal, este a su vez, confluye hasta el río Los Guayos, el cual desemboca en la cuenca del Lago de Valencia, con una extensión de 420 m². En la figura 21, se visualiza el recorrido que realiza el recurso hídrico tratado hasta la cuenta endorreica, cuenta con influencia de 11 municipios del estado Aragua y 9 del estado Carabobo. Significa entonces que, la calidad del agua que proviene de la planta de tratamiento debe cumplir con lo establecido en el Decreto 3.219

Figura 21. Mapa Hidrográfico del Lago de Valencia.



Fuente: Ruíz, 2021.

Después de lo anterior expuesto, se graficaron cada una de las operaciones realizadas en el tratamiento de aguas industriales de la empresa estudiada (Ver figura 22 y 23). El proceso es dividido en tres etapas: pretratamiento, tratamiento primario y tratamiento secundario, contando con recirculaciones, así como bypass para conseguir la mayor eficiencia posible en el proceso de tratamiento.

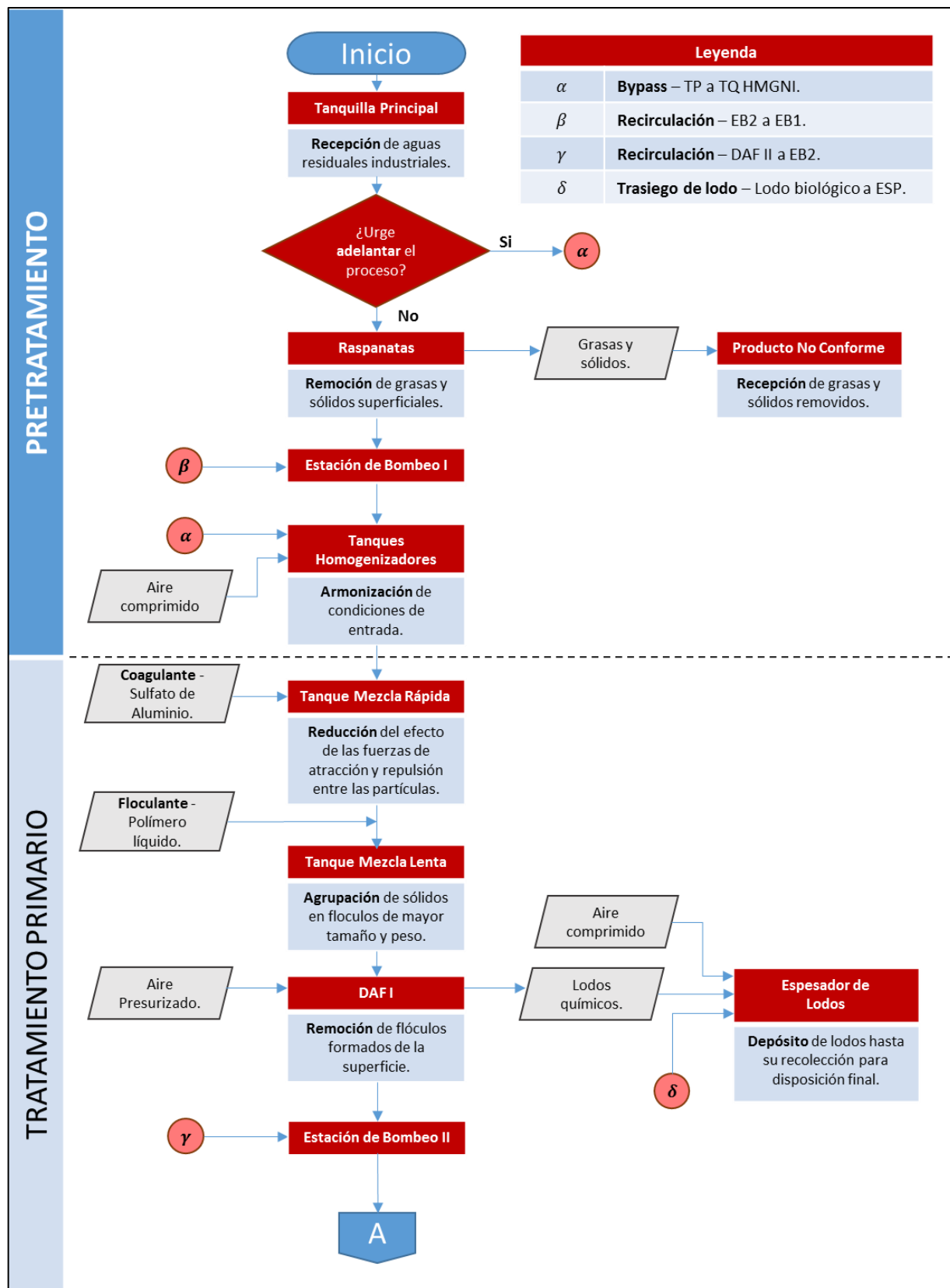


Figura 22. Diagrama de flujo del Pretratamiento y Tratamiento Primario.
Elaborado por: Cerezo, 2023.

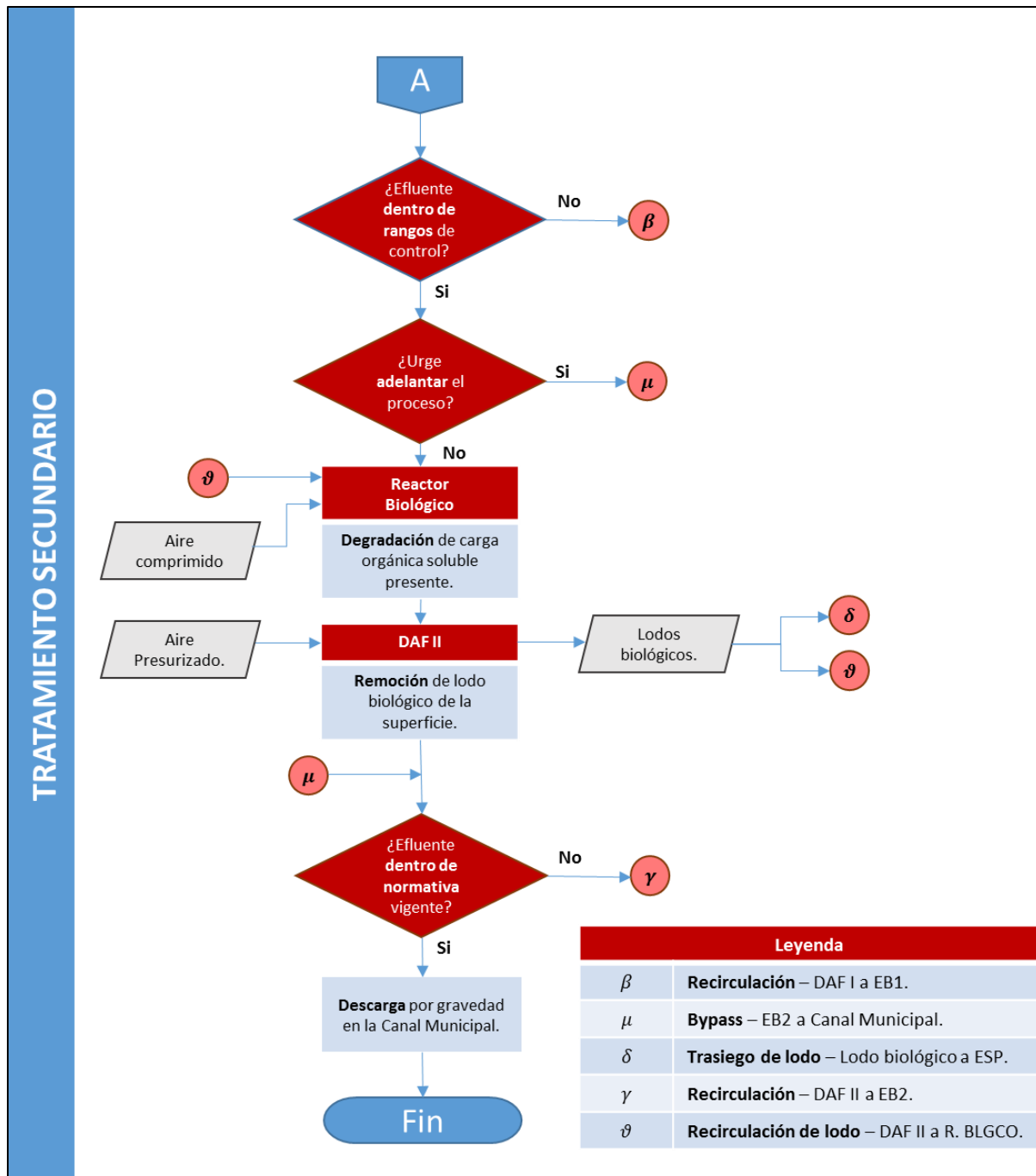


Figura 23. Diagrama de flujo del Tratamiento Secundario.

Elaborado por: Cerezo, 2023.

4.1.3 Diagramas esquemáticos de equipos del sistema de tratamiento biológico.

Los siguientes diagramas pertenecen a documentación de la empresa, son presentados con el fin de hacer énfasis en las condiciones de funcionamiento del sistema biológico, así como de verificar la funcionalidad y existencia de los equipos e instrumentos descritos en cada uno de ellos.

a. Reactor Biológico de la planta de tratamiento.

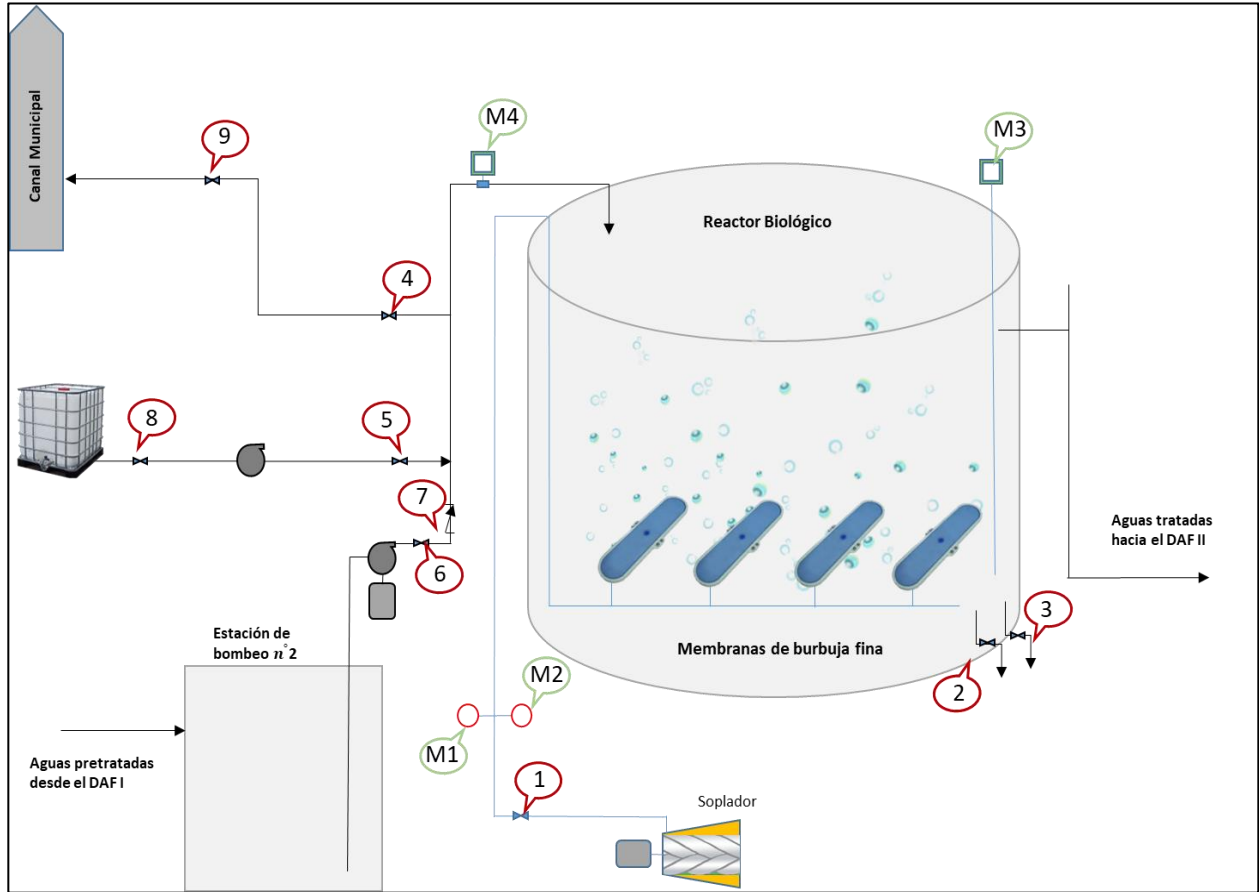


Figura 24. Diagrama esquemático de Reactor Biológico.

Fuente: Alimentos Polar, 2023.

Cuadro 8. Válvulas e instrumentos relacionados al Reactor Biológico.

Lista de válvulas de proceso	Ubicación/Punto de Operación	Lista de Instrumentos	Punto de Operación
V1	Alimentación de aire.	Manómetro (M1)	Entrada de aire
V2	Descarga del Reactor (A).	Termómetro (M2)	Entrada de aire
V3	Descarga del Reactor (B).	Medidor de oxígeno disuelto (M3)	Reactor Biológico
V4	Bypass.	Medidor de caudal (M4)	Entrada de agua
V5	Entrada de nutrientes.	Observaciones	
V6	Alimentación al Reactor.	Actualmente, el reactor biológico no recibe alimentación de nutrientes. Las descargas A y B, no son utilizadas. El medidor de oxígeno disuelto no se encuentra operativo, así como el medidor de caudal y el termómetro.	
V7	Válvula Antirretorno.		
V8	Apertura y cierre de nutrientes.		
V9	Descarga de Bypass.		

Elaborado por: Cerezo, 2023.

b. Unidad de flotación por aire disuelto.

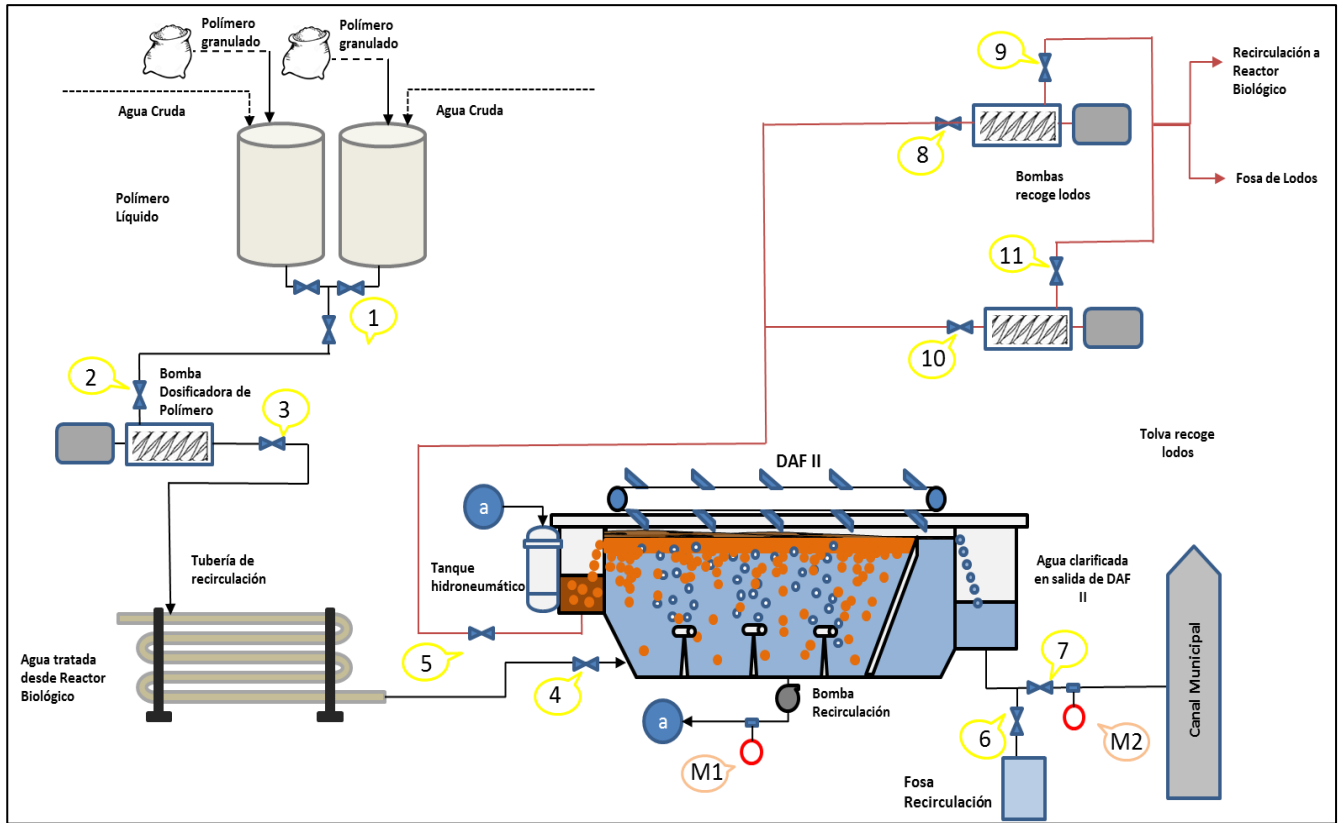


Figura 25. Diagrama esquemático de DAF II.

Fuente: Alimentos Polar, 2023.

Cuadro 9. Válvulas e instrumentos relacionados al DAF II.

Lista de válvulas de proceso	Ubicación/Punto de Operación	Lista de Instrumentos	Punto de Operación
V1	Salida Polímero Líquido.	Medidor de Caudal (M1)	Recirculación
V2	Entrada B. Dosificadora	Medidor de Caudal (M2)	Salida de agua
V3	Salida B. Dosificadora.	Observaciones	
V4	Alimentación DAF II.	Como se explica en la descripción del proceso, existe una recirculación del agua clarificada y se combina con aire presurizado en el tanque hidroneumático. De esta manera, es inyectado aire a la parte inferior del DAF II y así, se generan las burbujas finas. Las láminas encargadas del raspado logran el movimiento mediante cadenas.	
V5	Salida de Lodo DAF II.		
V6	Recirculación de Agua.		
V7	Salida de Agua a C. Municipal.		
V8/V10	Entrada B. recoge lodos.		
V9/V11	Salida B. recoge lodos.		

Elaborado por: Cerezo, 2023.

4.1.4 Comportamiento del sistema biológico.

Para gestionar el tratamiento aplicado, se debe considerar la amplitud del portafolio de productos de la empresa, esto provoca que las características del afluente a la planta de tratamiento varíen con frecuencia. Se revisaron **registros de los parámetros** medidos por los operadores en los meses de octubre, noviembre y diciembre del año 2022, en el punto de inspección del agua dirigida al reactor biológico y en la salida de la planta de tratamiento. Los resultados del estudio se encuentran resumidos en el cuadro 10.

Cuadro 10. Características de los afluentes y efluentes del reactor biológico en la planta de tratamiento de aguas residuales industriales.

Característica de Inspección	Punto de Inspección	Nomenclatura de característica	Intervalo Octubre 2022	Intervalo Noviembre 2022	Intervalo Diciembre 2022	Promedio	Zona de especificación
pH	ALIMENTACIÓN	pH	(5,80 - 7,19)	(5,03 - 7,33)	(4,99 - 6,54)	6,22	6 -- 9
Sólidos suspendidos totales (mg/L)		SST	(4 - 47)	(3 - 85)	(5 - 65)	16,42	≤ 500 mg/L
Demanda Química de Oxígeno (mg/L)		DQO	(619 - 1370)	(605 -1146)	(491 - 1153)	904,80	≤ 1.150 mg/L
Nitrógeno total (mg/L)		N	(0 - 2)	(0 - 20)	(1 - 3)	3,21	(30 -- 70) mg/L
Fósforo total (mg/L)		P	(0 - 2,9)	(0 - 0,7)	(0 - 4,2)	1,09	(5 -- 15) mg/L
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	REACTOR BIOLÓGICO	SST	(1400 - 2060)	(1001 - 1610)	(1040 - 1650)	1501,70	(1.000 -- 1.500) mg/L
Sólidos Sedimentables (ml/L)		VLS30	(260 - 350)	(200 - 350)	(290 - 350)	301,55	(500 -- 700) ml/L
Eficiencia (%)		η	(50% - 78%)	(52% - 88%)	(43% - 82%)	66%	
pH	DESCARGA	pH	(6,91 - 7,53)	(6,68 - 7,76)	(6,71 - 7,37)	7,20	6 -- 9
Sólidos suspendidos totales (mg/L)		SST	(10 - 57)	(9 - 50)	(6 - 21)	23,88	≤ 80 mg/L
Demanda Química de Oxígeno (mg/L)		DQO	(186 - 379)	(127 - 361)	(197 - 351)	296,18	≤ 350 mg/L
Nitrógeno total (mg/L)		N	(0 - 2)	(0 - 8)	(1 - 8)	2,89	≤ 10 mg/L
Fósforo total (mg/L)		P	(0 - 0,2)	0	(0 - 0,6)	0,14	≤ 1 mg/L
Caudal instantáneo (L/min)		Caudal inst	(3,58 - 15,31)	(8,9 - 16,193)	(9,1 - 15,10)	12,29	
Caudal acumulado (m3/d)		Caudal acum	(185,3 - 1143)	(415 - 1484)	(416 - 1065)	824,70	

Elaborado por: Cerezo, 2023.

En el cuadro es diferenciado el intervalo de los valores trimestrales, su promedio y la zona de especificación establecida en Alimentos Polar Comercial – “Planta Salsas y Untables”, subrayando en azul los límites para la descarga definidos en el Decreto 3.219 sobre las regulaciones en parámetros críticos de aguas que serán vertidas en la Cuenca del Lago de Valencia. A partir de él se pueden concluir los siguientes aspectos:

- La media de los parámetros críticos en los meses estudiados se encuentra dentro de las especificaciones legales. Sin embargo, algunas medidas de la demanda química de oxígeno (DQO) en la salida se encuentran cerca del límite establecido, con un promedio de remoción de carga orgánica del 66%.
- Así mismo, la variable crítica con el rango de variación más amplio en sus valores es la DQO en la alimentación al reactor biológico, oscilando desde 1370 mg/L hasta 491 mg/L.
- El volumen de agua tratado diariamente en la planta de tratamiento se encuentra con mayor frecuencia entre $815,34 \text{ m}^3/d$ y $1025,33 \text{ m}^3/d$.
- La concentración de sólidos suspendidos dentro del reactor, generalmente se encuentra entre 1342 mg/L y 1511 mg/L.

Los especialistas del área de servicios en la empresa estudiada concluyeron, por medio de ensayos aplicados a las aguas residuales tratadas, que los sólidos suspendidos volátiles (SSV), aquellos microorganismos que realizan la depuración de las aguas residuales representan un 0,7 de los sólidos suspendidos totales en el licor mixto. Igualmente, concluyeron que la porción biodegradable de la DQO, es decir, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), representa un 0,8 de la DQO.

4.1.5 Resultado de la lista de observación aplicada al sistema biológico de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Se utilizó la lista de observación como un instrumento capaz de identificar las debilidades operacionales dentro del tratamiento biológico. En la columna derecha fueron descritos comportamientos o acciones que colaboran a caracterizar las condiciones de operación, la columna central define si el aspecto forma parte del proceso o no, y finalmente, la última columna está compuesta por observaciones realizadas por el investigador. Esta herramienta fue evaluada durante tres semanas de trabajo en la planta de tratamiento de aguas residuales de Alimentos Polar Comercial – Planta “Salsas y Untables”.

Cuadro 11. Lista de observación de sistema de tratamiento biológico enfocada en disponibilidad de los equipos y normalización de las operaciones.

LISTA DE OBSERVACIÓN PARA INSPECCIÓN			
ÁREA: Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR)		FECHA: 03/01/23	
UBICACIÓN: Alimentos Polar Comercial – Planta “Salsas y Untables”.		ENCARGADO: Isis Cerezo	
Estandarización	SI	NO	Observaciones
¿Los procedimientos a seguir están establecidos en un manual de procedimientos?		X	No cuenta con un manual de instrucciones propio o del fabricante. Sin embargo, dentro de las instalaciones se mantienen elementos gráficos que definen procesos particulares. Cada operador tiene una forma particular de operar la PTAR.
¿Están definidos los parámetros de calidad medidos en el sistema biológico?	X		Los operadores tienen una lista y registro de variables críticas operacionales que deben evaluar una vez durante su turno.
¿El sistema biológico trabaja continuamente sin fallas que afecten directamente a la productividad?		X	Constantemente ocurren descompensaciones, su duración es hasta que el operador haya realizado una estrategia para la recuperación del sistema.
Operación	SI	NO	Observaciones
¿Los operadores hacen inspecciones a los elementos que conforman el sistema biológico durante su jornada?	X		Se acercan con frecuencia a verificar el nivel del reactor al verse afectado por el aumento del caudal y a evaluar la recolección del lodo en la unidad DAF II, para evitar el vertimiento de partículas biológicas.
¿La dosis de polímero añadida al sistema biológico tiene un valor estandarizado?		X	Es ajustable por los operadores según su criterio de decisión al observar la cantidad de sólidos afluentes al DAF.
¿Los operadores practican el mantenimiento autónomo en los equipos que conforman el sistema biológico?	X		Al ocurrir una falla el operador intentará resolverla por su cuenta, en consideración de su experiencia para una operación más eficiente.
¿Se tiene un registro de las fallas ocurridas en el sistema biológico?		X	
Distribución	SI	NO	Observaciones
¿La distribución actual del sistema biológico permite un recorrido corto para el agua residual?	X		
¿La distribución actual del sistema biológico le permite modificarse para satisfacer necesidades de ampliación en la producción?		X	Debido al poco espacio disponible, la ubicación de los equipos no permite modificaciones físicas significativas.

Fuente: Cerezo, 2023.

Al evaluar los resultados los resultados obtenidos a partir de la lista de observación enfocada en **disponibilidad de los equipos y normalización de las operaciones**, demuestran que el sistema biológico cumple con un 44% de los requerimientos recopilados por el investigador (Figura 26).

DISPONIBILIDAD DE EQUIPOS Y NORMALIZACIÓN DE PROCEDIMIENTOS

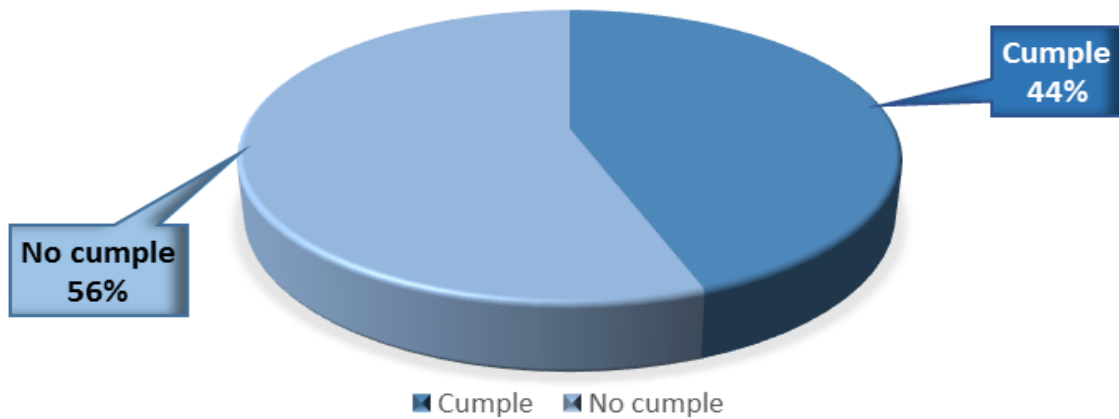


Figura 26. Resultados de la lista de observación (Disponibilidad de equipos y Normalización de Operaciones).

Elaborado por: Cerezo, 2023.

Las mayores debilidades detectadas fueron la falta de estandarización de los procedimientos operativos, la ausencia del registro de fallas, operación discontinua y la poca flexibilidad de la distribución actual de los equipos para futuras modificaciones.

4.1.6 Resultado de la entrevista aplicada al personal que opera el sistema biológico.

Fue aplicada una entrevista estructurada a los operadores de la planta de tratamiento de aguas residuales, con autorización previa otorgada por la Gerencia Corporativa de Aguas y Servicios. Este grupo se seleccionó basado en que los operadores están en contacto diariamente con la actividad dada en el sistema biológico, así, se vuelven una fuente importante para entender las condiciones actuales de operación. Además, es de interés del estudio el conocimiento que manejan alrededor del tratamiento biológico, como un precedente para detectar necesidades de capacitación (Ver cuadro 12, 13 y 14).

Cuadro 12. Entrevista a operador 1.

Cargo: Técnico de servicios industriales.		
Item	Preguntas	Respuestas
1	Según su criterio, ¿qué etapa del tratamiento del agua residual industrial requiere su mayor atención y control? ¿Por qué?	“El agua de salida hacia la canal municipal, porque define la calidad del tratamiento realizado en la PTAR y evita colaborar a la contaminación del Lago de Valencia.”
2	¿Cuáles son los efectos potenciales de verter aguas residuales que no cumplen con los estándares de calidad en cuerpos hídricos?	“Es dañino. Al tratar el agua, enviamos un líquido puro hacia la canal municipal y provee mayor confiabilidad.”
3	¿Usted ha recibido formación previa entorno al funcionamiento del tratamiento biológico de las aguas residuales? Indicar qué temas abordaron en la capacitación si es el caso.	“Sí. Los temas tratados en la capacitación fueron el cómo utilizar los químicos presentes en la separación del lodo, estos son sulfato de aluminio y polímero.”
4	¿Cómo describiría el rendimiento del sistema biológico de la planta de tratamiento de aguas residuales? Es decir, reactor biológico y el equipo de flotación por aire disuelto.	“Actualmente es deficiente. Antes era menor caudal de agua, ahora, con el crecimiento de la producción llega más agua, se necesita más capacidad para no sobrecargar al DAF II.”
5	¿Cuál es la capacidad de tratamiento real con la que funciona diariamente el sistema de tratamiento biológico? En términos de concentración de carga orgánica y volumen de agua tratado.	“La cantidad de agua tratada dependerá de la producción y de los residuos a partir de la higienización en las áreas. Generalmente, trabajamos con 12 l/s. Por otro lado, la carga orgánica es muy cambiante.”
6	¿Con qué frecuencia es realizado mantenimiento a los equipos que forman parte del sistema de tratamiento biológico?	“El mantenimiento lo hacemos siempre en las paradas largas, que se dan en semana santa o en diciembre. Tomando en cuenta que requeriría detener la planta de tratamiento, y en consecuencia, detener la producción de la empresa.”
7	¿Qué parámetros químicos y/o biológicos son críticos para asegurar la calidad del agua efluente del reactor biológico?	“La demanda química de oxígeno, así como la cantidad de sólidos que están en el agua de salida”.
8	¿Cuáles las normativas aplicadas para regular los parámetros críticos de calidad en el efluente de salida del reactor biológico?	“Las leyes enfocadas en el medio ambiente.”
9	Actualmente, ¿existen desviaciones importantes en dichos parámetros? Indicar porcentajes o valores significativos si es el caso.	“Los parámetros cambian constantemente. Las aguas vienen de producción: pueden ser de tomate, margarina, aceite, vinagre, queso, pozo barométrico y los residuos que caen en las calles. Los parámetros que varían según el tipo de agua son el color, los sólidos suspendidos y el pH. Por ejemplo, si es agua

		de vinagre el pH baja hasta 5, pero si es agua del pozo barométrico puede subir hasta 12. Lo puedes ver con los análisis, pero visualmente también conoces qué está llegando y qué puedes hacer.”
10	¿Cuentan con estrategias de control en caso de una descompensación temporal en el sistema de tratamiento biológico?	“Disminuímos el caudal de agua tratado, para generar una condición favorable donde la DAF II pueda recoger el lodo y controlar el nivel del reactor biológico.”

Fuente: Cerezo, 2023.

Cuadro 13. Entrevista a operador 2.

Cargo: Técnico de servicios industriales.		
Item	Preguntas	Respuestas
1	Según su criterio, ¿qué etapa del tratamiento del agua residual industrial requiere su mayor atención y control? ¿Por qué?	“El tratamiento físico-químico. Debido a que debemos evaluar parámetros regularmente para poder dosificar químicos y entregar un agua con cierta calidad.”
2	¿Cuáles son los efectos potenciales de verter aguas residuales que no cumplen con los estándares de calidad en cuerpos hídricos?	“Es delicado, puede incluir problemas legales por contaminación ambiental para la empresa. Hasta el Lago de Valencia hay muchas poblaciones, si vertemos agua contaminada podemos afectar a la salud de estas comunidades. Incluso el agua tratada puede generar contaminación, por eso es importante que existan regulaciones.”
3	¿Usted ha recibido formación previa entorno al funcionamiento del tratamiento biológico de las aguas residuales? Indicar qué temas abordaron en la capacitación si es el caso.	“No. No he recibido.”
4	¿Cómo describiría el rendimiento del sistema biológico de la planta de tratamiento de aguas residuales? Es decir, reactor biológico y el equipo de flotación por aire disuelto.	“Muy bueno, sin embargo, no es suficiente para la cantidad de agua a tratar, a veces nos quedamos cortos. Se han hecho modificaciones anteriores para aumentar la capacidad, como remover el clarificar dentro del reactor biológico para tener más espacio dentro del reactor.”
5	¿Cuál es la capacidad de tratamiento real con la que funciona diariamente el sistema de tratamiento biológico? En términos de concentración de carga orgánica y volumen de agua tratado.	“Lo podemos consultar en la data que se lleva diariamente. En relación al tratamiento de agua por flujo, la entrada se mantiene en 14 l/s a 15 l/s, hasta 17 l/s en condiciones extremas.”

6	¿Con qué frecuencia es realizado mantenimiento a los equipos que forman parte del sistema de tratamiento biológico?	“Las limpiezas son las más comunes, así como mantenimiento preventivo a los motores. La frecuencia dependerá del equipo y de su criticidad para el proceso. Se realizan inspecciones mensuales, trimestrales y anuales”.
7	¿Qué parámetros químicos y/o biológicos son críticos para asegurar la calidad del agua efluente del reactor biológico?	“Demanda química de oxígeno, pH de salida y cantidad de sólidos. Estos tres parámetros te permiten definir cómo está trabajando la planta.”
8	¿Cuáles las normativas aplicadas para regular los parámetros críticos de calidad en el efluente de salida del reactor biológico?	“Contamos con una normativa interna que está adaptada a la nacional, con rangos permisibles para trabajar los parámetros críticos.”
9	Actualmente, ¿existen desviaciones importantes en dichos parámetros? Indicar porcentajes o valores significativos si es el caso.	“Dependiendo del efluente de planta, habrán variaciones importantes en los parámetros. Aquí hay muchos procesos, además de lavado, higiene, barridos de grasas del piso y limpiezas de las calles. Hay una gran variedad de calidades de agua que entran.”
10	¿Cuentan con estrategias de control en caso de una descompensación temporal en el sistema de tratamiento biológico?	“En caso de descompensación agregamos nutrientes, para permitir la supervivencia de los microorganismos encargados de depurar el agua residual. Si no contamos con el soplador para la aireación, podemos suministrar desde el pulmón de aire comprimido. En el escenario de tener un alto nivel del reactor, se apaga el soplador para la decantación de los sólidos, permitiendo que el agua clarificada fluya hasta el DAF II.”

Fuente: Cerezo, 2023.

Cuadro 14. Entrevista a operador 3.

Cargo: Técnico de servicios industriales.		
Item	Preguntas	Respuestas
1	Según su criterio, ¿qué etapa del tratamiento del agua residual industrial requiere su mayor atención y control? ¿Por qué?	“La etapa de tratamiento físico-químico y la salida del reactor biológico. La primera porque tienes que eliminar la mayor cantidad de sólidos para evitar que afecten la eficiencia del reactor. La última, porque no se puede enviar a la canal municipal agua con lodo biológico.

		Además de ello, hay que estar pendiente de la aireación en el reactor biológico, para que las bacterias no se mueran.”
2	¿Cuáles son los efectos potenciales de verter aguas residuales que no cumplen con los estándares de calidad en cuerpos hídricos?	“Contaminación, ya que se estaría vertiendo agua no tratada en la canal municipal y la empresa recibiría una multa.”
3	¿Usted ha recibido formación previa entorno al funcionamiento del tratamiento biológico de las aguas residuales? Indicar qué temas abordaron en la capacitación si es el caso.	“No. La formación que tuve fue muy poca, fui aprendiendo con la práctica y entre los operadores nos damos indicaciones. No recibí información sobre la teoría detrás del tratamiento.”
4	¿Cómo describiría el rendimiento del sistema biológico de la planta de tratamiento de aguas residuales? Es decir, reactor biológico y el equipo de flotación por aire disuelto.	“Antes no se trataba tanta agua como se trata actualmente, por lo que podía trabajar sin interrupciones el reactor biológico, la DAF II, y el soplador. Ahora, tratamos más agua y considerando los cambios que se dan en las características como pH, DQO y sólidos, el tratamiento ha perdido su continuidad.”
5	¿Cuál es la capacidad de tratamiento real con la que funciona diariamente el sistema de tratamiento biológico? En términos de concentración de carga orgánica y volumen de agua tratado.	“Anteriormente, se trataban cuando mucho 8 l/s, ahora tratamos hasta 13 l/s. Esto dependerá de la cantidad de agua que llegue a la planta de tratamiento y de los niveles de los tanques de homogenización. Por lo tanto, el caudal tratado diariamente varía bastante.”
6	¿Con qué frecuencia es realizado mantenimiento a los equipos que forman parte del sistema de tratamiento biológico?	<p>“Practicamos mantenimiento autónomo, donde hacemos inspecciones para reconocer el estado de los equipos y reparaciones pequeñas. Como tal, el área de mantenimiento de la empresa define cuando se practicará mantenimiento preventivo en los equipos.</p> <p>El DAF recibe mantenimiento dependiendo de su comportamiento. Se va evaluando qué está fallando y se programa para arreglarlo en las paradas de diciembre o semana santa.</p> <p>Es importante recordar que no se puede detener el sistema de tratado de aguas, ya que es necesario si hay producción. Por ello, en días productivos se hacen reparaciones rápidas.”</p>

7	¿Qué parámetros químicos y/o biológicos son críticos para asegurar la calidad del agua efluente del reactor biológico?	“DQO, nitrógeno y fósforo, los cuales están regulados en la salida a la canal municipal.”
8	¿Cuáles las normativas aplicadas para regular los parámetros críticos de calidad en el efluente de salida del reactor biológico?	“No recuerdo si eran normas COVENIN o ISO. Entre los operadores nos hemos educado sobre la normativa.”
9	Actualmente, ¿existen desviaciones importantes en dichos parámetros? Indicar porcentajes o valores significativos si es el caso.	<p>“Los parámetros cambian según el área productiva que esté activa. En la entrada a PTAR, podemos ver la variación en el pH, por ejemplo, agua de vinagre lleva el pH hasta 4. Aunque también debemos considerar los sólidos suspendidos totales.</p> <p>A partir de conocer a estos valores en la entrada al físico-químico y determinar la dosificación de coagulante y floculante, nos aseguramos de entregar un agua que es tratable en el reactor biológico, con un pH casi constante.”</p>
10	¿Cuentan con estrategias de control en caso de una descompensación temporal en el sistema de tratamiento biológico?	<p>“Si el DAF II no logra recoger el lodo presente en el efluente del reactor piloto, se cierra la salida a la canal municipal y se hace recirculación a la estación de bombeo #2, y luego a la estación de bombeo #1, para comenzar nuevamente el tratamiento, cuidando el nivel en los tanques homogenizadores.</p> <p>Si logramos detectar que el lodo está cerca de correrse, apagamos los sopladores para que el reactor decante y el agua que salga esté clarificada, así, la unidad DAF tiene un tiempo para recoger el lodo.”</p>

Fuente: Cerezo, 2023.

Después de lo anterior expuesto, se analizó la tendencia de los distintos elementos que proporcionaron cada uno de los entrevistados, creando una síntesis entre sus opiniones capaz de evidenciar las condiciones operativas, así como el nivel de información que manejan alrededor del tratamiento biológico aplicado en la planta de tratamiento. La mayoría de los entrevistados coinciden en las siguientes afirmaciones:

- Principalmente, el sistema biológico, es decir, el reactor biológico y el equipo de flotación por aire disuelto, no tiene la capacidad para tratar el flujo de agua al aumentar la

producción (y en consecuencia, la generación de lodo biológico provocada por el aumento de la carga orgánica diaria en el afluente). Esto conlleva a una operación discontinua, donde las estrategias de control van desde disminuir el caudal, recircular para iniciar nuevamente el tratamiento o incluso, apagar el soplador, afectando la eficiencia del proceso y la preservación de los microorganismos.

- La etapa del tratamiento del agua residual que requiere su mayor atención y control, es tanto la etapa físico-química, como la salida del reactor biológico, donde en ambas esperan remover los sólidos suspendidos basado en la utilización de unidades DAF. Reconocen la responsabilidad presente en enviar un afluente a la canal municipal dentro de los rangos de calidad, específicamente, sin lodo biológico.
- Los operadores no han recibido capacitación en temas como principios del tratamiento biológico, normativas aplicadas a los afluentes a la planta de tratamiento y efectos potenciales de verter aguas residuales que no cumplan con los estándares. Su conocimiento está basado en su experiencia como operador del área.
- Debido a que no se puede detener la planta de tratamiento sin frenar la producción, el mantenimiento realizado a los equipos que conforman el sistema biológico es del tipo correctivo, donde se hacen reparaciones rápidas para no interrumpir el tratamiento del agua. Las reparaciones mayores se dan durante las paradas de planta programadas, dadas dos veces al año.
- Todos los operadores coinciden en que la demanda química de oxígeno es una de las variables críticas que aseguran la calidad del agua. Así mismo, señalan que se dan desviaciones significativas en los parámetros que evalúan, debido a las características cambiantes del agua según el área productiva de procedencia.

4.1.7 Resumen de debilidades encontradas en todo el diagnóstico.

A continuación, se realiza un resumen de las debilidades encontradas en la planta de tratamiento de aguas residuales, con énfasis en su sistema biológico, a lo largo del diagnóstico realizado:

1. **La eficiencia en remoción de carga orgánica** promedio por parte del sistema biológico se encuentra en 66%, dejando 34% de la carga orgánica sin remover. Así mismo, algunos valores para el DQO de salida están cerca del límite normativo establecido. Esta situación afecta directamente el compromiso de la empresa con la

comunidad e indica que, de aumentar la cantidad de DQO en la entrada, se corre el riesgo de afluentes fuera de norma frecuentes.

2. **Los procedimientos no están estandarizados**, desde las acciones en condiciones críticas, hasta operaciones diarias realizadas en la planta de tratamiento, como la dosificación de polímero a la unidad DAF II para lograr la separación de los sólidos. Esto implica que las decisiones a tomar son juzgadas según el criterio del operador y varían dependiendo del encargado en el momento. Además, no existe un registro de fallas que permita conocer el historial de los equipos que conforman al sistema biológico.
3. **La sensibilidad del sistema biológico** ante cambios en volumen de agua a tratar o concentración de carga orgánica recibida, requiere inspecciones repetitivas por parte del operador de la planta de tratamiento, para evitar el desborde del reactor y la fuga de lodos a la canal municipal. Además, conlleva a la búsqueda de alternativas para evitar la salida fuera de norma, como son, disminuir el caudal, cesar el suministro de aireación o recircular, impactando en la continuidad del proceso de tratamiento y disminuyendo su eficiencia general.
4. **Se cuenta con poco espacio disponible** para implementar mejoras con nuevos equipos, dificultando la expansión de la capacidad por medio de ajustes infraestructurales o tecnológicos. En este sentido, existe una limitación en la distribución para proveer un tratamiento que permita asimilar los afluentes al producir 18.000 TON/mes.
5. **El personal que opera la planta de tratamiento no conoce los fundamentos teóricos** detrás de las tareas que realizan, sin embargo, reconocen la importancia de entregar un efluente dentro de los rangos aceptados.

4.2 FASE II: Análisis de oportunidades de mejora encontradas en el sistema de tratamiento biológico.

Una vez fue recolectada información sobre la situación operacional en el sistema biológico mediante entrevistas realizadas al personal que opera el área, así como detallando las características de las aguas residuales tratadas y observando los procedimientos practicados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la empresa Alimentos Polar Comercial – “Planta Salsas y Untables”, a continuación, estos datos serán analizados con el propósito de determinar la

causa raíz para el problema principal identificado, este es, limitación en la capacidad del tratamiento biológico.

En este sentido, fue utilizado un diagrama Causa y Efecto como una herramienta visual para la organización de las debilidades encontradas. Posteriormente, se evaluaron alternativas de solución para la causa más influyente del problema a través de una matriz multicriterio, donde la tecnología MBBR surgió como una opción capaz de responder a las necesidades de mejora del sistema.

4.2.1 Organización de las causas identificadas mediante el diagrama Causa-Efecto.

Para visualizar de forma más detallada el motivo que provoca la discontinuidad del tratamiento biológico en Alimentos Polar Comercial – “Planta Salsa y Untables”, fueron representadas gráficamente las causas principales y secundarias del problema en un diagrama Causa y Efecto. En la elaboración fueron consideradas como causas principales las 6M de la ingeniería, estas categorías se distribuyen de la siguiente manera: mano de obra, maquinaria, métodos, medio ambiente, medición y materiales. Con el propósito de especificar cada una de las debilidades englobadas en las categorías, resulta oportuno describirlas.

- **Mano de Obra.**

El personal que labora en la planta de tratamiento no ha recibido capacitación en torno a los fundamentos teóricos que respaldan el sistema biológico, sin embargo, cuentan con las capacidades técnicas adquiridas mediante su experiencia en el área, por lo que pueden desenvolverse con fluidez al realizar las actividades asignadas para su puesto de trabajo. Las estrategias ante condiciones de trabajo críticas cambian según el criterio del operador.

- **Maquinaria.**

Los equipos empleados actualmente para el proceso no son capaces de ofrecer un rendimiento óptimo considerando la carga orgánica del afluente a la planta de tratamiento de aguas residuales, tanto en términos de concentración de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) como de volumen de agua a tratar. Específicamente, mantener el nivel del reactor resulta un trabajo arduo, así como conservar condiciones favorables para la operación de la unidad DAF II. La eficiencia del sistema es del 66% en remoción de carga orgánica y el restante se traduce en pérdidas al no alcanzar su potencial. Poca flexibilidad en la distribución de los equipos si se requieren hacer cambios por aumento de la producción.

- **Método.**

Por los momentos, no existe un manual de procedimientos para la operación del sistema biológico que englobe todos los equipos que pertenecen a él. Los operadores no tienen a su alcance las instrucciones para el manejo de los equipos definidas por el fabricante. No existen procedimientos estandarizados ante condiciones de riesgo en el proceso.

- **Medio Ambiente.**

La empresa tiene la responsabilidad de cumplir con la legislación venezolana vigente, en repetidas ocasiones los valores de la demanda química de oxígeno (DQO) se encuentran cerca de los límites establecidos en el Decreto 3.219 para el vertido de aguas residuales en la cuenca del Lago de Valencia. De aumentar la carga orgánica recibida, el sistema no tendrá la habilidad para garantizar el cumplimiento de la norma y podría traer consecuencias perjudiciales para la empresa al ser juzgados por el Ministerio de Ambiente.

- **Medición.**

Los operadores deben realizar inspecciones para verificar el adecuado funcionamiento de los equipos que conforman la planta de tratamiento. En caso de descuido, se puede dar la descompensación del sistema requiriendo la toma rápida de decisiones para evitar la salida de efluentes fuera de norma. Es una condición de riesgo, donde el funcionamiento de la planta de tratamiento depende en amplitud de la disposición del operador.

- **Material.**

Para la operación de la DAF II se requiere la dosificación de polímero ya que colabora a unir los sólidos provenientes del reactor biológico, facilitando su remoción de la fracción líquida afluente. En consideración de generar más lodos en el tanque de aireación al aumentar la producción, será agregado más polímero para realizar la clarificación, promoviendo un alto uso del material que se traduce en mayores costos.

Se observa claramente (Ver figura 27), que la mayor parte de las debilidades se encuentran dentro de la clasificación perteneciente a la maquinaria utilizada para el tratamiento biológico, esto refleja la poca adaptabilidad del tratamiento actual ante cambios en la producción, por lo que se vuelve primordial implementar mejoras que expandan la capacidad del sistema para el aprovechamiento total de los equipos instalados en las áreas productivas.

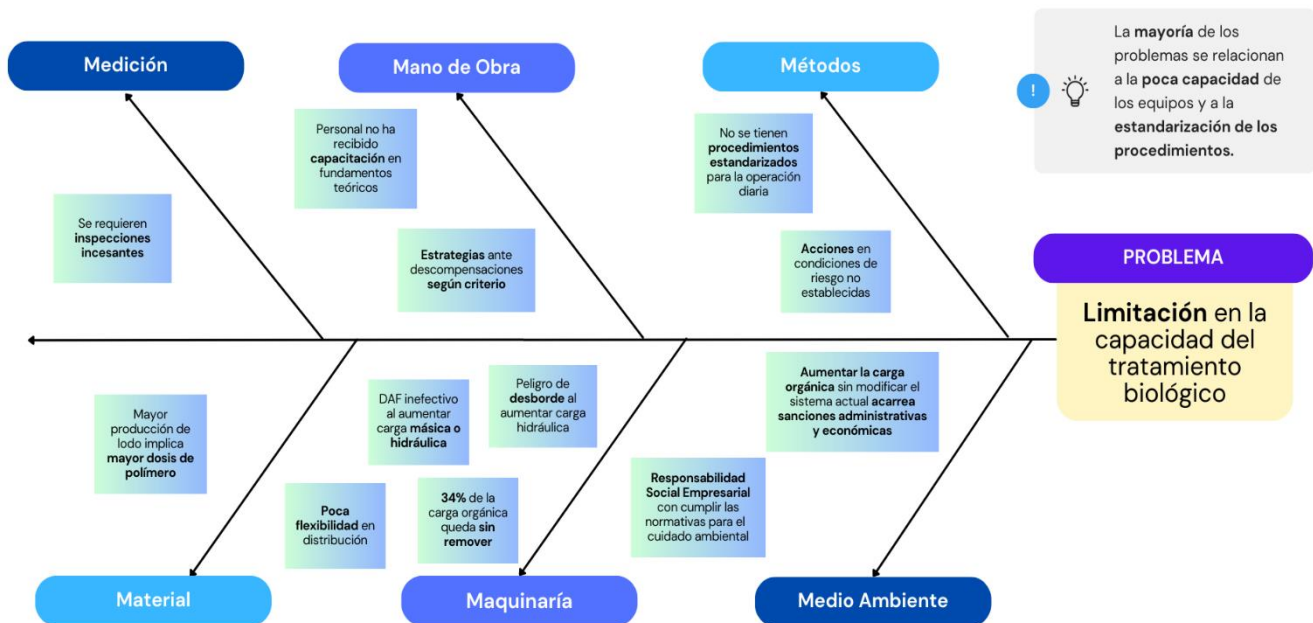


Figura 27. Diagrama Causa-Efecto limitación en la capacidad del tratamiento biológico.

Fuente: Cerezo, 2023.

4.2.2 Evaluación de alternativas de mejora para el aumento de la capacidad del sistema de tratamiento biológico.

De acuerdo con la información suministrada hasta el momento sobre las necesidades de mejora en el sistema de tratamiento biológico y las exigencias establecidas por el estado para este tipo de actividades, es imperativo presentar una alternativa capaz de proporcionar mayor eficiencia en la remoción de carga orgánica y menor producción de lodos. Además, dicha alternativa seleccionada debe contener un beneficio frente a los aspectos técnicos, económicos y operacionales involucrados en su implementación.


Hecha la observación anterior, se propone evaluar mediante una matriz multicriterio tres alternativas de mejora para expandir la capacidad del sistema de tratamiento biológico. Las opciones por evaluar son, instalar una unidad de flotación de aire disuelto (DAF) con otras dimensiones, implementar un tratamiento biológico por membrana (MBR) o implementar un tratamiento biológico por lecho móvil (MBBR). A continuación, se define el funcionamiento de cada una de estas alternativas, así como sus ventajas y desventajas de implementación.

Alternativa 1. Instalar una unidad de flotación de aire disuelto (DAF) con otras dimensiones.

En la sección anterior, se mencionó que al aumentar el caudal del afluente a la unidad DAF II, esta tenía dificultad para remover la cantidad de sólidos que se encontraban en la superficie del

agua residual que fluye a través de ella. A modo de referencia, en el cuadro 15 se desglosan las características del equipo actual ubicado en la planta de tratamiento de aguas residuales estudiada.

Cuadro 15. Características de la Unidad DAF II.

NOMBRE DEL PRODUCTO		Unidad de Flotación por Aire Disuelto	
FABRICANTE		Global Water Engineering	
FUNCIÓN		Tanque horizontal con láminas de metal que realizan un movimiento de raspado de los lodos en la superficie, contando con inyección de aire presurizado mediante un tanque hidroneumático que crea burbujas finas capaces de elevar las partículas sólidas.	
CARACTERÍSTICAS GENERALES			
Material	Alto	Largo	Ancho
Acero	2,6 m	9,7 m	3,5 m
<p>IMAGEN REFERENCIAL</p> 		CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
		Capacidad Hidráulica	14 l/s
		Capacidad Másica	160 KgSST/h
		Nivel de Agua	2 m
		Nivel de Lodo	0,6 m
		Capacidad Volumétrica	0,8 m3
		Condiciones	Equipo en buen estado, la efectividad de su proceso depende de las características del lodo y del caudal de agua.

Elaborado por: Cerezo, 2023.

Según se ha visto, el equipo no puede cumplir con los requisitos de operación al aumentar la producción sin provocar faltas a las normas ambientales o interrupciones a la continuidad del proceso. Por esta razón, una de las alternativas propuestas es sustituir la unidad DAF II por otro separador con dimensiones que soporten los caudales de agua provenientes del reactor biológico, sin realizar cambios al funcionamiento del tanque de aireación.

Cuadro 16. Ventajas y desventajas de instalar una unidad de flotación por aire disuelto (DAF) con otras dimensiones.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • La compañía encargada de redimensionar el equipo proporciona capacitación a los operadores del área. • Procesos mejorados con equipos de una generación más reciente. • Disminución de inspecciones incesantes al equipo. • Fluidez del tratamiento del agua residual industrial. 	<ul style="list-style-type: none"> • El reemplazo del equipo no colabora a mejorar la eficiencia en remoción de carga orgánica soluble, sólo en ampliar la carga hidráulica. • Requiere espacio para su instalación. • La adquisición de un equipo nuevo implica una alta probabilidad de fallas iniciales difíciles de predecir. • Limitado por concentración de SST dentro del reactor.

Elaborado por: Cerezo, 2023.

Alternativa 2. Implementar un tratamiento biológico en un biorreactor de membrana (MBR).

Los biorreactores de membrana, denominados por sus siglas en inglés MBR (Membrane biorreactor), consisten en la combinación de un proceso por lodos activados y la filtración por membranas, popularmente utilizado cuando el sistema convencional no es capaz de procesar la concentración de carga orgánica en el agua o las fluctuaciones en el flujo de agua residual, ya que proporciona efluentes de mejor calidad (Radjenovic y otros, 2008). Tiene como principio básico la separación de los sólidos por medio de filtración, sin requerir un decantador o separador secundario al sumergir la membrana en el biorreactor, su configuración típica se observa en la figura 28.

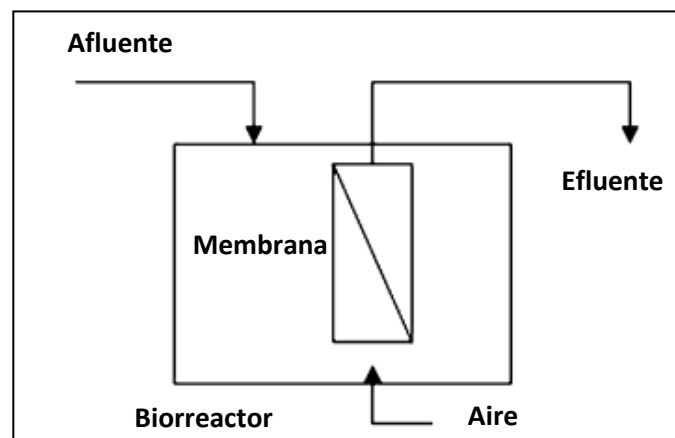


Figura 28. MBR con membrana sumergida.

Fuente: Radjenovic y otros, 2008.

Cuadro 17. Ventajas y desventajas de implementar un tratamiento biológico en un biorreactor de membrana (MBR).

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Se desarrolla biomasa especializada con una edad elevada. • Excelente calidad de efluente. • Mayor estabilidad ante sobrecargas. • No requiere unidad de separación después del reactor biológico. • Volumen de tanque de aireación más pequeño que en el sistema convencional, ya que permite conservar más sólidos en el licor mixto. 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo elevado para instalar la tecnología. • Alto costo para la adquisición de la membrana. • Requiere frecuente monitoreo de las condiciones de la membrana. • Mantenimiento de las membranas provoca costos operacionales superiores a los de un sistema convencional. • Obstrucción de las membranas por capas de lodo.

Elaborado por: Cerezo, 2023.

Alternativa 3. Implementar un tratamiento biológico en un biorreactor de lecho móvil (MBBR).

El proceso para el tratamiento biológico del agua MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor) consiste en el crecimiento de la biomasa en un medio que se encuentra en movimiento gracias a la aireación proporcionada al tanque. Esto quiere decir, en lugar de estar suspendidos en el licor mixto como en un sistema convencional, los microorganismos que realizan el tratamiento están adheridos a un sólido. El principio de funcionamiento es la generación de una biopelícula que mantiene protegidos a los microorganismos en unas pequeñas estructuras llamadas “carriers” o soportes (Bengtson, 2017).

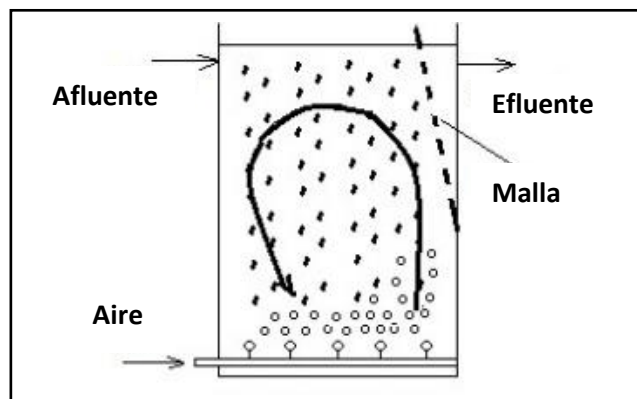


Figura 29. Elementos típicos de un MBBR aeróbico.

Fuente: Bengtson, 2017.

Cuadro 18. Ventajas y desventajas de implementar un tratamiento biológico en un biorreactor de lecho móvil (MBBR).

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Fácil adaptación desde un sistema convencional. • Se desarrolla biomasa especializada con alta actividad, capaz de resistir sobrecargas del sistema. • No requiere recirculación de lodos. • Baja producción de lodos. • La capacidad está definida por la cantidad de carriers dentro del tanque. • Necesidad de menor volumen de tanque. • Puede funcionar correctamente sin muchas intervenciones de mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere monitoreo manual de las condiciones de la biopelícula, no es posible aplicar sensores para conocer la situación actual. • Para la interpretación de los resultados, es necesario conocer y tener habilidades en el campo de tratamiento biológico. • Problemas en el diseño de la malla o del tanque, puede provocar que escapen carriers del sistema. • Costo definido por la cantidad de carriers a utilizar.

Elaborado por: Cerezo, 2023.

Una vez fueron conocidas cada una de las alternativas, así como sus ventajas y desventajas, se procedió a utilizar la matriz multicriterio como una herramienta para la toma de decisiones tomando como base factores cualitativos. En esta sección se desglosan cada una de las etapas para componer la matriz y el análisis final.

a) Selección de criterios para priorización. En función de las condiciones en la planta de tratamiento, se basará la decisión bajo la siguiente serie de criterios.

- **Eficiencia en remoción de carga orgánica (C1):** Es el indicador fundamental de la evaluación, ya que atiende a garantizar la calidad del efluente de la planta de tratamiento y, con ello, el cumplimiento de normativas estatales.
- **Inversión y costos (C2):** La inversión económica juega un gran papel en la evaluación, por lo tanto, es incluida para evitar tomar decisiones que representen un riesgo para la estabilidad financiera de la organización.
- **Operatividad (C3):** La opción seleccionada debe permitir un seguimiento sencillo del proceso, sin requerir capacitación prolongada y exigente para los operadores de la planta de tratamiento.

- **Mantenibilidad (C4):** Hacer intervenciones de mantenimiento afecta directamente a la producción de la empresa. La mejor opción será aquella que no amerite paradas por mantenimiento frecuentes y, en su lugar, permita establecer un programa de mantenimiento preventivo no tan exigente.
- **Viabilidad de instalación (C5):** Dentro de los criterios se considera la dificultad para adaptar el sistema actual a la alternativa propuesta, teniendo presente la distribución actual y el poco espacio disponible para modificaciones.

b) Ponderación de cada criterio según su importancia. Se seleccionaron ponderaciones en una escala del 1 al 3 para los criterios a partir de su trascendencia (Ver cuadro 19), aquellos con un efecto perjudicial, fueron asignados valores negativos. La ponderación sigue el siguiente orden de prioridad, eficiencia en remoción de carga orgánica, mantenibilidad, viabilidad de instalación, inversión y finalmente, operatividad.

Cuadro 19. Asignación de valores para cada uno de los criterios de selección.

Ponderación de los criterios para la selección de alternativas según su importancia (P)		
Criterio	Descripción	Ponderación
C1	Eficiencia en remoción de DQO	3
C2	Inversión y costos	-1
C3	Operatividad	1
C4	Mantenibilidad	2
C5	Viabilidad de instalación	2

Elaborado por: Cerezo, 2023.

c) Construcción de la matriz de puntuación. En la matriz de puntuación están plasmadas las alternativas a seleccionar en la primera columna, contando con cada uno de los criterios de decisión en la fila superior y sus respectivos valores de ponderación. Para completar la tabla fue fijada una escala de valores que permita comparar cada una de las alternativas cuantitativamente (Ver cuadro 20).

Cuadro 20. Escala de valoración de criterios.

Escala de valoración de criterios (V)	
Planteamiento verbal de la preferencia.	Calificación numérica.
Sobrepasa expectativas	5
Cumple las expectativas	4
Cumple medianamente las expectativas	3
Cumple pocas expectativas	2
No cumple las expectativas	1

Elaborado por: Cerezo, 2023.

d) Valoración de los factores y análisis de resultados.

A continuación, se explica el procedimiento seguido para rellenar la matriz. La puntuación asignada por el investigador se ubica en las columnas marcadas como “V”, siguiendo la escala definida. Seguidamente, se multiplica este valor por la ponderación asignada al criterio y el resultado se almacena en la columna “V x P”. Finalmente, se suman los valores en la columna denominada total y con ello, se establece el orden de prioridad.

Cuadro 21. Matriz de puntuación para selección de alternativas.

CRITERIOS											
Pesos	C1		C2		C3		C4		C5		TOTAL
	P = 3		P = -1		P = 1		P = 2		P = 2		
	V	V x P	V	V x P	V	V x P	V	V x P	V	V x P	
Soluciones											
Alternativa 1.	1	3	2	-2	5	5	3	6	2	4	16
Alternativa 2.	5	15	5	-5	3	3	2	4	1	2	19
Alternativa 3.	4	12	4	-4	1	1	4	8	4	8	25

Elaborado por: Cerezo, 2023.

Con lo anterior se demuestra que la mejor alternativa es adaptar el tratamiento convencional actual a un tratamiento biológico de biorreactor de lecho móvil o MBBR, ya que presenta beneficios superiores que las otras alternativas en términos de eficiencia, economía, operatividad, mantenibilidad y viabilidad de instalación.

4.2.3 Modificaciones requeridas en el sistema biológico para la implementación de la tecnología MBBR.

En esta sección, se examinaron los cambios necesarios dentro del sistema biológico para la instalación y correcto funcionamiento de la tecnología MBBR. Cada una de las modificaciones señaladas está acompañada de la referencia teórica que sustenta su requerimiento, así como de la explicación técnica que origina su exigencia.

- **Malla en tubería de la descarga del reactor biológico.**

Como se había mencionado anteriormente, son utilizadas mallas o filtros para retener a los biosoportos dentro del reactor. Van Handeel y Van der Lubbe (2012) explican que, los filtros instalados para prevenir el escape de los soportes suelen ser horizontales con forma cilíndrica en tanques aeróbicos (Ver figura 30), de esta manera, la posición y orientación del filtro permite aprovechar la aireación proporcionada para evitar la obstrucción del tamiz. Por otro lado, en reactores anaeróbicos, es decir, procesos en los que no hay una parrilla de difusores, se utilizan mallas planas verticales (Ver figura 31), en conjunto con un sistema de aspersion en el borde inferior para impulsar los tamices periódicamente y desalojar la materia acumulada.



Figura 30. Filtro horizontal cilíndrico para MBBR aerobio.

Fuente: Van Handeel y Van der Lubbe, 2012.



Figura 31. Filtro vertical para MBBR anaeróbico.

Fuente: Van Handeel y Van der Lubbe, 2012.

El diseño correcto de la malla es fundamental, así como un tratamiento aguas arriba eficiente, ya que estos instrumentos son vulnerables a la aglomeración por desechos finos, lo cual puede provocar la inundación del reactor o el arrastre de los medios. Los autores previamente citados indican que, para evitar el bloqueo parcial, suele ser suficiente la instalación de un filtro con tramas gruesas seguido por un filtro de tramas finas de 3 milímetros.

Por su parte, los autores Mcquarrie y Roltz (2011), señalan que los filtros horizontales diseñados para retener a los sólidos dentro del reactor están sujetos a la pared mediante guardacabos moldeados en el lugar o a través de manguitos de pared insertados en orificios perforados dentro de la estructura del reactor. Generalmente, los filtros se encuentran sumergidos desde un 35% a un 65% de la altura del reactor, esta condición permite la limpieza de la malla gracias a las burbujas distribuidas por las rejillas de difusores.

Así mismo, fue consultado un proveedor de la tecnología con el propósito de definir las condiciones. SSI Aeration es una organización internacional dedicada al diseño y fabricación de equipos utilizados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, incluyendo biorreactores de lecho móvil. Dentro de sus recomendaciones para el diseño de la pantalla encargada de retener los medios se encuentran:

- ✓ Las ranuras del filtro deben tener un tamaño menor al 70% de las dimensiones del biosoporte.
- ✓ Se prefiere que los filtros sean de alambre de cuña en lugar de metal perforado. Los primeros típicamente presentan un porcentaje de área abierta del (65-75) %, mientras que los segundos contienen un (35-45) % de abertura. Esto permite disminuir las pérdidas de

presión y la velocidad del agua moviéndose a través del área abierta del filtro. De esta manera, se previene que los biosoportes se desplacen hasta la malla o se acumulen alrededor de ella.

- ✓ Dentro de sus indicaciones, concuerdan en que deben ser ubicados por encima de la parrilla de difusores para evitar la obstrucción, tanto de biosoportes, como de sólidos que estén dentro del tanque. Finalmente, hacen énfasis en que debe existir un filtro primario antes del reactor MBBR, encargado de retener los sólidos más gruesos y facilitar el trabajo para el filtro secundario en la salida del reactor.

- **Difusores de aireación de burbuja gruesa.**

El sistema de aireación dentro del reactor MBBR está encargado de distribuir uniformemente los biosoportes plásticos, conseguir las concentraciones de oxígeno requeridas para el proceso y controlar el grosor de la biopelícula formada. Según Mcquarrie y Roltz (2011), el tipo de aireación utilizada en los sistemas MBBR aerobios son aireadores por difusión, consisten en una red de tuberías por donde fluye el aire previamente comprimido, hasta difusores especiales de distintos modelos, como son, los platos, los discos o los tubos, encargados de liberar el aire a presión en forma de burbujas.

Con referencia a lo anterior, los difusores de burbujas pueden ser de dos tipos: burbuja fina (diámetro de burbuja entre 0 a 3 mm) o burbuja gruesa (diámetro de burbuja desde 3 a 50 mm). Cuanto menor sea el tamaño de la burbuja, mayor será su tiempo de retención dentro del tanque, ya que su velocidad al ascender se vuelve más pequeña, por lo tanto, tendrá más eficiencia en la transferencia de oxígeno. Sin embargo, para sistemas de tratamiento con tecnología MBBR debe introducirse la suficiente energía para mantener los biosoportes en suspensión, esto explica por qué se inclinan por aireación de burbuja gruesa, en lugar de aireación por burbuja fina (Bengtson, 2017).

Cabe agregar, dado que las burbujas tienden a sujetarse a los biosoportes en movimiento por un tiempo, indica Bengtson (2017), su tiempo de retención en el reactor se alarga. Así mismo, el autor señala que, las burbujas al entrar en contacto con los biosoportes se separan en piezas más pequeñas. Tomando en cuenta estos hechos, elegir un sistema de aireación por burbuja gruesa, no afectará la eficiencia en transferencia de oxígeno para el reactor MBBR.

En este mismo orden, los costos de mantenimiento para difusores de burbuja fina suelen ser mayores, debido a que estos sistemas requieren limpieza rutinaria, así como reemplazo

frecuente debido a fallas. Contrariamente, los difusores de burbuja gruesa son menos propensos a bloquearse, por lo que sus costos de mantenimiento se reducen, al igual que las intervenciones de emergencia necesarias.

En la planta de tratamiento estudiada, el sistema de aireación instalado es de difusores por burbuja fina en forma de platos (Ver figura 32). Como ya se ha aclarado, este tipo de configuración no tiene la suficiente energía para mantener los soportes en suspensión, al igual que se corre el riesgo de que ocurra una falla por obstrucción y, en consecuencia, sea necesaria una intervención al reactor difícil de ejecutar, considerando el volumen de biosoportes dentro. Es evidente entonces, para implementar la tecnología MBBR deben ser sustituidos los difusores actualmente instalados.

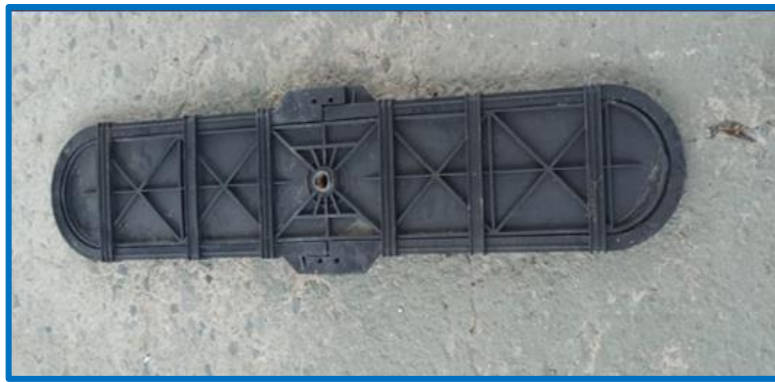


Figura 32. Difusores de burbuja fina actuales.
Fuente: Alimentos Polar, 2023.



Figura 33. Ejemplo de difusor de burbuja gruesa de acero inoxidable.
Fuente: SSI, 2023.

- **Dosificación de floculante en la unidad de flotación por aire disuelto.**

Las partículas presentes en el efluente de un biorreactor de lecho móvil son la suma de los sólidos desprendidos por el cizallamiento entre los soportes y los sólidos provenientes de la

alimentación al tanque de aireación. Al respecto se tiene que, concentración de sólidos suspendidos en la descarga de los sistemas MBBR, suele oscilar entre 150 a 250 mgSST/l al tratar aguas residuales con cargas medianas a altas, es decir, la tecnología implica una cantidad de sólidos que pasan a la unidad de clarificación relativamente baja (en comparación a un sistema convencional por lodos activados, donde los valores se estiman en 1000 mgSST/l o más). Sin embargo, estas partículas están ampliamente distribuidas en el efluente con tamaños variables y requieren tratamiento químico en la unidad de clarificación.

Añadido a ello, Mcquarrie y Roltz (2011), indican que distintos tratamientos pueden ser implementados posterior al tratamiento biológico en un reactor por lecho móvil, capaces de separar los sólidos suspendidos en el efluente. Entre ellos se encuentran, tanques de sedimentación, filtros de membrana, filtros en medios regulares, sistemas de flotación por aire disuelto y otros.

Como puede observarse, la planta de tratamiento a mejorar cuenta con un sistema de clarificación después del tratamiento biológico acorde a los requerimientos de la tecnología MBBR, debido a que contiene una tubería de floculación, así como una unidad de flotación por aire disuelto. No obstante, debe ajustar la dosificación del polímero líquido en función de las nuevas características de los sólidos suspendidos para obtener una clarificación eficiente.

- **Ubicación de la tubería de descarga del reactor biológico.**

Una de las ventajas de la tecnología MBBR, y también una de las razones principales para su implementación dadas las condiciones en la planta de tratamiento estudiada, es que el volumen de tanque necesitado para el proceso es significativamente menor que el requerido para un sistema convencional (Van Handeel y Van der Lubbe, 2012), en otras palabras, la capacidad del tratamiento pasará a depender de la cantidad de biosoportres dentro del tanque de aireación.

Actualmente, la planta de tratamiento de Alimentos Polar Comercial – Planta Salsas y Untables tiene una descarga del reactor por rebose, es decir, el agua dentro del tanque debe llegar hasta un nivel determinado para salir, haciendo que el flujo que llega a la unidad DAF sea inconsistente. Al disminuir la altura de la descarga se logra satisfacer simultáneamente las especificaciones descritas en el apartado para la altura del filtro en la salida del reactor y la necesidad por flujo constante a la unidad DAF.

Una vez fueron descritos cada uno de los requerimientos y modificaciones para la implementación de la tecnología MBBR en la planta de tratamiento de aguas residuales industriales, se presenta un esquema donde se señalan cada uno de los puntos nombrados para

mayor ilustración de las diferencias entre el tratamiento por lodos activados y el tratamiento por lecho móvil (Ver figura 34).

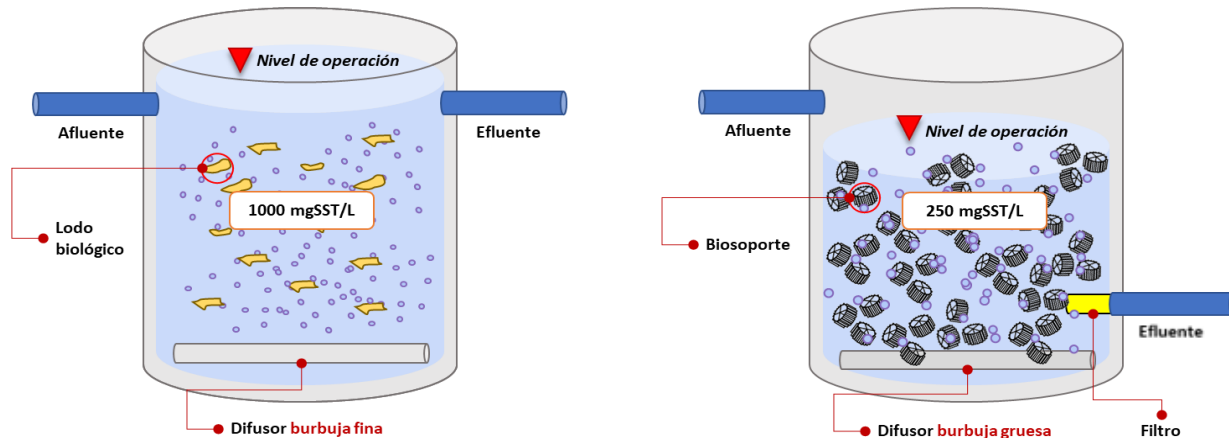


Figura 34. Sistema Lodos Activados. vs. Sistema MBBR.

Fuente: Cerezo, 2023.

4.2.4 Resumen de resultados obtenidos con el análisis de debilidades en el sistema biológico.

1. Se clasificaron las causas encontradas en el diagnóstico para la limitación del sistema biológico por medio del diagrama causa-efecto, con ello, se consiguió que, si bien existen debilidades alrededor de la estandarización de los procesos y la capacitación del personal, es primordial abordar **la fragilidad de los equipos del sistema de tratamiento actual**, siendo la causa más influyente para la restricción estudiada.
2. **La tecnología MBBR es la alternativa tecnológica más adecuada** a la situación actual del sistema biológico, considerando la necesidad de eficiencia en remoción de carga orgánica, inversión inicial, operatividad, mantenibilidad y viabilidad de instalación, en función de las debilidades previamente detectadas, mediante la evaluación de tres alternativas de mejora en una matriz multicriterio.
3. **Para implementar la tecnología MBBR es necesario realizar modificaciones en el sistema de tratamiento biológico**, establecidas por distintos autores para el mejor funcionamiento. En general, se pueden resumir los cambios estructurales requeridos en cuatro (4) puntos.
 - a. Instalar malla en tubería de descarga del reactor biológico para prevenir la fuga de medios de soporte.

- b. Cambiar difusores de burbuja fina por difusores de burbuja gruesa que garanticen la movilidad de los medios de soporte.
- c. Ajustar la dosificación de floculante en la unidad de flotación por aire disuelto en función de la cantidad de sólidos producida por un sistema MBBR.
- d. Se propone cambiar la ubicación de la descarga, colaborando a tener un flujo constante a la unidad DAF.

4.3 FASE III: Diseño de un reactor biológico piloto a escala que simule las condiciones reales de los efluentes de la planta con tecnología MBBR.

Después de identificar la causa principal de la limitación en capacidad del sistema de tratamiento biológico, así como proponer una solución a dicha problemática demostrada, se procedió a diseñar un reactor biológico a escala piloto, adaptado a los requerimientos estudiados para la aplicación de la tecnología MBBR, con el propósito de determinar la eficiencia en remoción de carga orgánica por parte de la tecnología.

Para empezar, el diseño del reactor estuvo apoyado en referencias bibliográficas consultadas, es decir, tomando en cuenta las recomendaciones de autores expertos en el desarrollo de la tecnología para el tratamiento biológico. Sin embargo, según se ha visto, las condiciones dentro del tanque de aireación dependerán del tipo de industria, los productos fabricados y de la efectividad del tratamiento previo aplicado.

Hecha la observación anterior, fue formulado un plan de inspección de variables operativas (PIVO), este permitió el seguimiento de los parámetros críticos de calidad involucrados en la prueba ante las condiciones propias de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales estudiada.

4.3.1 Premisas de diseño.

A lo largo de los planteamientos hechos, se ha demostrado que la planta de tratamiento de aguas residuales industriales de Alimentos Polar – “Planta Salsa y Untables” tiene una restricción generada por la poca habilidad de los equipos que conforman su sistema biológico, estos son, reactor biológico y unidad de flotación por aire disuelto. Con la tecnología MBBR, se espera no sólo cubrir la necesidad actual, sino expandir la capacidad del sistema para soportar un crecimiento dado en todas sus categorías de productos, específicamente, un incremento de producción igual a la capacidad instalada de planta, que corresponde a 18.000 TON/mes.

Para conocer las condiciones a las que se deberá someter al reactor piloto para simular una producción de 18.000 TM/mes, se utilizó la herramienta Biologix (Ver figura 35). El programa desarrollado en Excel por la Gerencia de Aguas y Servicios Industriales, le permite al usuario introducir las unidades a producir mensualmente para un *mix* de productos y como resultado se obtiene la carga hidráulica, másica y orgánica afluente a la planta de tratamiento de aguas residuales industriales. Además, por medio de modelos matemáticos que describen el comportamiento de un sistema convencional por lodos activados, el programa entrega la eficiencia de cada una de las etapas de tratamiento dadas.

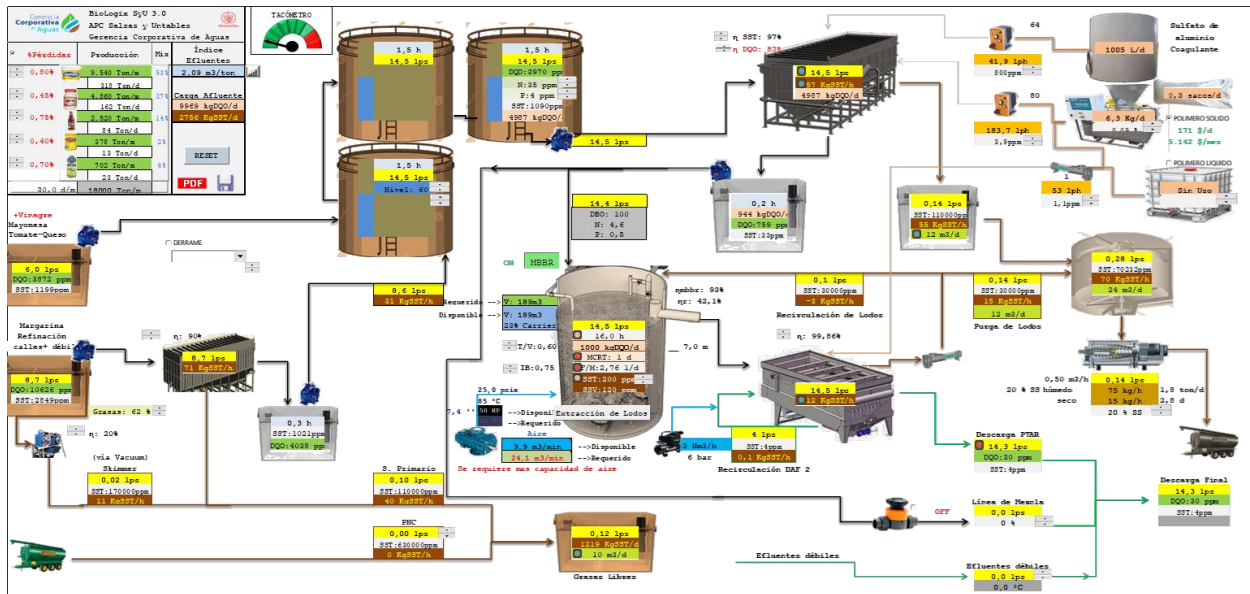


Figura 35. Herramienta Biologix para PTAR SyU.

Fuente: Gerencia de Aguas y Servicios Industriales, 2023

Como se puede observar en la figura 34, para una producción de 18.000 TM/mes la planta de tratamiento recibirá una carga orgánica de 9969 kgDQO/d y una carga másica 2756 de kgSST/d. Concretamente, el caudal de alimentación al reactor biológico será de 14,4 l/s, con una concentración de DQO de 759 mg/L, luego de pasar por el pretratamiento y el tratamiento primario.

- Resulta oportuno destacar que, el reactor tendrá un porcentaje de relleno de biosoportos inicial superior al 20%. Según Van Handeel y Van der Lubbe (2012) la porción de relleno de biosoportos 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.
- Otra de las bases para el diseño, es la disminución del nivel del reactor biológico

actual de la planta de tratamiento de aguas residuales, pasando de 8,5 metros a 7 metros. La premisa anterior, garantiza un volumen de holgura importante para evitar desbordamiento en caso de aumento de carga hidráulica.

- La escala seleccionada para el diseño del reactor es 1:300, a fin de ser accesible para realizar el seguimiento de la prueba. Por otro lado, se pretende mantener la relación altura (h)/diámetro (\emptyset) dada en el reactor biológico de la PTAR.
- La última premisa de diseño consiste en utilizar un valor de SALR de 6,5 $gDBO/m^2d$ en función a la tabla de valores típicos de SALR de diseño para remoción de DBO en reactores MBBR presentada por Bengtson (2017) (Ver cuadro 1). De acuerdo con lo expuesto, valores más bajos de SALR conllevan a una mayor eficiencia en remoción de carga orgánica.

4.3.2 Selección de biosoporte a utilizar en reactor piloto MBBR.

Existe una gran variedad de biosoportes en el mercado de tratamiento de aguas residuales, cada uno de ellos con particularidades en sus características técnicas que hacen que se diferencien entre sí. Los biosoportes están diseñados para tener una amplia área superficial por unidad de volumen, puesto que garantiza el espacio suficiente para que los microorganismos puedan adherirse y desarrollarse, según Bengtson (2017). El autor señala que dos propiedades de los soportes son utilizadas para los cálculos de diseño. Estas propiedades son el área superficial específica (ASE), que oscila entre valores de 350 a 1200 m^2/m^3 , y el porcentaje de relleno de media dentro del reactor. Los valores para dichas propiedades de diseño deben ser dispuestas por el proveedor, sin embargo, se pueden encontrar modelos estándar de biosoportes con características promedio para una evaluación preliminar (Ver figura 36).

En el cuadro 22 se resumen las características técnicas para cada uno de los modelos standard de biosoportes, como son, el número de agujeros, área superficial específica (ASE), densidad, número de piezas por cada metro cúbico, porosidad, porcentaje de relleno apto, tiempo de formación de biopelícula, tiempo de vida, entre otros.

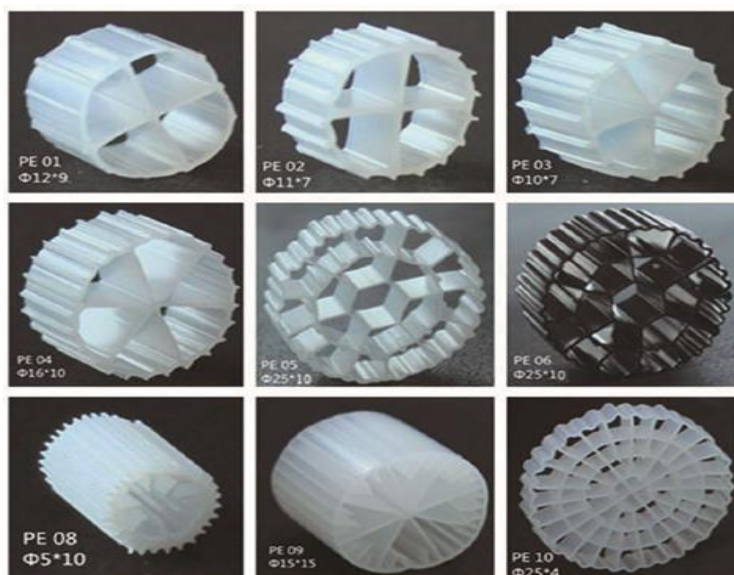


Figura 36. Modelos standard de bioportos.

Fuente: Holly tech, 2021.

Cuadro 22. Características técnicas de modelos standard de bioportos.

Característica	Unidad	PE01	PE02	PE03	PE04	PE05	PE06	PE08	PE09	PE10
Tamaño	mm	φ12*9	φ11*7	φ10*7	φ16*10	φ25*10	φ25*10	φ5*10	φ15*15	φ25*4
Número de agujeros	nos.	4	4	5	6	19	19	8	40	64
Área superficial Específica	m ² /m ³	>800	>900	>1000	>800	>500	>500	>3500	>900	>1200
Densidad	g/cm ³	0.96-0.98	0.96-0.98	0.96-0.98	0.96-0.98	0.96-0.98	1.02-1.05	1.02-1.05	0.96-0.98	0.96-0.98
Número de piezas/m ³	pcs/m ³	>630000	>830000	>850000	>260000	>97000	>97000	>2000000	>230000	>210000
Porosidad	%	>85	>85	>85	>85	>90	>90	>80	>85	>85
Relación de dosificación	%	15-67	15-68	15-70	15-67	15-65	15-65	15-70	15-65	15-65
Tiempo de formación de membrana	days	3-15	3-15	3-15	3-15	3-15	3-15	3-15	3-15	3-15
Eficiencia de nitrificación	gNH ₄ -N/m ³ .d	400-1200	400-1200	400-1200	400-1200	400-1200	400-1200	500-1400	500-1400	500-1400
BOD5 eficiencia de oxidación	gBOD ₅ /m ³ .d	2000-10000	2000-10000	2000-10000	2000-10000	2000-10000	2000-10000	2500-15000	2500-15000	2500-20000
COD eficiencia de oxidación	gCOD/m ³ .d	2000-15000	2000-15000	2000-15000	2000-15000	2000-15000	2000-15000	2500-20000	2500-20000	2500-20000
Tiempo de vida	year	>15	>15	>15	>15	>15	>15	>15	>15	>15

Fuente: Holly tech, 2021.

Elaborado por: Cerezo, 2023

Como puede observarse, todos los modelos coinciden en que el porcentaje mínimo de dosificación dentro del tanque de aireación es de un 15% del volumen operativo. Sin embargo, la cantidad de bioportos necesarios para cubrir este porcentaje variará según el área superficial específica. Se estableció como criterio de selección utilizar la mínima cantidad de piezas por

metros cúbicos de agua, además de preferir aquellos modelos que previamente se han utilizado en investigaciones para ampliación de capacidad. Estos requerimientos señalan que los modelos PE-05 y PE-06 con un área superficial específica de $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$, son los más adecuados ya que se requiere una menor cantidad y son frecuentemente utilizados en este tipo de sistemas.

En este mismo orden y dirección, se hizo énfasis en la densidad de los soportes preseleccionados, estas eran $0,96\text{-}0,98 \text{ g/cm}^3$ para el modelo PE-05 y $1,02\text{-}1,05 \text{ g/cm}^3$ para el modelo PE-06. Los biosoportes son diseñados para tener una densidad cercana a la del agua, esto les permite moverse libremente en el reactor (Van Handeel y Van der Lubbe, 2012), la densidad del agua dulce es de $0,998 \text{ g/cm}^3$, mientras que la densidad del agua salada es de $1,025 \text{ g/cm}^3$. Es evidente que se debe descartar el modelo PE-06, debido a que el agua tratada en la planta de tratamiento estudiada es agua dulce. Por lo tanto, el modelo estándar seleccionado es el PE-05. En relación con esto último, el proveedor designado para suministrar los biosoportes bajo los parámetros descritos del modelo estándar PE-05, fue SSI aeration. Como anteriormente se mencionaba, se trata de una empresa fabricante de equipos para el tratamiento de aguas residuales, abarcando sistemas de aireación y procesos de tratamiento biológico especializados, como es MBBR, certificada en normas de calidad ISO 9001:2015. El medio de soporte dispuesto por la organización (Modelo EEVE675, por su área superficial total) tiene un ASE de $575 \text{ m}^2/\text{m}^3$ una densidad relativa de $0,96 \text{ g/cm}^3$ y su diámetro y longitud coinciden con el de un modelo estándar PE-05.



EEVE675™ Medio de Soporte
Ficha Técnica



Propiedades Físicas
Material: Polietileno Virgen de Alta Densidad (HDPE)
Densidad Relativa: 0.96 ± 0.01
Densidad Aparente: $125 \pm 5 \text{ Kg/m}^3$

Dimensiones del Medio de Soporte
Diámetro exterior: 25 mm
Longitud del Cilindro: 12 mm

Características de Rendimiento
Área Superficial Total: $675 \text{ m}^2/\text{m}^3$
Área Superficial Protegida: $575 \text{ m}^2/\text{m}^3$

Figura 37. Ficha técnica de Medio de Soporte EEVE675.
Fuente: SSI Aeration, 2023.

4.3.3 Memoria de cálculos para el diseño del reactor piloto MBBR.

A continuación, se presenta la hoja de cálculo de Excel compartida por el autor Bengston (2017) con las fórmulas a aplicar señaladas el Anexo C, utilizando los datos proporcionados por la herramienta Biologyx y características asignadas en las premisas de diseño. A lo largo de la figura se encuentran comentarios sobre las consideraciones tomadas para simular al reactor biológico de la PTAR en el reactor piloto con tecnología MBBR

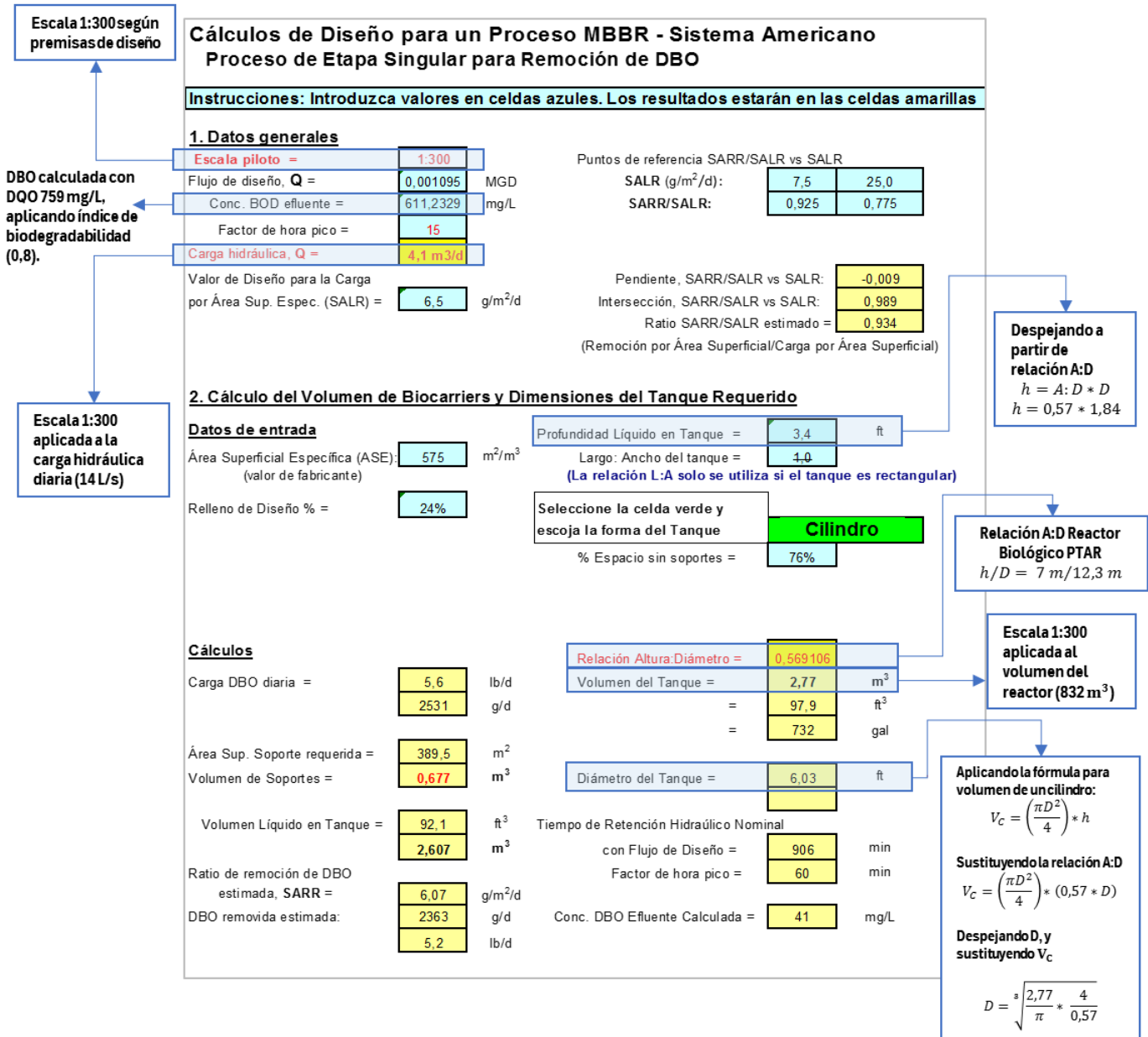


Figura 38. Hoja de cálculos parámetros MBBR.

Fuente: Bengston, 2017.

Con referencia a lo anterior, se definieron los requerimientos de aire según las condiciones establecidas para la prueba piloto. Para definir las, se tomaron como referencias las reglas generales de estimación de los requerimientos de aire y/o oxígeno recopiladas por Bengston (2009) citadas en el marco teórico de la investigación. Hechas las consideraciones anteriores, se recuerda que el tipo de difusor seleccionado es de burbuja gruesa, en vista de que provee la energía suficiente para el movimiento de los biosportes, así como garantiza la eficiencia en transferencia de oxígeno.

En este propósito, la siguiente figura engloba los cálculos de requerimientos de aire para el reactor piloto MBBR. Al igual que la hoja aplicada para los parámetros propios de la tecnología MBBR, esta cuenta con comentarios con el fin de explicar los valores de entrada ubicados en ella, cada uno de ellos basados las reglas de estimación de requerimientos de aire y/o oxígeno previamente mencionadas.

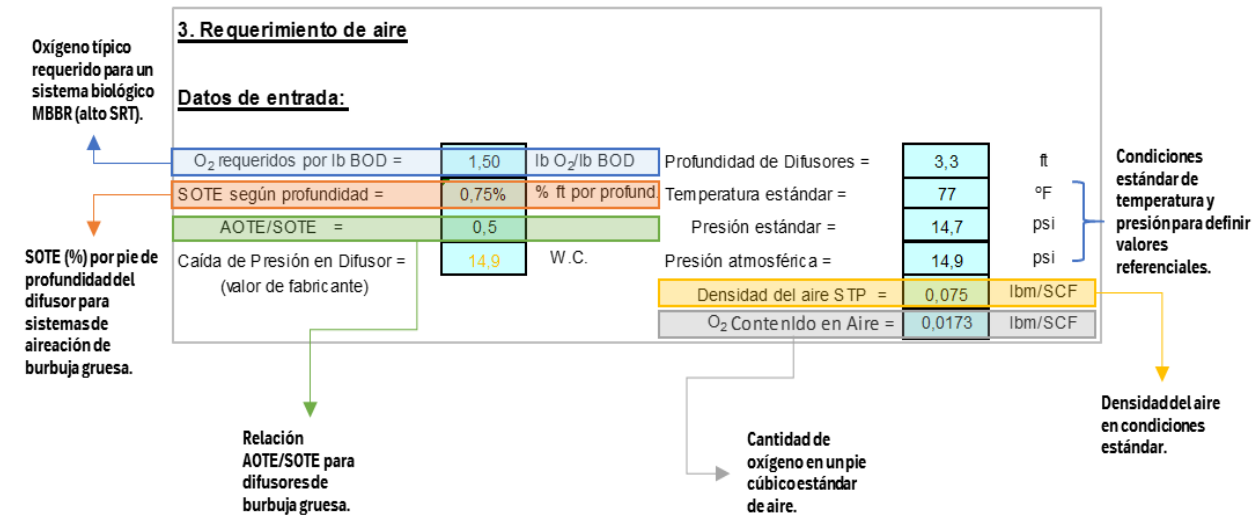


Figura 39. Hoja de entrada de datos para el requerimiento de aire en reactor MBBR.
Fuente: Bengston, 2017.

Seguidamente, se tiene como respuesta el oxígeno requerido en libras por día, la eficiencia en transferencia de oxígeno real (AOTE), la eficiencia en transferencia de oxígeno estándar (SOTE), el requerimiento de aire en pies cúbicos estándar por minuto (SCFM) y el *flux*. Este último en unidades de Sm^3/hm^2 , representando el caudal estándar requerido de aire en consideración del área del tanque de aireación. Cada uno de los cálculos para requerimiento de aire fue realizado en base a las ecuaciones expuestas en el Anexo C.

Cálculos

Requerimiento de Oxígeno=	7,8	lb/d	AOTE =	1,2%	
SOTE =	2,5%		Requerimiento de Aire =	25,1	SCFM
Presión de Salida de Difusor =	16,9	psia	Flux =	0,7	Nm3/min
				16,09	Sm3/h.m2

Figura 40. Resultados de requerimiento de aire en reactor MBBR.

Fuente: Bengston, 2017.

Una vez se definieron los requerimientos de aireación, se procedió al diseño de la tubería principal encargada de suministrar el aire hasta los orificios del difusor para su distribución en el reactor piloto según los siguientes criterios:

- A fin de establecer valores de diseño representativos, fue utilizado el flujo de aire correspondiente a condiciones reales dadas en la planta de tratamiento estudiada, calculado según la temperatura del aire del soplador y presión de salida, estos son 84,5°C y 25 psia, respectivamente, dando como resultado 0,55 m³/min.
- Se tomó en cuenta un factor de seguridad de 1,15 para reducir el riesgo de falla y entregar holgura al sistema de aireación.
- Se escogió 8 m/s como velocidad máxima permisible para el caudal de aire, basado las velocidades típicas de aire para distintos diámetros de tuberías expuestos en el cuadro 2, estimando un diámetro de tubería entre 25 a 75 mm.

Después de lo anterior expuesto, se realiza el cálculo para el área de la tubería principal del sistema de aireación a utilizar en el reactor piloto con tecnología MBBR, siguiendo las ecuaciones presentadas a continuación:

$$\text{Área de tubería} = \frac{\text{Flujo de aire real (m}^3/\text{min)}}{\text{Velocidad máxima permisible (m/s)} * F_{s-\text{min}}}$$

Donde:

- Flujo de aire real: 0,55 m³/min
- Velocidad máxima permisible: 8 m/s
- $F_{s-\text{min}}$: Factor para transformar de segundos a minutos (1/60).

Sustituyendo,

$$\text{Área de tubería} = \frac{0,55 \text{ m}^3/\text{min}}{8 \text{ m/s} * 60} = 0,0011458 \text{ m}^2$$

Es posible calcular el diámetro de la tubería a partir del área de esta, para ello se utilizó la siguiente expresión matemática:

$$\text{Diámetro de la tubería} = \sqrt{\frac{4 * \text{Área de la tubería (m}^2\text{)}}{\pi}}$$

Sustituyendo,

$$\text{Diámetro de la tubería} = \sqrt{\frac{4 * 0,0011458 \text{ m}^2}{\pi}} = 0,038196 \text{ m}$$

Teniendo en cuenta lo anterior, fue seleccionado el tamaño estándar de tubería según la norma COVENIN 1074 (1981) para la designación del diámetro nominal y diámetro exterior en tubería, conexiones y accesorios para tuberías. Su diámetro nominal en sistema internacional se estima de 40 mm, mientras que en sistema inglés corresponde a 1 1/2" de diámetro nominal, con un diámetro exterior de 48,3 mm o 1,9 pulgadas.

Seguidamente, en la figura 41 se muestra el diseño de la parrilla de difusores empleada para airear los biosoportres dentro del reactor. Como se puede apreciar, esta cuenta con un ancho de 1,6 metro y un largo de 0,7 metros, en vista de que el diámetro del tanque cilíndrico a emplear es de 1,84 metros. Los orificios tienen un diámetro de 5 mm conforme a un difusor de burbuja gruesa y la tubería de suministro de aire principal cuenta con un diámetro de 1 1/2".

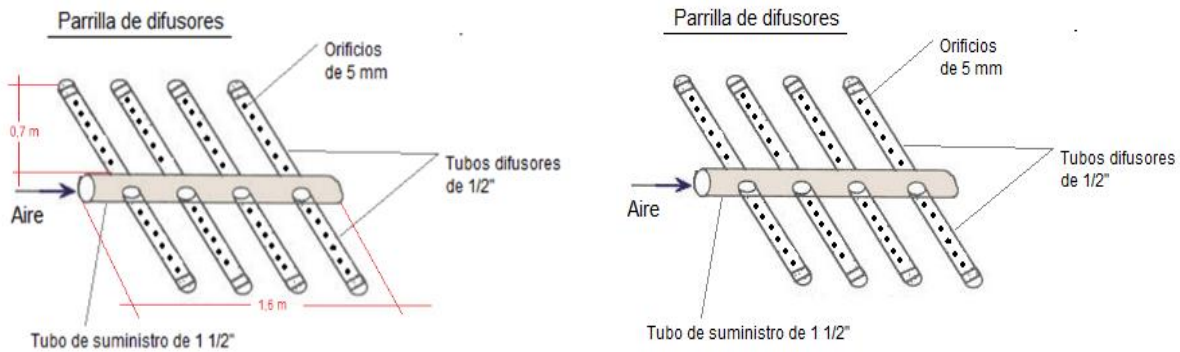


Figura 41. Diseño de difusor de burbuja gruesa para reactor piloto MBBR.

Fuente: Alimentos Polar, 2023.

Es importante destacar, que la parrilla de difusores se diseñó para contar con 8 difusores, donde cada uno tendría 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 comparar el área de la tubería principal, frente al área total activa proporcionada por los agujeros de la siguiente manera:

Considerando una tubería principal con un diámetro de 1 1/2", en otras palabras 0,0381 m, tiene una superficie de $0,00141 \text{ m}^2$. Mientras que, un orificio del difusor de membrana gruesa de 5 mm, tiene una superficie de $0,00001963 \text{ m}^2$. Si se multiplica el valor anterior por la cantidad de agujeros propuestos en el difusor, se consigue un área parcial del $0,0001963 \text{ m}^2$. Luego, si se multiplica este por la cantidad de difusores que habrá dentro del reactor, se obtiene un área total de $0,00157 \text{ m}^2$. En este sentido, de $0,00157 \text{ m}^2 > 0,00141 \text{ m}^2$. Atendiendo a lo anterior, se concluye que el diseño de difusor propuesto es óptimo, ya que no abran mayores pérdidas de presión dentro de las tuberías, cuando esta se libere por medio de los agujeros del difusor.

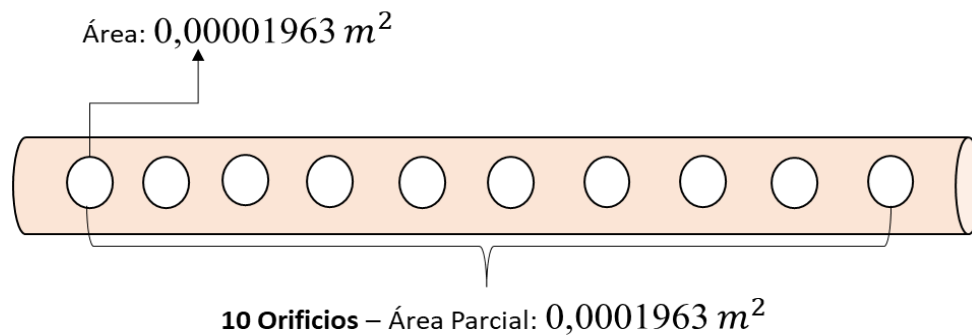


Figura 42. Área activa de difusor diseñado.

Fuente: Alimentos Polar, 2023.

Para concluir, se presenta el diagrama de flujo de proceso del reactor biológico piloto a escala con tecnología MBBR (Ver figura 43). Según se observa, (corriente 1) el reactor piloto será alimentado desde la misma fosa que alimenta al reactor biológico de la planta de tratamiento de aguas residuales con un flujo promedio de $4,1 \text{ m}^3/d$ (para simular las 18.000 TM/mes), a su vez, el efluente (corriente 2) del reactor piloto es devuelto a la estación de bombeo con dirección al reactor biológico. Por otro lado, el reactor piloto puede tener suministro de aire (corriente 3) desde los sopladores que disponen aireación para el reactor biológico de la PTAR, al igual que puede recibirlo mediante el pulmón de aire comprimido que se encuentra en el área de trabajo.

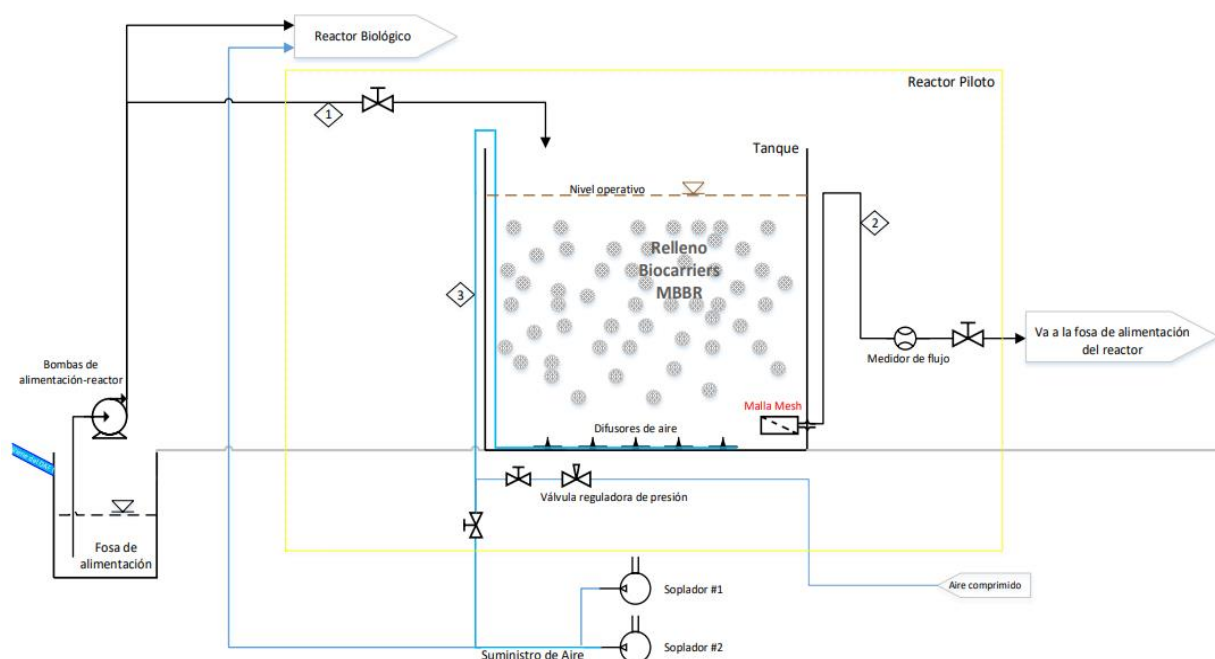


Figura 43. Diagrama de flujo de proceso (DFP) del reactor piloto MBBR.

Fuente: Alimentos Polar, 2023.

Añadido a ello, en el cuadro siguiente se especifican los valores para flujo, presión y temperatura según cada una de las tres corrientes ubicadas en el diagrama de flujo de proceso. Estos datos se obtuvieron a partir de referencias anteriormente citadas, como son, las premisas de diseño del reactor, memoria de cálculos para la aireación, o valores estándar conseguidos en la revisión de documentos.

Cuadro 23. Leyenda para corrientes en DFP reactor piloto MBBR.

Corriente	1	2	3
Fluido	Afluente con carga soluble	Efluente trata con sólidos suspendidos	Suministro de aire al reactor piloto
Descripción	Alimentación al reactor piloto	Salida del reactor piloto	Suministro de aire al reactor piloto
Flujo Promedio (m^3/d)	4,10	4,10	0,67 Nm^3/min
Temperatura (°C)	25-30	25-30	84,5°C (Sopladores) 25°C (Aire comprimido)
Presión (bar)	1	0,10	1,72

Fuente: Alimentos Polar, 2023.

4.3.4. Elaboración de programa de inspección de variables operativas en la prueba piloto planteada.

El programa de inspección de variables operativas (PIVO) se realizó con el objetivo de tener una herramienta para el seguimiento del desempeño del reactor MBBR ante las condiciones reales del efluente industrial de Alimentos Polar Comercial – “Planta Salsas y Untables”, mediante la evaluación de los parámetros críticos de calidad establecidos.

Las zonas de especificación para los parámetros están basadas en la normativa vigente referente al vertido de aguas residuales tratadas en el Lago de Valencia, es decir, el decreto 3.219 previamente citado en el marco teórico de la investigación, al igual que se toma en cuenta los estándares establecidos por la organización para cada etapa del tratamiento.

En ese mismo sentido, se hace notar que tanto los sólidos suspendidos totales como sedimentales dentro del reactor piloto MBBR no tienen límites de control conocidos, ya que dependerán de las condiciones particulares dadas en la planta de tratamiento de aguas residuales.

Con los equipos presentes en el laboratorio se realizaron análisis de los siguientes parámetros: DQO, pH, SST, VLS’30, nitrógeno total, fósforo total, peso, caudal instantáneo y acumulado (Ver cuadro 24). Es importante precisar que la demanda de reactivos afecta directamente la frecuencia de inspección de las variables.

Cuadro 24. Programa de inspección de variables operativas en la prueba piloto planteada.

Etapa del proceso / Material	Característica de Inspección	Punto de Inspección	Nomenclatura de característica	Frecuencia de Inspección	Zona de especificación
REACTOR PILOTO MBBR	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	≤ 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
PTAR	Caudal entrada PTAR (lps)	Salida TQs Homogeneización	Q entrada	Diario	8 -- 12 lps
	Caudal salida PTAR (lps)	Salida DAF II	Q DAF II		8 -- 12 lps

Fuente: Alimentos Polar, 2023.

En ese mismo orden y dirección, se añadió dentro de los indicadores un análisis semanal de la comunidad microbiológica presente en el reactor biológico a escala con tecnología MBBR, atendiendo a evaluar la existencia de dicha comunidad microbiológica, identificando qué grupos de microorganismos la conforman y cómo influyen en la calidad del tratamiento. Además, se analizó simultáneamente la microbiología del reactor biológico de la planta de tratamiento de aguas residuales, con el propósito de tener un punto de comparación microscópica entre las dos tecnologías ante las mismas condiciones de tratamiento.

Dentro de los recursos empleados para los análisis mencionados se encuentran:

- Beaker 600 ml.
- Reactivos de DQO, N, P.
- Colorímetro DR900.
- pHmetro.
- Conductímetro.
- Cono Imhoff.
- Balanza analítica.
- Desecador.
- Estufa.
- Microscopio.

4.4 FASE IV: Evaluación de la propuesta a través del desempeño de la tecnología.

Una vez fue diseñado e instalado el reactor, se procedió a introducir los biosoportes en el tanque de aireación. La prueba realizada en el reactor piloto con tecnología MBBR tuvo una duración de veinticuatro (24) semanas, utilizando un relleno de $0,7 m^3$ de biosoportes. Durante dichas semanas ocurrieron modificaciones en la prueba, así como eventos particulares que afectaron directamente a la eficiencia del reactor para la remoción de carga orgánica. Sin dudas, la modificación que impactó en mayor proporción y redefinió la dirección del estudio fue la transición desde alimentación por batches a alimentación por modo continuo.

En esta fase, se encuentra un resumen de los eventos experimentados, así como de los resultados encontrados para los parámetros críticos más relevantes, como son, los SST dentro del reactor, la concentración de DQO en la salida y el porcentaje de eficiencia en remoción de carga orgánica, además de una caracterización de la microbiología para sistemas biológicos con tecnología MBBR.

4.4.1 Métodos de alimentación empleados.

En las primeras nueve (9) semanas del proyecto, se implementó la alimentación por batches. 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, este tipo de

alimentación sería empleada hasta observar adherencia de biomasa en los soportes. En la figura 44, se desglosa cada una de las actividades que conformaban la alimentación por batch, donde destaca que, el proceso se efectuaba cerrando la válvula de suministro de aire por un período estimado de dos horas.

Para este método de alimentación, se utilizó inoculación desde el reactor biológico propio de la planta de tratamiento de aguas residuales. Específicamente, para iniciar se alimentaron 0,3 m³ de lodo biológico al reactor piloto con el propósito de impulsar la concentración de sólidos suspendidos totales (SST) hasta igualar las condiciones entre la prueba y el reactor biológico real.

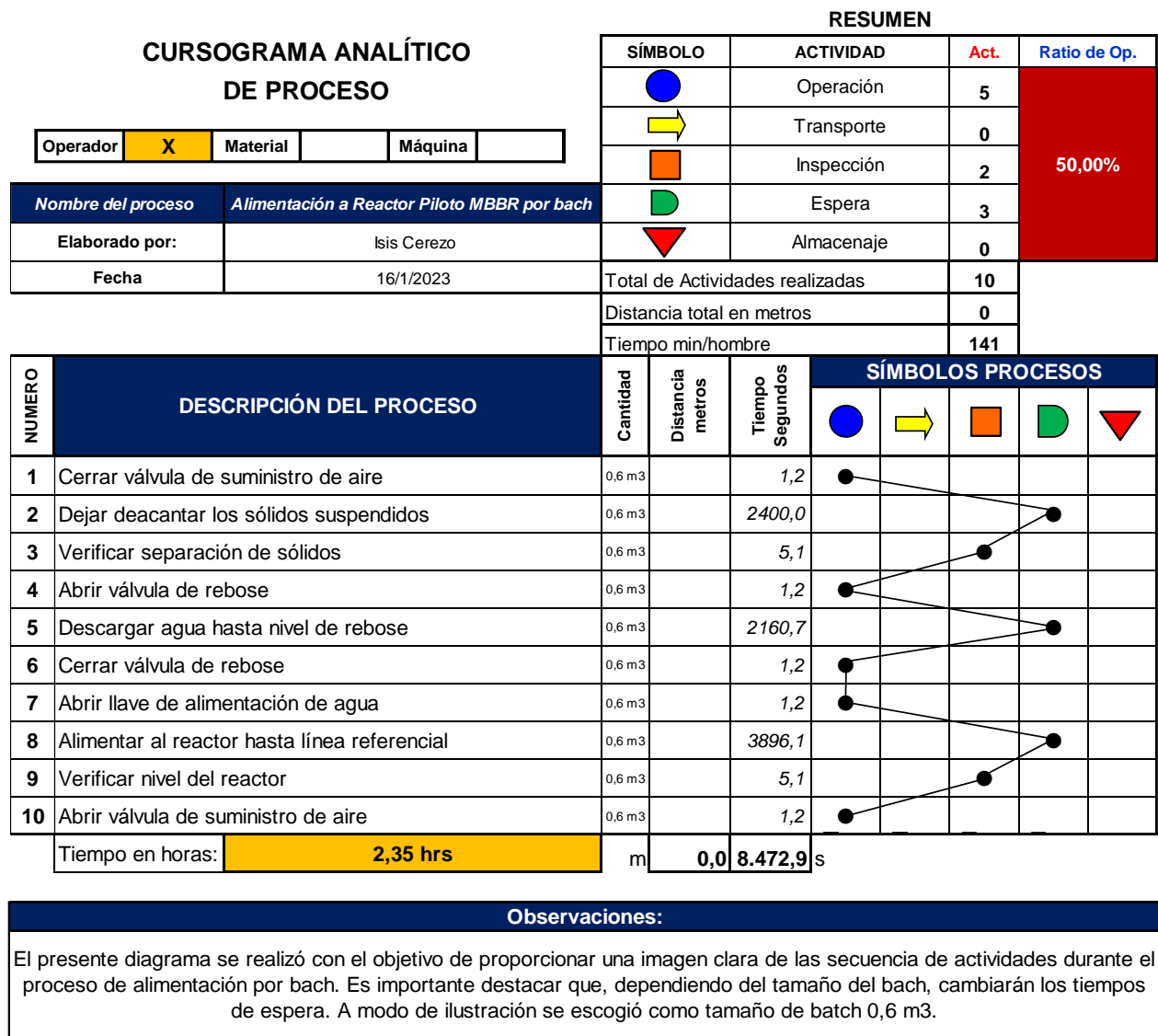


Figura 44. Cursograma Analítico de Proceso de Alimentación por Batch.

Fuente: Cerezo, 2023.

Según se cita en la casilla de observaciones del cursograma, el tamaño del batch de agua a introducir al reactor varió a lo largo de la prueba. **En la semana 1**, se agregaban tres batches de $0,5 \text{ m}^3$ cada 8 horas, ello provocó la generación de espuma blanca en exceso en la superficie del reactor piloto, indicando sobrecarga del sistema. Ante esta situación, se decidió realizar una única alimentación de $0,3 \text{ m}^3$ diaria, la cual se mantuvo por un período de tres semanas.

En la semana 5, el reactor comenzaba a entregar valores de eficiencia superiores al 50%, no se observaba desarrollo de la biopelícula en los medios de soportes, en su lugar, el crecimiento biológico se daba en el medio líquido, evidenciado con el aumento de la concentración de SST dentro del reactor. En este propósito, se indagó en otros factores que pudieran estar interviniendo en la adherencia a los biosoportes, con ello surge el interés por el parámetro de diseño SALR.

Al calcular los valores reales de SALR dados en la prueba, se consigue que estos están dentro de un intervalo de $0,98$ a $0,28 \text{ gDBO}/\text{m}^2\text{d}$, siendo bastante inferior al valor establecido en el diseño inicial del reactor piloto. Esto implica un subuso del área protegida proporcionada por los soportes, entonces se toma la decisión de aumentar el tamaño del batch a $0,6 \text{ m}^3$ diarios. Sin embargo, la condición dentro del reactor se mantenía, continuaban aumentando los sólidos suspendidos y no se observaba crecimiento de la biopelícula en la estructura. Rápidamente, para aumentar la carga orgánica recibida y, en consecuencia, los valores de SALR, se intensificó la frecuencia del batch de $0,6 \text{ m}^3$ a tres veces al día **en la semana 6**.

A pesar de los esfuerzos realizados, los valores de SALR no superaban $1,98 \text{ gDBO}/\text{m}^2\text{d}$. Aumentar el tamaño del batch no era una opción viable, al no tener la disponibilidad de altura sobre la línea de rebose dentro del reactor piloto. Por medio de información recopilada por la empresa, y posterior confirmación experimental, se conoce que el vinagre producido tiene una alta carga orgánica soluble, la cual puede ser aprovechada para aumentar el SALR. En este sentido, se comienzan a añadir 10L de vinagre al 5% **en la semana 7** ($171\ 666,67 \text{ mgDQO}/\text{L}$) diluido en un batch de $0,6 \text{ m}^3$, se desprecia la carga orgánica soluble efluente y la concentración de DQO pasa a ser constante con un valor de $2861 \text{ mg}/\text{L}$. Con esta ayuda adicional, los valores de SALR alcanzan hasta $4,54 \text{ gDBO}/\text{m}^2\text{d}$.

En este punto, la eficiencia del sistema comienza a lograr valores del 95%. No obstante, los soportes permanecen sin mostrar adherencia de biomasa y la concentración de sólidos suspendidos totales evoluciona a $968 \text{ mg}/\text{L}$.

A todo ello, se tomó como última iniciativa añadir 10L de vinagre al 12% (300 600 mgDQO/L) **en la semana 8** diluido en un batch de $0,6 m^3$, así pues, una concentración total de 5010 mg/L de DQO. Este cambio, implementado durante dos semanas, si bien consiguió un aumento en peso de biosoporte estadísticamente significativo, en mayor proporción promovió la generación de SST, donde el valor más alto en concentración fue de 1672 mg/L con eficiencia en remoción de carga orgánica de hasta el 98%.

Después de lo anterior expuesto, se puede concluir que la alimentación por batch implementada (característica de un reactor del tipo SBR) no es compatible con la tecnología MBBR. Las condiciones proporcionadas durante 63 días dieron resultados excelentes para la remoción de carga orgánica, más no existieron cambios notables respecto a la adherencia de biomasa en los soportes, por lo que, fueron los microorganismos suspendidos aquellos que tomaron la tarea de realizar la degradación. Se formularon dos hipótesis para la falta de adherencia obtenida:

- Trabajar por encima del nivel operativo (establecido en 1 metro), aumentaba el volumen de diseño del reactor al mismo tiempo que disminuía el porcentaje de relleno a un 20%. Los biosoportes se encontraban más distribuidos en el tanque, existiendo menos presión en los microorganismos para mantener contacto con ellos.
- La suspensión de la aireación por tiempo prolongado para realizar las cargas y descargas puede afectar al crecimiento saludable de la biomasa, al tratarse de bacterias del tipo aerobio.

A continuación, se muestra una representación gráfica del método explicado de alimentación para un batch de $0,6 m^3$, así como un cuadro con las condiciones de trabajo, como fueron, volumen de biosoportes, volumen de operación y porcentaje de relleno de biosoportes.

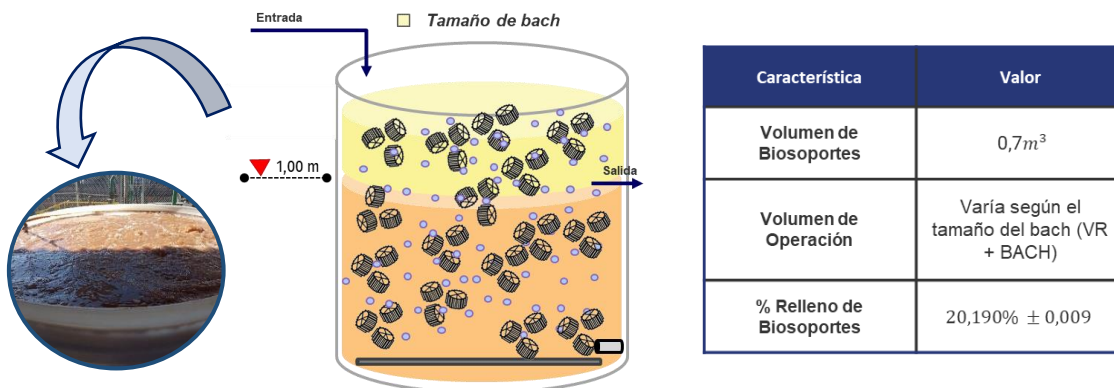


Figura 45. Características de Reactor Piloto MBBR con Alimentación por Batch.
Fuente: Cerezo, 2023.

Finalmente, se presentan gráficas de los datos recopilados para SST en el agua del reactor, concentración de DQO de salida y el porcentaje de eficiencia en remoción de DQO, así como imágenes del aspecto de los biosoportres durante el período.

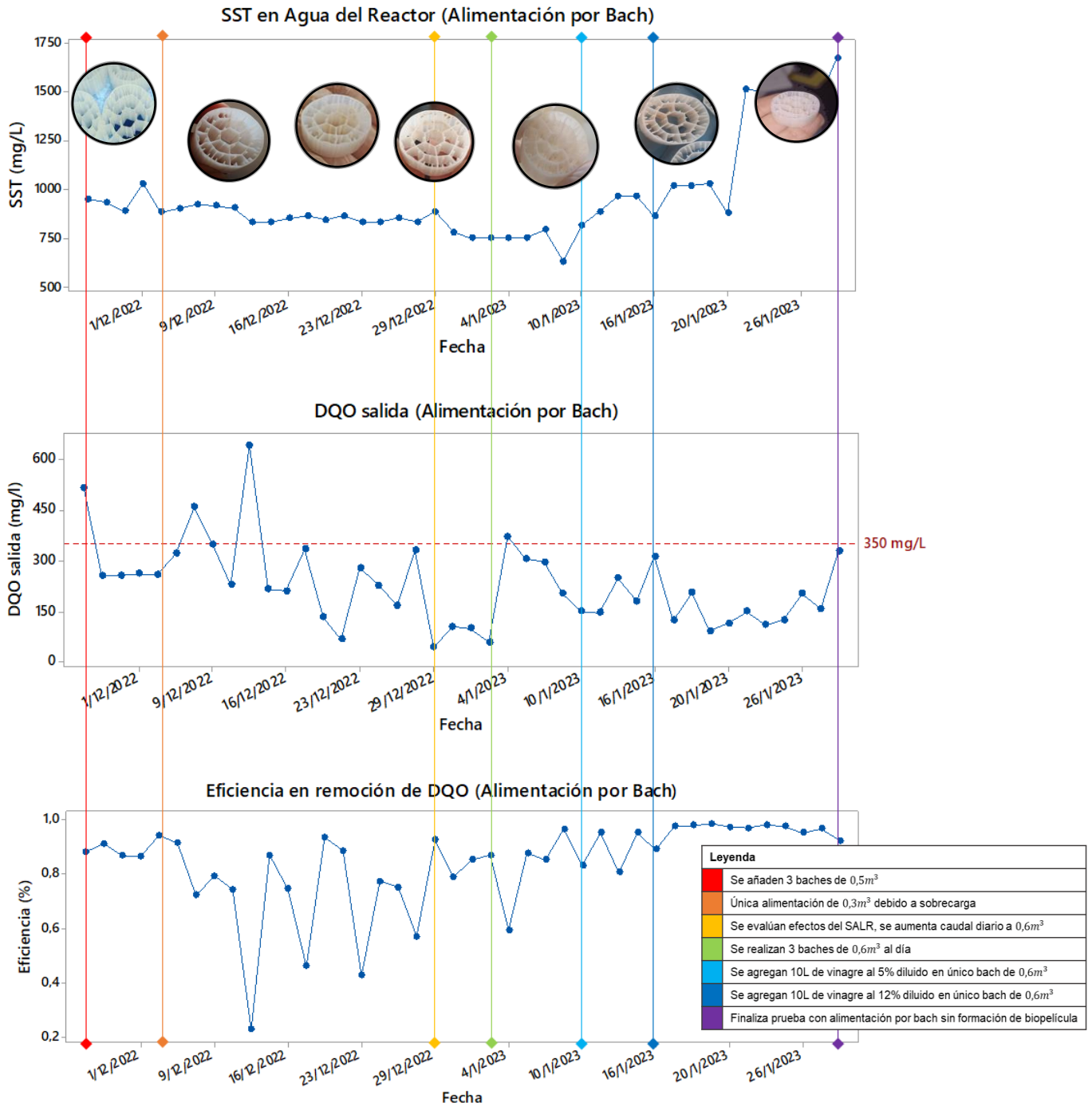


Figura 46. Gráfica de serie de tiempo prueba piloto MBBR con alimentación por batch.
Fuente: Cerezo, 2023.

En las siguientes quince (15) semanas del proyecto, se implementó la alimentación continua. Las diferencias principales entre este método de alimentación y el anterior, es que la salida no ocurre por rebose, se hizo desde la parte inferior del reactor piloto y estaba protegida por una *malla mesh* filtrante de acero inoxidable, con el propósito de evitar el drenaje de los medios de soportes. Además, entre las diferencias se encuentra que el piloto permaneció aireado continuamente, en lugar de experimentar pausas de dos horas. Así mismo, para este método no era necesario manipular la válvula de alimentación regularmente, sólo se debía garantizar que hubiera un balance entre el caudal de entrada y el caudal de salida para mantener el nivel del reactor según lo establecido en el diseño.

Con referencia a lo anterior, en la tubería de salida del reactor fue insertado un sifón a una altura de un metro. Se trata de un tubo capaz de transportar líquido de un recipiente a otro, aprovechando la diferencia de nivel que existe entre él y su descarga. Su propiedad más importante para la presente investigación es la habilidad para mantener el agua a la elevación de su curva mientras no aumente la presión del líquido empujándose dentro del tubo. Para evitar el aumento de presión en el caso de crearse un vacío, se conserva abierta la llave de rebose empleada para la descarga en la alimentación por batch, entonces, se tiene el paso controlado del agua sin arriesgar el nivel del reactor piloto MBBR.

Ahora bien, la alimentación continua trajo consigo una reducción brusca de la concentración de SST dentro del reactor. Como era de esperarse, al mantener la descarga abierta por la salida inferior los sólidos escaparon del tanque. Al inicio de la investigación, se creía que era necesario la permanencia de lodo biológico en el reactor para promover el crecimiento de la biopelícula, no obstante, experimentalmente se comprobó lo contrario.

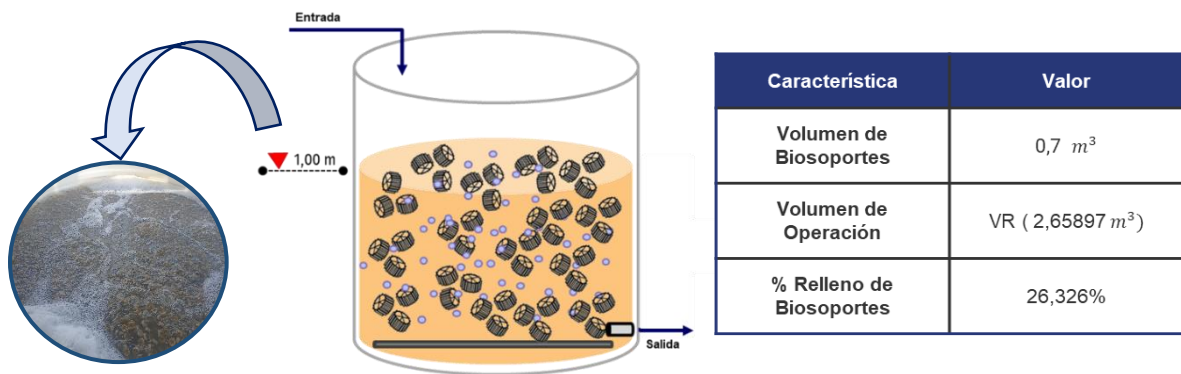


Figura 47. Características de Reactor Piloto MBBR con Alimentación Continua.
Fuente: Cerezo, 2023.

Inicialmente, la pérdida de los sólidos suspendidos llevó a la caída de la eficiencia en remoción de carga orgánica, confirmando que durante la alimentación por batches el reactor actuaba como un sistema convencional por lodos activados. Es importante recordar, la expectativa para la prueba es lograr un porcentaje alto de remoción de carga orgánica sin una alta concentración de sólidos en el tanque de aireación.

En la semana 2, se comenzó a ver una diferencia notable en la apariencia de los biosoportres. En la estructura se formó una pequeña capa de tono anaranjado claro, estaba distribuida uniformemente en la mayoría de los medios de soportes, otros permanecían sin cambios aparentes. Esta pequeña capa se encargó de comenzar a entregar valores de SARR más cercanos a los de SALR, sin embargo, no lograba estabilizarse por completo.

Alcanzadas 4 semanas desde el cambio de método de alimentación, el reactor piloto normalizó sus valores de eficiencia en degradación de DQO, estableciéndose en valores superiores al 70%. 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.

Dentro de los eventos experimentados que pusieron a prueba la resiliencia de la tecnología, destaca el desprendimiento de la biopelícula a las **7 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, para analizar su resistencia surgieron tres (3) explicaciones:

- a. La parte interna de la biopelícula es una reserva de biomasa, la cual puede ser utilizada cuando las capas externas se sobrecarguen.
- b. Los sólidos desprendidos se encontraban aún dentro del reactor piloto, colaborando a mantener la eficiencia en remoción.

Sin embargo, la última hipótesis se descarta, considerando que durante la alimentación por batch los microorganismos se encontraban en el medio líquido y salieron rápidamente del reactor al cambiar el método de alimentación.

Después de lo anterior expuesto, es importante señalar que la biopelícula pérdida fue recuperada dos (2) semana después del evento, evidenciado con el seguimiento fotográfico, así como las mediciones de peso registradas.

En la semana 10, ocurrió una parada de mantenimiento programado en producción. Fueron suministradas instrucciones sobre permitir que el reactor experimente las condiciones propias de la planta, incluso si implica exponer al piloto MBBR a aguas residuales difíciles de tratar provenientes de las actividades de mantenimiento. Se conoció que el agua que entró a 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 microbiológica.

Al evaluar los efectos del evento **en la semana 11**, se detalló que el aspecto de los biosoportres 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. 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. El cambio en la apariencia de los soportes es capaz de afectar la eficiencia, pues la obstrucción impide el paso de oxígeno y el sustrato de materia orgánica a través de la estructura. Ante ello, se recurrió a aumentar el suministro de aireación para promover el desprendimiento de la biomasa, con esto se consiguió la recuperación del sistema, sin embargo, es una alerta a como las concentraciones de polímero en el afluente, la cantidad de sólidos en la entrada procedentes del tratamiento fisicoquímico y la carga orgánica proporcionada pueden afectar a los medios de soporte.

En el transcurso del período de prueba, el caudal de entrada variaba proporcionalmente al recibido en la planta de tratamiento de aguas residuales, superando los $4,1 \text{ m}^3$ establecidos en el diseño. Por lo tanto, el reactor piloto MBBR tuvo la capacidad de soportar una carga hidráulica mayor a la proyectada para una producción de 18.000 TM/mes. Resulta oportuno destacar, la concentración de sólidos en el reactor es inferior a 300 mg/L, representando un 30% de la concentración esperada en un sistema convencional.

Finalmente, se presenta una gráfica de los valores recopilados con alimentación continua para los parámetros críticos de calidad: SST en el agua del reactor, DQO de salida y eficiencia en remoción de carga orgánica, señalando cada uno de los eventos explicados.

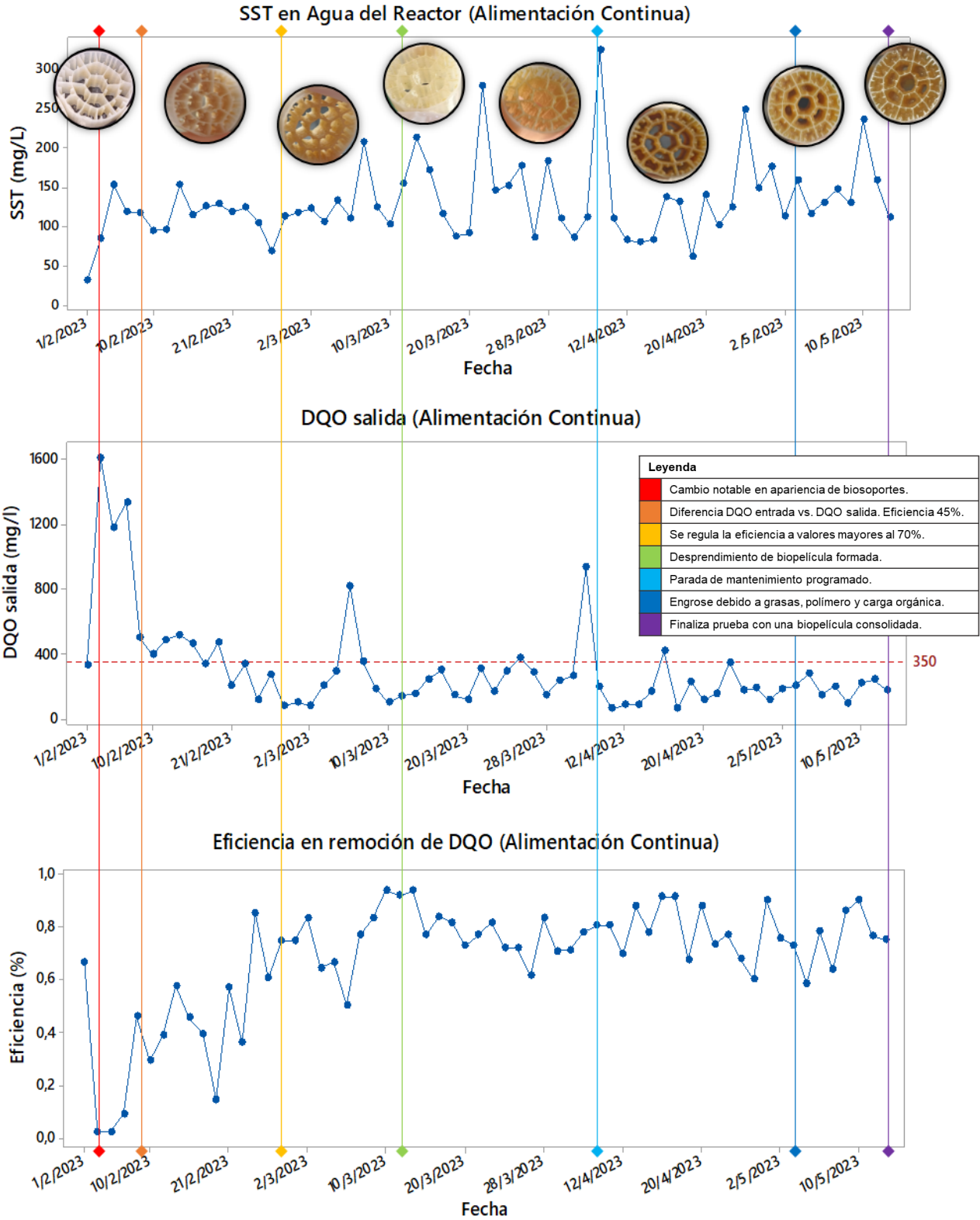


Figura 48. Gráfica de serie de tiempo prueba piloto MBBR con alimentación continua.
 Fuente: Cerezo, 2023.

4.4.2 Resultados para parámetros críticos de calidad.

Se utilizó el software estadístico Minitab para determinar valores representativos de los parámetros críticos de calidad a partir de las cifras conseguidas experimentalmente. En consideración de la anterior sección, fueron seleccionados para el análisis los datos recolectados una vez se normalizó el comportamiento de la eficiencia durante la alimentación continua, específicamente, a partir del 28 de febrero del 2023. El procedimiento seguido para el análisis de la data recolectada desde el día señalado hasta el final de la prueba en modo continuo se describe a continuación, donde fueron empleadas técnicas estadísticas mencionadas en el marco metodológico de la investigación con un nivel de significancia del 0,05.

Para empezar, se utilizaron pruebas de hipótesis para la **separación de los valores atípicos**. En la siguiente figura, se muestran las gráficas obtenidas al introducir los datos en el software estadístico, así como una explicación para aquellos que resultan irregulares.

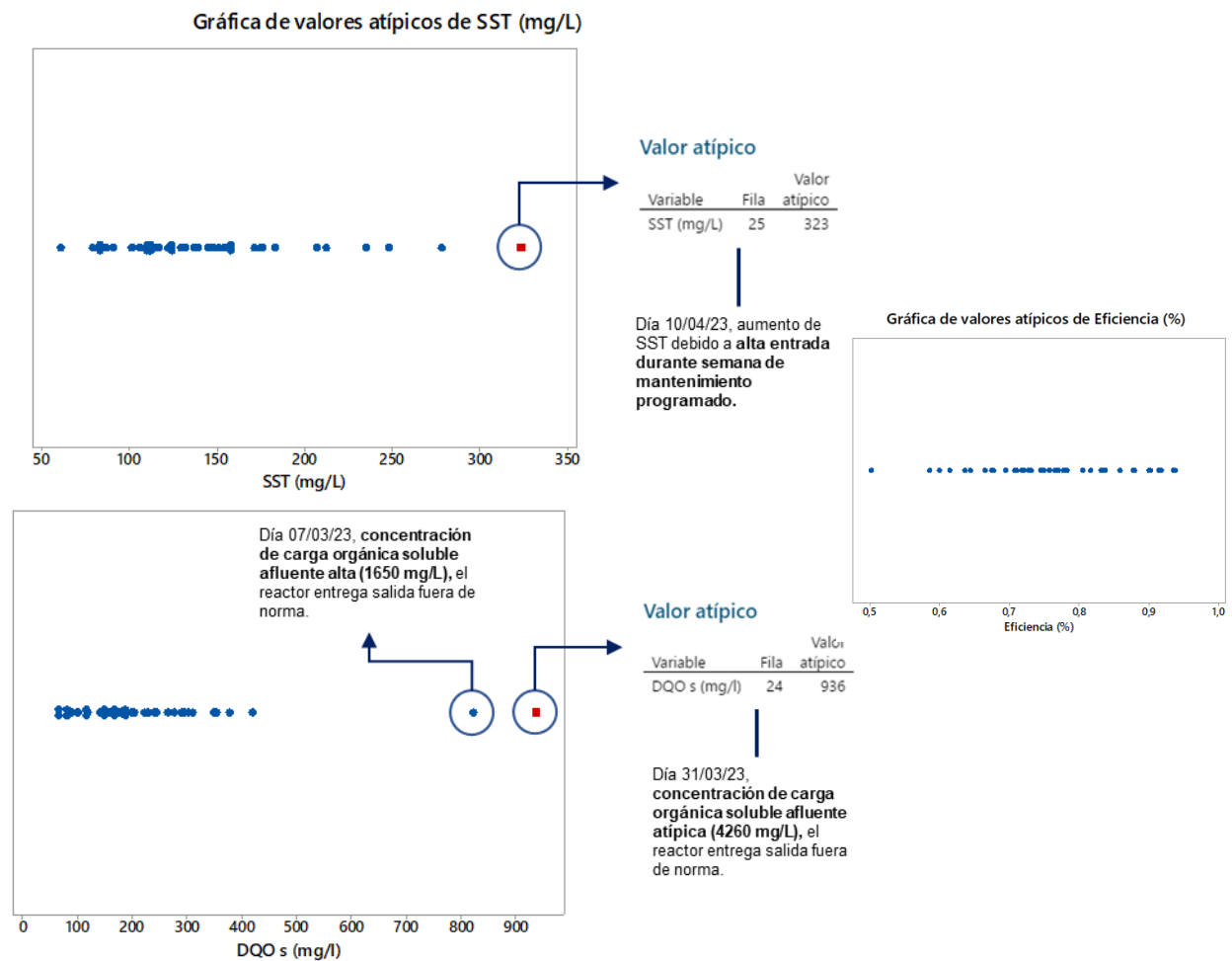


Figura 49. Determinación de valores atípicos recolectados en la prueba.

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. Para este último mencionado se identificó un valor más que se separaba significativamente de los otros, asociado a un evento irregular dado en la planta de tratamiento. 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 (Ver figura 50). 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, ya que los *valores p* obtenidos son mayores a 0,05. 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.

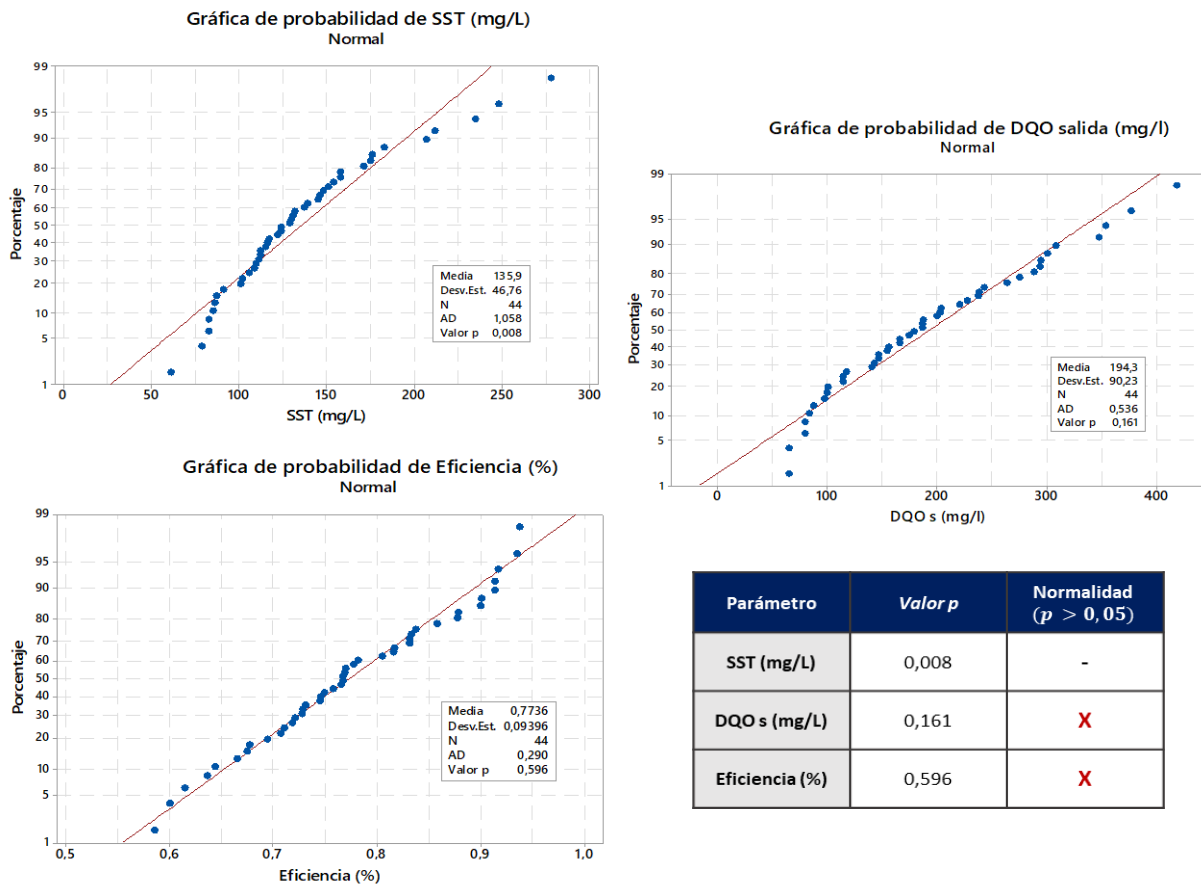


Figura 50. Prueba de normalidad aplicada a la data depurada.

Fuente: Cerezo, 2023.

Con referencia a las anteriores deducciones, en el cuadro 25 se muestran los resultados para las variables críticas estudiadas. En referencia 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 afluente 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 25. Resultados finales para parámetros críticos de calidad.

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

Fuente: Cerezo, 2023.

Resulta oportuno recordar que, actualmente, la planta de tratamiento de aguas residuales de Alimentos Polar Comercial – “Planta Salsa y Untables”, maneja una eficiencia del 66%, trabajando con condiciones de producción de 11.500 TON/mes y una concentración de sólidos dentro del tanque de aireación cercana a 1500 mg/L. En este propósito, el desempeño de la tecnología MBBR ante la condición de un aumento en la producción de todas las categorías de productos, es incluso superior al del modelo convencional con las condiciones existentes, demostrando su efectividad como alternativa para el aumento de la capacidad del sistema de tratamiento biológico.

4.4.3 Microbiología MBBR.

El tratamiento biológico inicia con la formación de flóculos a partir del proceso metabólico de los microorganismos. Estas estructuras tienen componentes biológicos y no biológicos, la parte biológica consiste en bacterias, protozoarios (ciliados, flagelados y amebas) y metazoarios (rotíferos y nemátodos), los componentes no biológicos integran a partículas orgánicas e inorgánicas. En el marco teórico de la presente investigación se citó información sobre el aspecto esperado de los flóculos pertenecientes a un sistema convencional por lodos activados, donde los autores coinciden en que deben tener un tamaño mediano o grande, forma irregular, con bacterias filamentosas que consoliden la estructura, más no excedan los límites de esta.

Con el fin de comparar la microbiología de un sistema convencional y la de un sistema MBBR, se realizaron análisis microscópicos semanales con muestras de agua del reactor biológico

de la PTAR y agua del reactor piloto MBBR. Además, se agregó a la evaluación una solución de limpieza del biosoporte compuesta por los sólidos desprendidos de la biopelícula formada al agitarla en líquido. A continuación, se muestran las imágenes más representativas capturadas (Ver figura 51).



Figura 51. Imágenes representativas de flóculo formado capturadas en el microscopio.

Fuente: Cerezo, 2023.

Como puede observarse, la figura (a) cumple con las características señaladas de un flóculo para un sistema convencional por lodos activados, su tamaño es grande, se muestra denso y las bacterias filamentosas encargadas de mantener su estructura no se extienden más allá del flóculo. Por otro lado, la figura (b) es completamente distinta, se observa un crecimiento filamentos, con pocas partículas sólidas presentes entre los hilos formados. Anteriormente se mencionaba, los sólidos presentes en el agua del reactor piloto MBBR son el producto del cizallamiento dado entre los biosoportes y los sólidos recibidos en la alimentación, la imagen presentada evidencia dicha afirmación. Con respecto a la solución de limpieza del biosoporte capturada en la figura (c), se confirma la existencia de una comunidad microbiológica protegida en el medio plástico, en otras palabras, la formación de una biopelícula.

En este orden de ideas, se muestran los microorganismos capturados en la solución de limpieza a lo largo del período estudiado (Ver figura 52), así como una descripción de su papel según la bibliografía consultada.

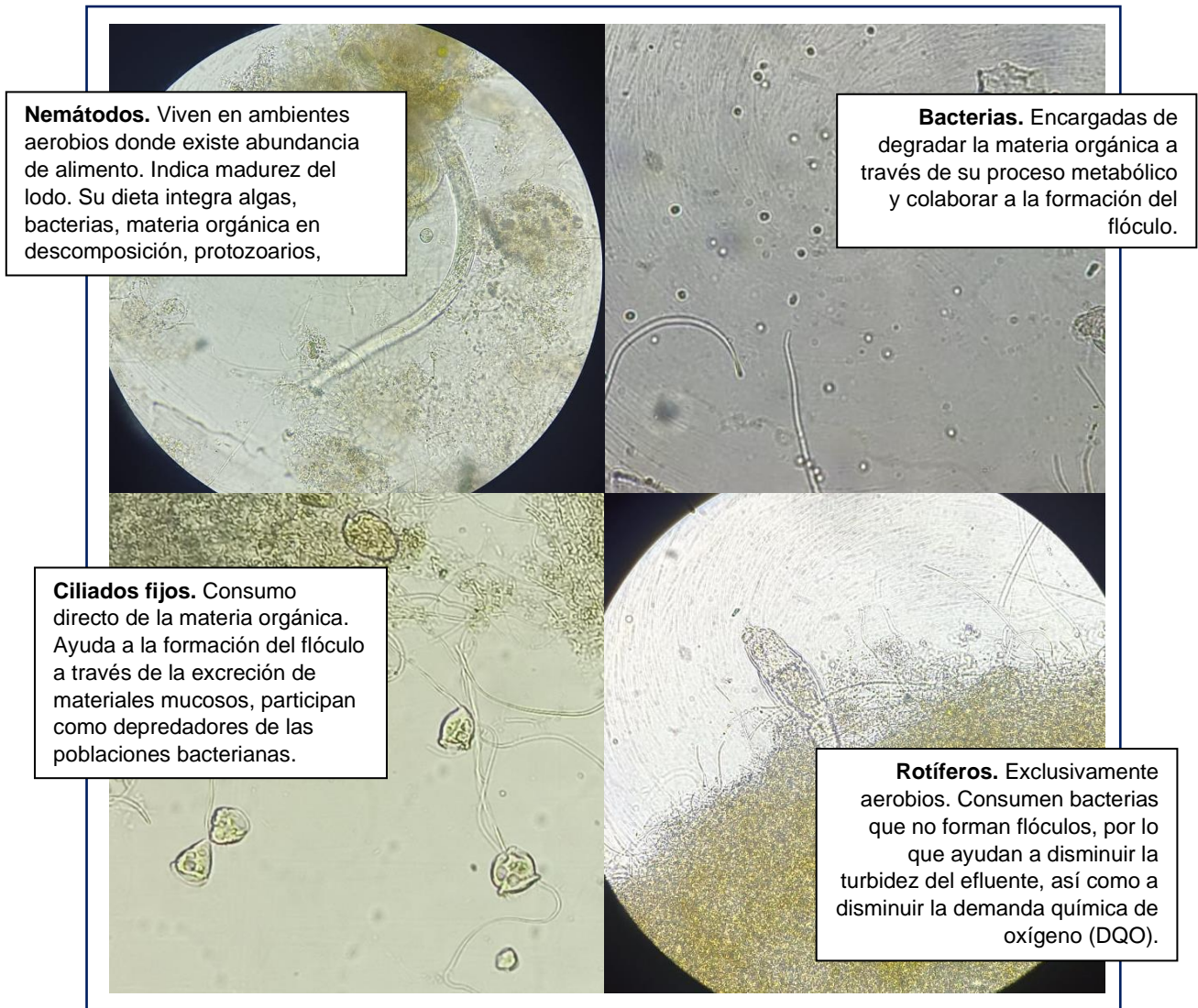


Figura 52. Imágenes representativas de microorganismos presentes en el reactor piloto MBBR.

Fuente: Cerezo, 2023.

Hecha las observaciones anteriores, se puede concluir que existe un balance en la comunidad microbiológica del sistema MBBR. En la biopelícula conviven consumidores, reproductores y descomponedores, regulando constantemente la actividad y manteniendo el orden dentro del ecosistema que se desarrolló en los soportes.

Los sistemas convencionales requieren recirculación de lodo biológico al proceso para mantener el balance entre las edades de la biomasa. Por el contrario, la tecnología MBBR se caracteriza por tener un mayor tiempo de retención de lodos al estos hallarse adheridos al medio plástico, y, como resultado, promueve la madurez de la biomasa (evidenciado con la presencia de nemátodos y rotíferos) sin necesidad de recirculación.

4.4.4 Modelización matemática del desempeño del reactor piloto en función de los resultados obtenidos en el plan de inspección y ensayo.

En el marco teórico de la presente investigación, se hizo referencia al SALR como el parámetro de diseño más relevante en sistemas MBBR, se trata de la carga diaria que es proporcionada al reactor según la cantidad de área protegida disponible. Este parámetro está acompañado por el SARR, el cual responde a la carga diaria removida entre el área protegida proporcionada por los biosoportos. Anteriormente se explicaba, que se puede representar la eficiencia del sistema como la división SARR/SALR.

El diseño a escala real del reactor con tecnología MBBR requiere establecer un valor óptimo de SALR. Si bien a comienzos del proyecto se utilizó un SALR de $6,5 \text{ gDBO}/\text{m}^2 \text{ d}$, el proveedor de los medios de soporte dio a conocer un intervalo a respetar para asegurar un sistema consolidado, comprendido entre 8 a $14 \text{ gDBO}/\text{m}^2 \text{ d}$.

Ante la situación planteada, se realizó un estudio de los valores para SALR obtenidos y la respuesta en remoción del sistema representada por la variable SARR, con el propósito de encontrar una ecuación capaz de describir la relación entre ambas. Posteriormente, se instauró un modelo matemático a través de programación no lineal para determinar el valor óptimo del parámetro de diseño.

Para concluir esta fase, se añadió el análisis del comportamiento en el peso registrado a lo largo del tiempo. El análisis constó de dos etapas, en la primera fue calculada una ecuación característica del crecimiento observado y, en la segunda se modelaron las fluctuaciones detectadas en los valores recolectados.

Modelo de relación existente entre el SARR/SALR.

Con el fin de conocer la relación existente entre las variables fue utilizado un gráfico de dispersión con línea ajustada, donde el SALR era la variable predictora, debido a que es definida en la etapa de diseño, y el SARR era la variable respuesta, ya que se esperaba que dependiera de la carga orgánica introducida al sistema.

Como se observa en la figura 53, la correlación entre ambas variables es positiva: cada vez que aumenta el SALR, aumenta proporcionalmente el SARR. En este sentido, entre más carga orgánica entre al sistema, este aumentará su remoción proporcionalmente, respondiendo con habilidad a los distintos incentivos. El punto más alejado de SALR corresponde a un valor de $59,05 \text{ gDBO}/\text{m}^2 \text{ d}$, y el sistema logra entregar un SARR del $53,96 \text{ gDBO}/\text{m}^2 \text{ d}$.

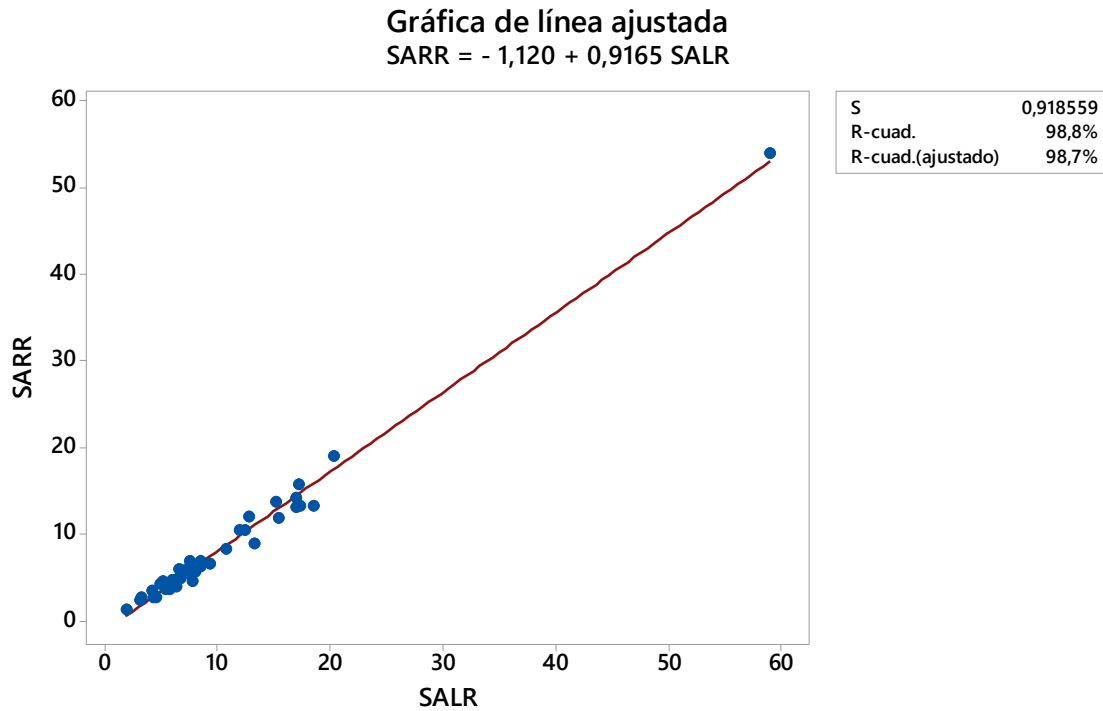


Figura 53. Gráfica de línea ajustada SARR/SALR.

Fuente: Cerezo, 2023.

Según se observa, la relación entre ambas variables es claramente lineal. La medida estadística R-cuadrado con un valor de 0,987 indica que la recta calculada logra adaptarse al comportamiento de los datos. Finalmente, se consigue que la relación SARR/SALR puede ser descrita mediante la siguiente ecuación:

$$SARR = -1,120 + 0,9165 SALR$$

Diseño de modelo matemático SARR/SALR mediante programación no lineal.

Como se mencionó en capítulos pasados, un problema de optimización está basado en tres elementos: variables definidas para la toma de decisión, una función objetivo sobre la cual se establezca la meta del modelo y unas restricciones en formas de inequaciones para establecer valores límites según las variables de decisión.

A efectos del modelo matemático a diseñar para encontrar el valor óptimo de las variables SALR y SARR, será utilizada como función objetivo la recta previamente calculada que describe la relación entre ambas variables. Se trata de un problema de maximización, entendiendo que, para

valores más altos de remoción de carga orgánica (SARR), se requiere una entrada superior (SALR).

Las restricciones para el modelo fueron instauradas partiendo de los siguientes criterios:

1. Según recomendación del fabricante, el SALR de diseño debe estar entre 8 a 14 $gDBO/m^2 d$. De esta manera, se garantiza el crecimiento de biomasa saludable sin arriesgar una posible obstrucción de los medios de soporte.
2. El Decreto 3.219 para vertido de aguas residuales en la cuenca del Lago de Valencia (Ver tabla 3), dicta que la concentración de DQO en el efluente debe ser inferior a 350 mg/L. Por su lado, la cantidad de DQO en la alimentación al reactor proyectada para 18.000 TM/mes es de 759 mg/L según la herramienta Biologyx.

Tomando en cuenta que la relación SARR/SALR equivale a la eficiencia del sistema MBBR, entonces:

$$\eta = \frac{759 - 350}{759} = \frac{SARR}{SALR} = 0,54$$

De lo anterior se obtiene, la relación SARR/SALR debe ser mínimo 0,54 para que el sistema MBBR logre cumplir con la normativa ambiental vigente. Con el propósito de disminuir el riesgo de salidas fuera de norma, se decidió utilizar un factor de seguridad del 15%, elevando el límite hasta 0,62. En función de la eficiencia promedio conseguida experimentalmente (Ver cuadro 1), se considera un valor alcanzable para el sistema MBBR.

Luego, se puede expresar como:

$$\checkmark \quad SARR * SALR^{-1} \geq 0,62$$

3. Si la relación SARR/SALR debe ser mínimo 0,62, los valores para SARR (basados en el margen para SALR establecido en la restricción 1) deben encontrarse entre 4,96 y 8,68 $gDBO/m^2 d$.

4. El porcentaje de relleno afecta directamente a la movilidad de los biosoportes, por lo que debe ser inferior al 67%. No obstante, por recomendación del proveedor y, por los resultados obtenidos con los distintos métodos de alimentación, este debe ser mínimo del 25%. Encima, atendiendo a la rentabilidad económica del proyecto y a dejar espacio para posibles expansiones, se establece un relleno máximo del 30%. Hechas las observaciones anteriores, se tiene:

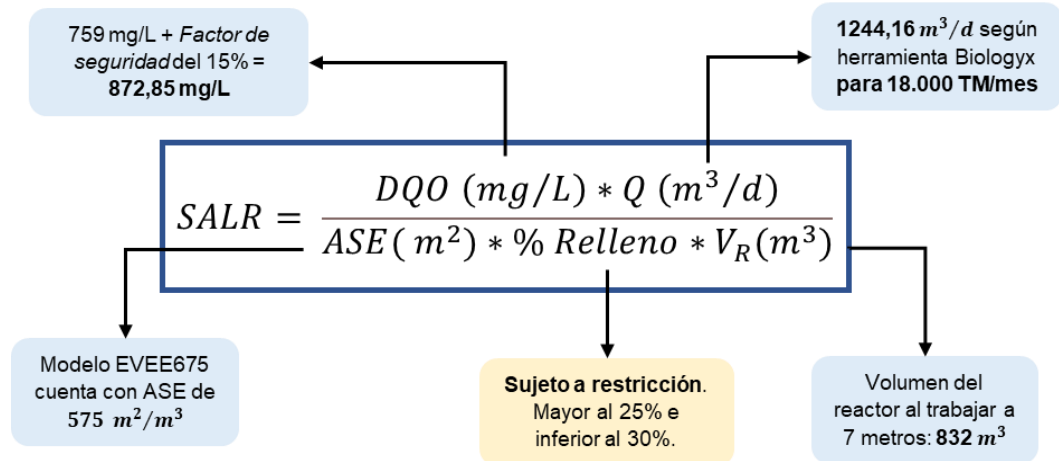


Figura 54. Porcentaje de relleno de biosoportes como variable del parámetro SALR.

Fuente: Cerezo, 2023.

Sustituyendo valores conocidos,

$$SALR = \frac{872,85 * 1244,2}{575 * \% Relleno * 832} = \frac{2,27}{\% Relleno}$$

Por lo tanto, se puede expresar como:

$$\begin{aligned} \checkmark \quad & 2,27 * SALR^{-1} \geq 0,25 \\ \checkmark \quad & 2,27 * SALR^{-1} \leq 0,30 \end{aligned}$$

Después de lo anterior expuesto, se diseñó el modelo matemático que representa el rendimiento de la prueba realizada y, además, encuentra el valor óptimo para el parámetro de diseño principal en sistemas MBBR (Ver figura 55).

Maximizar
 $Z = -1,120 + 0,9165 * SALR - SARR$

Sujeto a las restricciones

$$SALR \geq 8$$

$$SALR \leq 14$$

$$SARR * SALR^{-1} \geq 0,62$$

$$SARR * SALR^{-1} \leq 1$$

$$SARR \geq 4,96$$

$$SARR \leq 8,68$$

$$2,27 * SALR^{-1} \geq 0,25$$

$$2,27 * SALR^{-1} \leq 0,30$$

y

$$SALR, SARR > 0$$

Figura 55. Modelo matemático de programación no lineal – SALR.

Fuente: Cerezo, 2023.

Finalmente, fue utilizada la herramienta *Solver* de Excel para determinar la solución óptima que cumpla con todas las restricciones aplicadas a los valores de SALR y SARR. En el cuadro 26, se muestran los resultados al dejar correr las iteraciones en el software, donde el valor óptimo para SALR es $9,08 \text{ gDBO}/\text{m}^2 \text{ d}$ con un SARR de $5,63 \text{ gDBO}/\text{m}^2 \text{ d}$, asegurando una eficiencia del 62%.

Cuadro 26. Resultados de modelo matemático de programación no lineal – SALR.

Función Objetivo	1,572222687				
	X (SALR)	Y (SARR)			Sustitución
R1	1		\geq	8	9,08
R2	1		\leq	14	9,08
R3	1	1	\geq	0,62	0,62
R4	1		\leq	1	0,62
R5			\geq	4,96	5,63
R6			\leq	8,68	5,63
R7	2,27		\geq	0,25	0,25
R8	2,27		\leq	0,35	0,25
VARIABLE					
X	9,08000906				
Y	5,62960562				
Z	1,57222269				

Fuente: Cerezo, 2023.

Modelo del comportamiento de la biopelícula a lo largo del tiempo.

Como se estableció en el plan de inspección y ensayo, regularmente se registraba el peso de los medios de soporte con el propósito de evaluar la biopelícula en formación durante el período de prueba. En la figura 56 se muestra el comportamiento de la biomasa acumulada dentro de los medios plásticos en el tiempo, señalando cambios relevantes experimentados con líneas verticales.

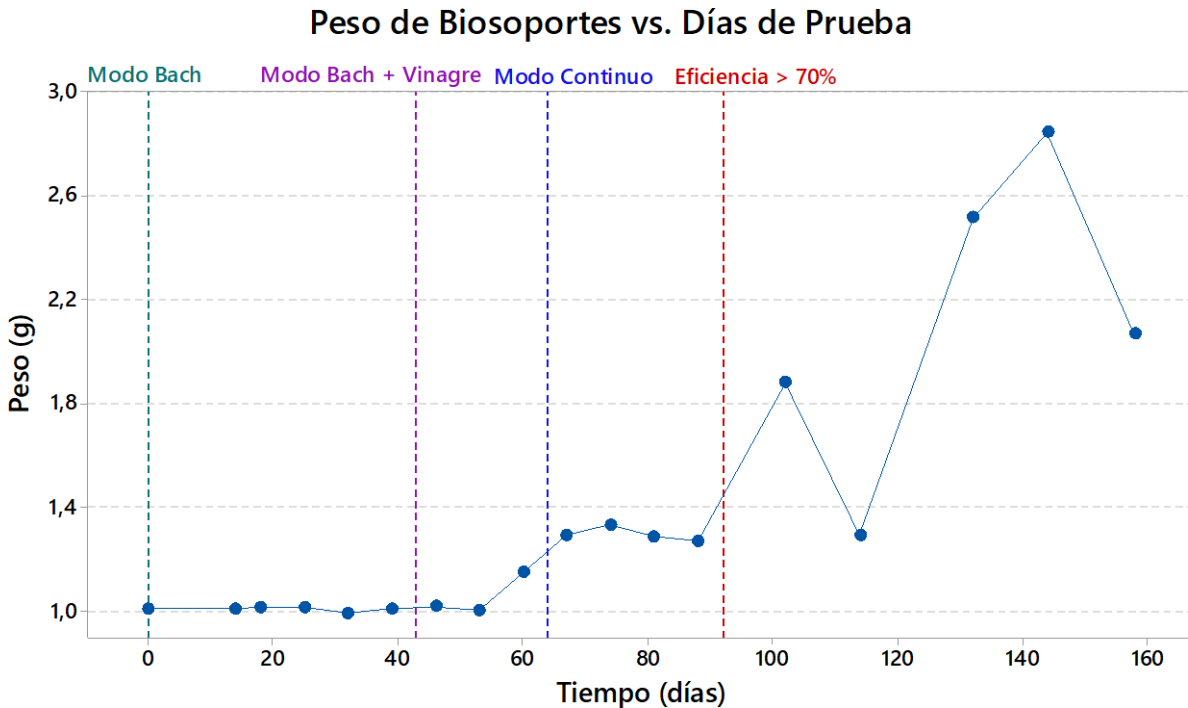


Figura 56. Peso de Biosoportres vs. Días de Prueba.

Fuente: Cerezo, 2023.

De lo anterior se obtiene, no hubo variaciones destacables en el peso durante la alimentación por batch, a excepción de los días en que se aumentó la carga orgánica soluble mediante la adición de vinagre. Recordando que agregar el producto rico en DQO permitió conseguir valores ligeramente más altos para el parámetro SALR, y en este sentido, promovió el desarrollo de biomasa considerando el área protegida disponible.

Seguidamente, se observa que durante las primeras semanas de alimentación continua la curva imitaba la tendencia al añadir vinagre, para luego linealizarse. Después, se encuentra la etapa donde la eficiencia es superior al 70%, ubicada desde el día 28 de febrero mencionado en el análisis estadístico. Esta última etapa presenta un comportamiento distinto a las demás, donde el peso del biosoporte gana valor en gramos y días después disminuye, siguiendo un patrón.

Hechas las consideraciones anteriores, se obtuvo un modelo matemático que describiera el comportamiento de la biopelícula con la utilización del algoritmo de Levenberg-Marquardt. Para ello, fue empleado el programa de procesamiento de datos Curve Expert, en el que se introdujeron las cifras recolectadas experimentalmente y se seleccionó un modelo logístico mejor adaptado a las características de estas.

La selección del modelo logístico se basó en que este debía ser acotado, es decir, obedeciendo a que el desarrollo de la biopelícula en los medios de soporte no tiene un crecimiento infinito, este presenta caídas encargadas de regular el crecimiento que garantizan la transferencia de oxígeno y sustrato a través del medio. En este sentido, fue escogido el modelo de Weibull, el cual recrea un crecimiento exponencial que luego logra estabilizarse, este viene expresado mediante la siguiente expresión matemática:

$$y = a - be^{-cx^d}$$

Donde a , b , c y d son parámetros por definir con las iteraciones del algoritmo, mientras que x es la variable predictora (tiempo en días) y y es la variable respuesta (peso de soportes en gramos). A continuación, se muestra la ecuación conseguida y su representación gráfica.

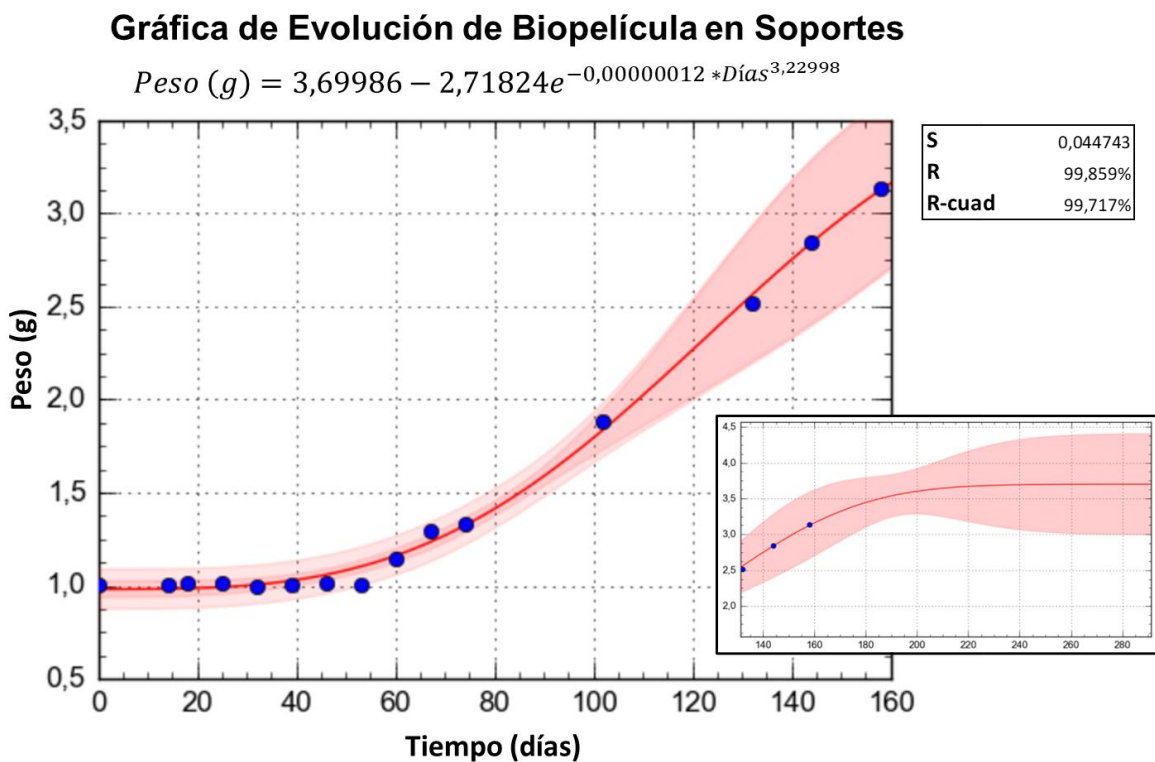


Figura 57. Gráfica de modelo evolución de biopelícula en soportes.

Fuente: Cerezo, 2023.

- La curva logra adaptarse a los datos en un 99,717%, siendo fiable para la representación de la tendencia de la biopelícula en los medios de soporte.
- El modelo logístico seleccionado establece 3,69 gramos como valor máximo para el peso de los soportes (Ver figura 58)

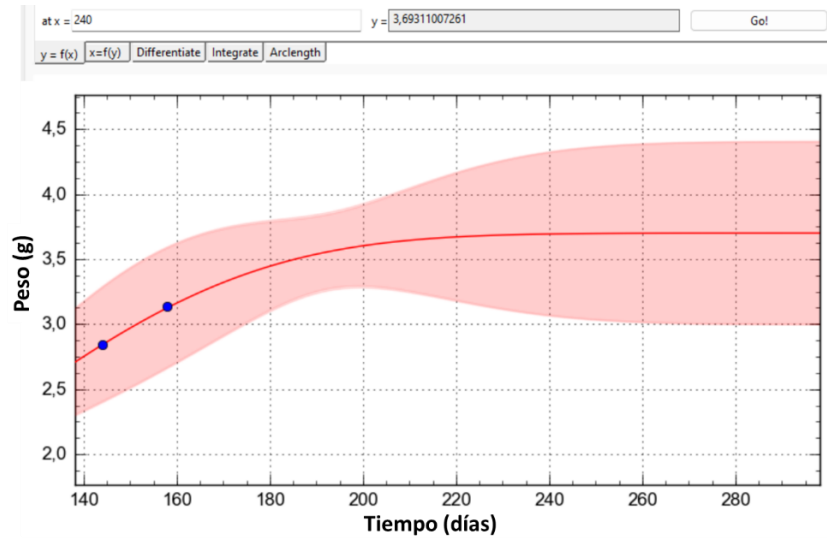


Figura 58. Valor máximo para el peso de biosoportres según modelo matemático.

Fuente: Cerezo, 2023.

- Se comenzarán a obtener valores de eficiencia en remoción de carga orgánica mayores al 70% cuando los medios de soportes alcancen una media en peso de 1,63 gramos (Ver figura 59).

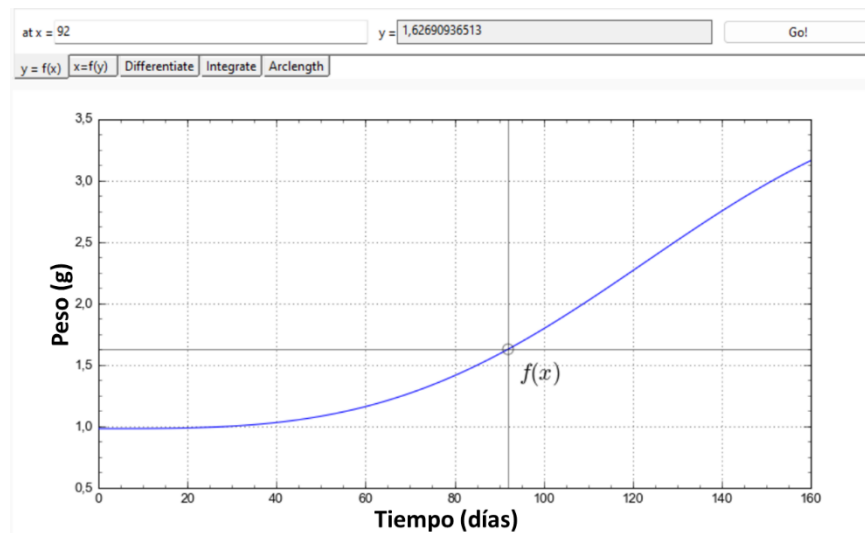


Figura 59. Peso para comenzar a ganar eficiencia superior al 70%.

Fuente: Cerezo, 2023.

En este orden de ideas, se realizó un ajuste de curvas para la etapa de regulación observada en los medios plásticos. Para determinar el ajuste no lineal correspondiente, se dividieron los datos según los días en que se notan cambios en la curva. Considerando lo anterior, en el siguiente cuadro se describen los intervalos de tiempo utilizados en cada curva calculada.

Cuadro 27. Intervalos de tiempo para etapas de regulación de biopelícula.

N° Intervalo	Intervalo de tiempo (t = días)
1	$53 \leq t \leq 81$
2	$81 < t \leq 114$
3	$114 < t \leq 158$

Fuente: Cerezo, 2023.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos con la herramienta Curve Expert, estos incluyen la ecuación que describe el comportamiento de la curva para los puntos específicos, el modelo logístico utilizado y la evaluación de la adaptabilidad de la curva a los datos experimentales por medio del valor R^2 .

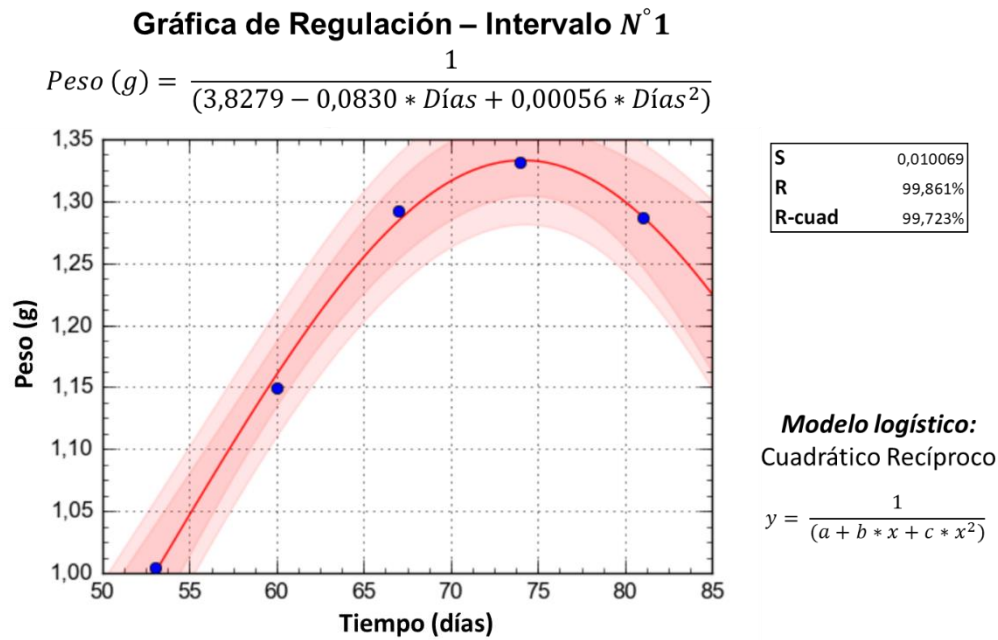


Figura 60. Modelo regulación de biosoporte – intervalo $53 \leq t \leq 81$.

Fuente: Cerezo, 2023.

Gráfica de Regulación – Intervalo N° 2

$$\text{Peso (g)} = 1,54531 + 0,33734 * \cos(0,19032 * \text{Días} - 0,42579)$$

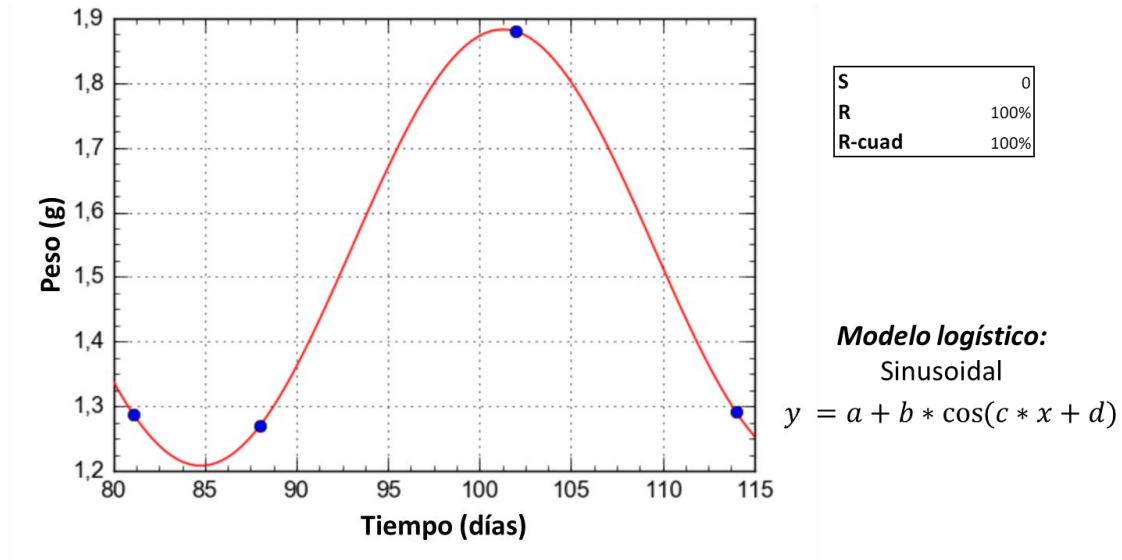


Figura 61. Modelo regulación de biosoporte – intervalo $81 < t \leq 114$.

Fuente: Cerezo, 2023.

Gráfica de Regulación – Intervalo N° 3

$$\text{Peso (g)} = 2,02335 + 0,83721 * \cos(0,09457 * \text{Días} - 7,14047)$$

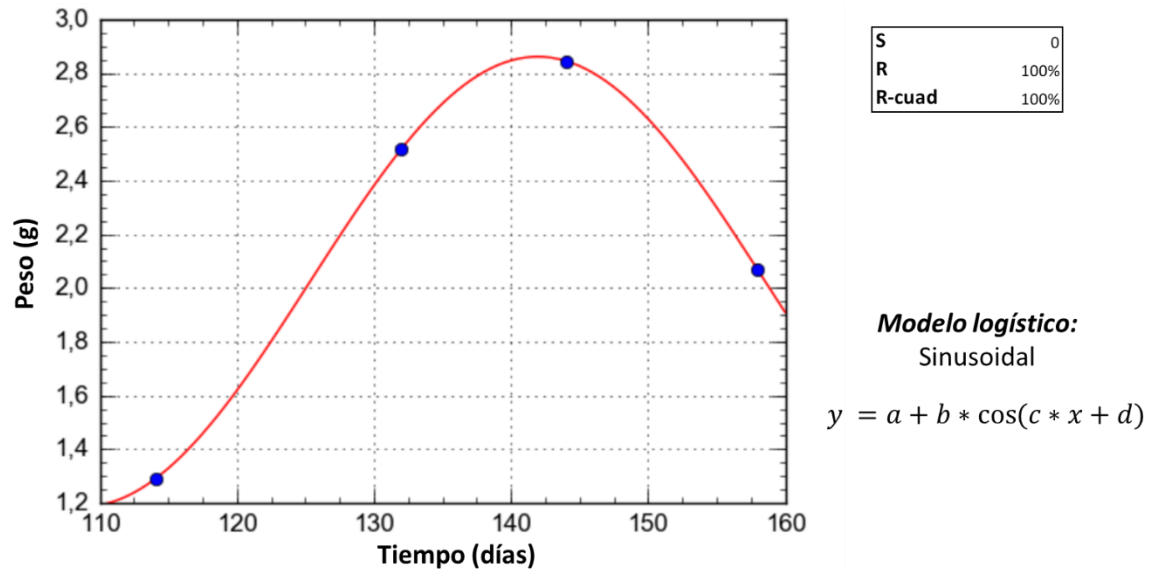


Figura 62. Modelo regulación de biosoporte – intervalo $114 < t \leq 158$.

Fuente: Cerezo, 2023.

Tal como se ha visto, el peso de los medios de soporte presenta una oscilación repetitiva a lo largo del tiempo, asimilándose al comportamiento de una curva sinusoidal con pendiente positiva. Lo anterior demuestra la habilidad del sistema para controlar la densidad de la biopelícula formada.

4.5 FASE V: Determinación de la factibilidad operativa, técnica, ambiental, social y económica de la propuesta.

En esta etapa, se evaluará la factibilidad de implementación de la propuesta presentada, esta consiste en adaptar las condiciones actuales de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales existente en Alimentos Polar Comerciales – “Planta Salsas y Untables” a los requerimientos técnicos necesarios para el funcionamiento de la tecnología MBBR, con el objetivo de aumentar su capacidad para el aprovechamiento total de los equipos instalados en las áreas productivas. La evaluación se realizará desde la dimensión operativa, técnica, ambiental, social y económica.

4.5.1 Factibilidad Operativa

Con la implementación de la tecnología MBBR se mantienen las actividades de trabajo que realizan cada uno de los operadores sin mayores modificaciones en sus rutinas. No se requiere mano de obra adicional, dado que la empresa cuenta con los recursos de personal necesarios para el control de la tecnología, tanto a nivel operativo como de mantenimiento. Sin embargo, el seguimiento de las condiciones dadas en el reactor requiere adiestramiento para su correcta interpretación.

Los supervisores y analistas deben estar involucrados desde el inicio de la implementación hasta la puesta en marcha y seguimiento del funcionamiento de la tecnología MBBR. Por este motivo, es necesario un plan de capacitación para el equipo de trabajo de la planta de tratamiento de aguas residuales. Dicho plan de capacitación se generó teniendo en cuenta la importancia de la gestión del cambio, ya que permite asumir modificaciones con objetividad y entendimiento.

En este sentido, una de las técnicas sugeridas para la asimilación de cambios es el modelo ADKAR, los pasos que componen al modelo por sus siglas en inglés son:

- 1. Consciencia.**
- 2. Deseo.**
- 3. Conocimiento.**
- 4. Habilidad.**
- 5. Consolidación.**

El modelo pretende lograr una asimilación del cambio mediante hacer notar la necesidad por la mejora a realizar, conseguir que los miembros quieran participar y apoyen las actividades

necesarias para la transición, compartir el conocimiento y entrenamiento para el desarrollo de las actividades y, finalmente, consolidar lo enseñado para asegurar el cumplimiento a largo plazo.

El alcance de la planificación para la formación fue definido a partir de los pilares del modelo. Contiene los fundamentos teóricos y prácticos necesarios para la realización efectiva de las nuevas actividades, a la vez que fomenta la participación de quienes operan el área y da a entender la necesidad y los beneficios del cambio tecnológico. Es importante destacar, los conocimientos adquiridos deben ser reforzados en el tiempo, por ello se planificó una segunda jornada de capacitación. A continuación, se muestra en el cuadro 28 los planes de capacitación propuestos, donde uno corresponde a formación y el segundo a la consolidación, con dos meses de diferencia entre ellos.

Cuadro 28. Planificación de capacitación para el equipo de trabajo.

Planificación de Capacitación					Estatus		
Actividad	Alcance	Lugar	Fecha	Facilitador	Planif.	Ejec.	Posp.
Formación	Tecnología MBBR	Salón de Formación/PTAR	ago-23	Ing. Especialista en Aguas	X		
	Evaluación de apariencia de los medios de soporte						
	Aireación en sistemas MBBR						
	Cambios en ensayos de parámetros críticos						
	Cálculo de SALR						
	Detección de situaciones críticas						
	Acciones ante situaciones críticas						
	Personal responsable						
Comunicación							
Consolidación	Tecnología MBBR	Salón de Formación/PTAR	oct-23	Ing. Especialista en Aguas	X		
	Evaluación de apariencia de los medios de soporte						
	Aireación en sistemas MBBR						
	Cambios en ensayos de parámetros críticos						
	Cálculo de SALR						
	Detección de situaciones críticas						
	Acciones ante situaciones críticas						
	Personal responsable						
Comunicación							

Fuente: Cerezo, 2023.

4.5.2 Factibilidad Técnica

Como se analizó en la Fase II de la investigación, la implementación de la tecnología MBBR en el sistema biológico de Alimentos Polar Comercial “Planta Salsas y Untables”, requiere la modificación de pocos componentes actuales, esto representa una virtud frente a otras alternativas de ampliación de capacidad, donde no es necesario tener una mayor área disponible o una compleja instalación de diversos equipos. A continuación, se muestra en el cuadro 29, los equipos y materiales necesarios para el desarrollo óptimo del proyecto, donde los que se encuentran en planta están subrayados en color verde, mientras los que se deben adquirir en azul.

Cuadro 29. Equipos y materiales requeridos para el desarrollo óptimo del proyecto.

Nombre	Descripción
Medios de plástico	Biosoportes plásticos donde crecerá biopelícula encargada de degradar la carga orgánica
Malla de detención de medios de soporte	Malla de alambre de acero inoxidable, para optimizar el movimiento del agua y de los medios de soporte, área abierta mínima del 70%
Difusores de aireación de burbuja gruesa	Difusores de burbuja gruesa capaces de distribuir uniformemente los biosoportes y entregar una buena eficiencia en transferencia de oxígeno
Tubería de descarga del reactor	Cambio de nivel de tubería de descarga del reactor biológico.
Sopladores	En función del flujo de aire requerido y el máximo flujo de aire permitido por la parrilla de difusores a instalar, se requiere sustituir los existentes.
Tanque de concreto	Reactor biológico
Tubería de alimentación al reactor	Alimentación desde estación de bombeo
Bombas centrífugas	Bombas encargadas de elevar el líquido hasta el reactor biológico
Unidad DAF	Unidad de flotación por aire disuelto encargada de remover sólidos de la superficie

Fuente: Cerezo, 2023.

En ese mismo sentido, forma parte de la evaluación técnica el **ajuste de la dosificación de polímero** necesaria para la separación de las partículas generadas por un sistema MBBR, atendiendo a que estas suelen ser menos densas y aglomeradas que las producidas en un sistema convencional por lodos activados. Se contrató a la empresa Nalco Water, proveedora de los sacos de floculante utilizados en la planta de tratamiento de aguas residuales, para realizar pruebas de jarra que permitieran conocer la dosis de polímero necesaria para separar los sólidos en un biorreactor MBBR, donde se obtuvo que es la mitad de la requerida para un tratamiento por fangos activados (Ver Anexo G).

A efectos del **mantenimiento requerido a los equipos**, se debe tomar en cuenta que la tecnología MBBR dentro de sus bondades presenta poca necesidad de intervención, favoreciendo al funcionamiento del reactor y respondiendo a que las actividades de mantenimiento continúen realizándose dos (2) veces al año, es decir, no variará ampliamente la programación del departamento. De forma específica, se resalta que se trata de un sistema autorregulador, por medio de la aireación y el cizallamiento entre los medios de soporte se logra desprender la biopelícula que se forma en exceso. Por esta razón, el mantenimiento debe estar enfocado en los equipos

exteriores al biorreactor que proveen las condiciones para un tratamiento óptimo. De esta manera, se establecen dos prioridades:

- Mantener un buen funcionamiento de las unidades de clarificación que se ubican antes y después del reactor biológico, para impedir la entrada de lodos químicos, así como disminuir la concentración de sólidos efluentes.
- Garantizar la armonización de los afluentes en los tanques homogenizadores para evitar cambios repentinos de condiciones en el reactor biológico.

Estos criterios forman parte de la rutina de mantenimiento actual dentro de la planta de tratamiento de aguas residuales, ya que, igualmente se necesita promover condiciones favorables para el tratamiento biológico por lodos activados. Para ilustrar las actividades de mantenimiento a realizar, se desglosan en el cuadro 30.

Cuadro 30. Plan de mantenimiento preventivo para implementar tecnología MBBR.

Actividad	Departamento	Responsable	Frecuencia/Mes													
			E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D		
Mantenimiento Preventivo Unidad DAF I	Servicios Industriales	Supervisor de Mantenimiento Eléctrico/Mecánico				X										X
Mantenimiento Preventivo Unidad DAF II	Servicios Industriales	Supervisor de Mantenimiento Eléctrico/Mecánico				X										X
Mantenimiento Preventivo Tanques Homogenizadores	Servicios Industriales	Supervisor de Mantenimiento Eléctrico/Mecánico				X										X
Mantenimiento autónomo Unidad DAF I	Servicios Industriales	Supervisor de Aguas	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Mantenimiento autónomo Unidad DAF II	Servicios Industriales	Supervisor de Aguas	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Mantenimiento autónomo Tanques Homogenizadores	Servicios Industriales	Supervisor de Aguas	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Fuente: Cerezo, 2023.

4.5.3 Factibilidad Ambiental

Las actividades industriales generan residuos nocivos para el medio ambiente, en particular, los procesos productivos que utilizan el agua como componente principal de sus productos y en sus operaciones de limpieza originan aguas residuales, estas se caracterizan por sus componentes físicos, químicos y biológicos, donde resaltan las materias orgánicas que necesitan oxígeno para ser degradadas. El vertimiento de estos líquidos contaminados a cuerpos de agua impacta negativamente al ecosistema acuático y terrestre, amenazando a la biodiversidad que se

desarrolla en estos espacios por medio de la eutrofización. En este sentido, es obligatorio implementar tecnologías de tratamiento que garanticen la calidad del agua para su vertido seguro y las empresas deben actuar ante este compromiso ambiental.

La propuesta presentada pretende aumentar la capacidad del sistema biológico para eliminar la restricción que impide utilizar la capacidad productiva instalada, garantizando el cumplimiento de la legislación con relación al vertido de aguas residuales a favor de la conservación ambiental, además, de evitar las posibles sanciones que serían dictadas si la producción actual aumenta sin realizar el ajuste en el sistema biológico. A continuación, en el cuadro 31, se muestran las sanciones que pueden recaer en Alimentos Polar Comercial – “Planta Salsas y Untables”, en referencia al vertido de aguas residuales fuera de parámetros normativos.

Como se ha mencionado a lo largo de la investigación, los componentes físicos y químicos de la descarga serán evaluados a partir de los fundamentos establecidos en el Decreto N° 3.219 para vertidos en la Cuenca Lago de Valencia.

Cuadro 31. Sanciones relacionadas con el vertido de aguas residuales sin tratar.

Base Legal	Descripción	Sanción
Ley Penal del Ambiente	Gaceta Oficial N°39.913 del 02 de mayo de 2012	
Capítulo II. Delitos contra la Ordenación de Territorio.	Artículo 39. Contravención de Planes de Ordenación del Territorio en Zonas Montañas.	Prisión de uno a dos años o multa de un mil unidades tributarias (1.000 U.T.) a dos mil unidades tributarias (2.000 U.T).
	Artículo 41. Modificación o Destrucción de Bienes Protegidos.	Prisión de dos meses a un año o multa de doscientas unidades tributarias (200 U.T.) a un mil unidades tributarias (1.000 U.T.)
Capítulo IV. Delitos contra la Diversidad Biológica.	Artículo 55. Daños por Aplicación de la Biotecnología.	Prisión de ocho a diez años o multa de ocho mil unidades tributarias (8.000 U.T.) a diez mil unidades tributarias (10.000 U.T.) y la disolución de la persona jurídica.
Capítulo VII. Destrucción, Alteración y demás Acciones Capaces de Causar Daño a la Vegetación, la Fauna o sus Hábitats.	Artículo 79. Alteración de cadenas tróficas.	Prisión de uno a tres años o multa de un mil unidades tributarias (1.000 U.T.) a tres mil unidades tributarias (3.000 U.T)

Capítulo VIII. Delitos contra la Calidad Ambiental.	Artículo 83. Corrupción y Envenenamiento de Aguas de Uso Público.	Prisión de dieciocho meses a cinco años o multa de un mil ochocientas unidades tributarias (1.800 U.T.) a cinco mil unidades tributarias (5.000 U.T.).
	Artículo 84. Vertido de Materiales Degradantes en Cuerpos de Agua.	Prisión de uno a dos años o multa de un mil unidades tributarias (1.000 U.T.) a dos mil unidades tributarias (2.000 U.T.).
	Artículo 87. Alteración Térmica de Cuerpos de Agua.	Prisión de tres meses a un año o multa de trescientas unidades tributarias (300 U.T.) a un mil unidades tributarias (1.000 U.T.).
Capítulo VIII. Sección cuarta: Sustancias y Materiales Peligrosos.	Artículo 104. Propagación de Enfermedades en Animales o Plantas.	Prisión de seis meses a dos años o multa de seiscientas unidades tributaria (600 U.T.) a dos mil unidades tributarias (2.000 U.T.).

Fuente: Cerezo, 2023.

4.5.4 Factibilidad Social

Según la Organización Mundial de la Salud (2022) la gestión inadecuada del recurso hídrico expone a la población a riesgos de contraer enfermedades, ya que implica que el agua que llega hasta las comunidades esté contaminada biológica o químicamente. En Venezuela, existe una crisis hídrica (Observatorio de ecología política de Venezuela, 2022), que presenta los siguientes factores: un severo problema de acceso al agua, baja calidad del recurso, contaminación en cuerpos de agua que afectan su ciclo hidrológico y mal funcionamiento de las instituciones encargadas de administrar el líquido. Ante esta situación, la exigencia a las empresas que generan aguas residuales se convierte en un compromiso social, entendiendo que sus acciones afectan al bienestar de la comunidad a la cual pertenecen e igualmente, está sancionado por el ente gubernamental pertinente (Ver cuadro 32).

Cuadro 32. Sanciones implicadas con el vertido de aguas residuales cerca de comunidades.

Base Legal	Descripción	Sanción
Ley Penal del Ambiente	Gaceta Oficial N°39.913 del 02 de mayo de 2012	
Capítulo VIII. Sección cuarta: Sustancias y Materiales Peligrosos.	Artículo 103. Generación de Epidemia.	Multa de seis mil unidades tributarias (6.000 U.T.) a diez mil unidades tributarias (10.000 U.T.) y su disolución.

Fuente: Cerezo, 2023.

La responsabilidad social empresarial de Alimentos Polar Comercial – “Planta Salsas y Untables”, abarca el cumplimiento de las especificaciones establecidas para la calidad del efluente entregado como actor influyente en la salud de la población. Las comunidades que se encuentra en las adyacencias de la empresa son principalmente El Roble, Los Guayos, Paraparal, Zona Industrial Sur, entre otras.

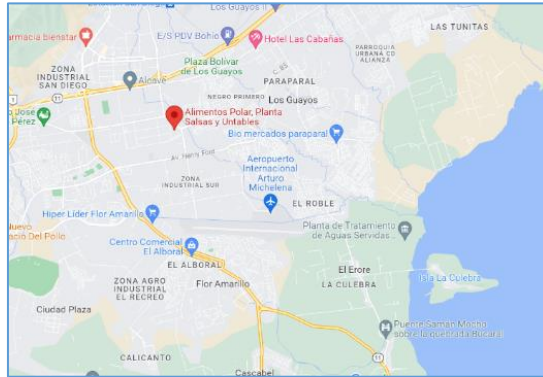


Figura 63. Adyacencias de APC – SyU.
Fuente: Cerezo, 2023.

4.5.5 Factibilidad Económica

Esta última evaluación planteó conocer la rentabilidad económica de la propuesta mediante la relación costo-beneficio, tomando como referencia cotizaciones realizadas por los proveedores para la adquisición de equipos faltantes, las sanciones que se podrían incurrir en el caso de entregar una descarga fuera de norma, la disminución en el consumo de polímero floculante, así como el costo de oportunidad que implica la limitación en las áreas productivas.

Cuadro 33. Cotización de proveedor de medios de soporte plásticos.

#	Equipo Incluido	Cantidad total
1	MBBR: Difusor de Burbuja Gruesa Modelo WBCB24 en acero inoxidable 304L o 316L con 44 ranuras para el funcionamiento del MBBR.	68
2	MBBR: Medio de Soporte para Biopelícula Medio de Soporte SSI modelo EEVE630 fabricado con HDPE. Superficie protegida $530 \text{ m}^2/\text{m}^3$	220 m^3
3	MBBR: Rejillas de retención Tres (3) rejillas por tanque MBBR de alambre de acero inoxidable, abertura mínima del 70%.	3

4	Servicio de Ingeniería y Archivos Electrónicos Incluye ingeniería de proceso básica, PID, diseños, cálculos de proceso y procedimientos de operación de MBBR	Global
Costo total		\$167,400 USD

Fuente: Cerezo, 2023.

Cuadro 34. Cotización de proveedor de sopladores.

#	Equipo Incluido	Valor Neto Unitario	Cantidad	Valor Total
1	Conjunto de soplador tipo EasyPack modelo SAE-DF 4512-75 Accesorios incluidos <ul style="list-style-type: none"> • Válvula de alivio tipo resorte calibrada. • Válvula cheque. • Indicador de presión (manómetro) inundado en glicerina. • Indicador visual de filtro obstruido. 	\$ 21,048 USD	2	\$42,096 USD
2	Cabina de insonorización con controlador de temperatura	\$ 3,935	2	\$7,870
Costo total				\$49,966 USD

Fuente: Cerezo, 2023.

Estimación de la inversión inicial.

Una vez se obtuvieron los costos de los equipos nuevos a implementar, fue estimada la inversión inicial total del proyecto, como la suma del capital fijo y el capital de trabajo.

$$II = CF + CT$$

Donde: II: Inversión inicial

CF: capital fijo

CT: capital de trabajo

Capital fijo.

- **Tangible.** Comprendido por los equipos nuevos adquiridos y los materiales necesarios para el cambio de nivel de la tubería de salida, se aproximó esta última inversión como un 10% del valor total de los equipos, por lo tanto:

$$\text{Materiales de tubería de salida} = 0,10 * \$217\,366 \text{ USD} = \$21\,736,6 \text{ USD}$$

- **Intangible.** En este caso está conformado por el costo involucrado con la capacitación del personal, la consultoría legal necesaria, el flete terrestre para el transporte de los materiales desde Colombia hasta Venezuela y la nacionalización del material. Igualmente, se incluye la instalación de los equipos adquiridos, con un valor aproximado del 5% del valor de los equipos, entonces:

$$\text{Instalación de equipos y materiales} = 0,05 * \$217\,366 \text{ USD} = \$10\,868,3 \text{ USD}$$

Capital de trabajo.

No figuran salarios para trabajadores, al tener en cuenta que se mantendrá la nómina actual. Se consideró prevenir posibles fallas en los equipos recién instalados al contemplar un 10% de los costos involucrados en su adquisición como un inventario de repuestos y materiales, que sirva de soporte ante cualquier imprevisto durante el proceso de arranque.

$$\text{Repuestos y Materiales} = 0,10 * \$217\,366 \text{ USD} = \$21\,736,6 \text{ USD}$$

Cuadro 35. Inversión Inicial.

Activo Fijo	Costo (\$)
TANGIBLES	
Equipos MBBR (SSI).	\$ 167 400 USD
Sopladores y Accesorios (SAE).	\$ 49 966 USD
Materiales tubería de salida.	\$21 736,6 USD
Total Tangibles	\$239 102,6 USD
INTANGIBLES	

Capacitación del Personal.	\$ 3 000 USD
Consultoría Legal.	\$ 500 USD
Flete Terrestre (Colombia – Venezuela) Vehículo F350.	\$ 2 000 USD
Nacionalización del material.	\$ 1 200 USD
Instalación de equipos.	\$ 10 868,3 USD
Total Intangibles	\$ 17 568,3 USD
CAPITAL DE TRABAJO	
Repuestos y Materiales	\$ 21 736,6 USD
Total Inversión Inicial	\$ 278 407,5 USD

Fuente: Cerezo, 2023.

Depreciación y amortización de activos.

La depreciación se realizó por el método de la línea recta, considerando el tiempo de vida útil estimado por el proveedor, donde para los equipos de SSI es de 20 años, para los sopladores es de 25 años y para los materiales de tubería se estima en 20 años. Los activos fijos intangibles fueron amortizados por el método de la línea recta de la misma manera, considerando 3 años de vida útil, con un valor residual de 0.

Cuadro 36. Depreciación y amortización de activos.

Activo Fijo	Costo (\$)	Vida Útil	Depreciación Anual	Depreciación Mensual
TANGIBLES				
Equipos MBBR (SSI).	\$ 167 400 USD	25	\$6 696 USD	\$ 558 USD
Sopladores y Accesorios (SAE).	\$ 49 966 USD	20	\$ 2 498,3 USD	\$ 208,19 USD
Materiales tubería de salida.	\$10 868,3 USD	20	\$543, 41 USD	\$ 45,28 USD
Total Tangibles	\$228 234,3 USD		\$ 9 737, 72 USD	\$ 811,48 USD
INTANGIBLES				
Capacitación del Personal.	\$ 1 000 USD	3	\$ 333,33 USD	\$ 27, 78 USD
Consultoría Legal.	\$ 100 USD	3	\$ 33,33 USD	\$ 2,78 USD
Flete Terrestre (Colombia – Venezuela) Vehículo F350.	\$ 2 000 USD	3	\$ 666,66 USD	\$ 55,55 USD
Nacionalización del material.	\$ 1 200 USD	3	\$ 400 USD	\$ 33,33 USD
Instalación de equipos.	\$ 10 868,3 USD	3	\$ 3622,77 USD	\$ 301, 90 USD
Total Intangibles	\$ 15 168,3 USD		\$ 5056, 1 USD	\$ 421, 34 USD

Fuente: Cerezo, 2023.

Costos Operacionales.

En relación con los costos operacionales, se debe tomar en cuenta que el proyecto consiste en la **mejora de una planta de tratamiento existente**, por lo que los costos relacionados a energía, monitoreo de los procesos, insumos químicos, mano de obra de operación, disposición de lodos y mano de obra para el mantenimiento están cubiertos por las condiciones actuales.

Beneficios.

Al tratarse de un proyecto ambiental no se perciben ingresos directos, sin embargo, se deben considerar los ahorros por las **sanciones evitadas** al ajustar el sistema biológico en caso de aumento de producción. Vale destacar, dependiendo de la gravedad de la infracción la persona jurídica será penalizada desde una multa en valor monetario, hasta el cierre parcial o total de la compañía. En el cuadro 37 se resumen los ahorros al evitar estas sanciones.

Cuadro 37. Ahorros al evitar sanciones legales.

Base Legal	Descripción	U.T	Costo		Valor U.T
			Bs.	\$	U.T
Ley Penal del Ambiente	Art. 39	2.000	18000	\$ 642,49	9
	Art. 41	1.000	9000	\$ 321,24	
	Art. 55	10.000	90000	\$ 3.212,43	
	Art. 79	3.000	27000	\$ 963,73	
	Art. 83	5.000	45000	\$ 1.606,21	
	Art. 84	2.000	18000	\$ 642,49	
	Art. 87	1.000	9000	\$ 321,24	
	Art. 103	10.000	90000	\$ 3.212,43	
	Art. 104	2.000	18000	\$ 642,49	
			Total	\$ 11.564,74	

Fuente: Cerezo, 2023.

En este mismo orden y dirección, figura dentro de los ahorros **la disminución de consumo de polímero**. En la actualidad, el costo incurrido promedio se encuentra en \$11 000 USD/mes, considerando que la utilización se reduce a la mitad, es posible estimar un ahorro de \$5 500 USD/mes y \$ 66 000 USD al año.

De acuerdo con los planteamientos realizados, la aplicación de la tecnología MBBR permitirá a Alimentos Polar Comercial – “Planta Salsas y Untables” utilizar la totalidad de su capacidad instalada. En este apartado, se consideró calcular el costo de oportunidad que representa la limitación del sistema biológico, tomando en cuenta la siguiente mezcla de productos.

Gerencia Corporativa de Aguas		BioLogix SyU 3.0		Alimentos Polar	
		APC Salsas y Untables			
		Gerencia Corporativa de Aguas			
✓ % Pérdidas	Producción	Mix	Índice Efluentes		
0,80%	9.540 Ton/m	53%	2,09 m3/ton		
	318 Ton/d				
0,45%	4.860 Ton/m	27%	Carga Afluente		
	162 Ton/d		9969 kgDQO/d		
0,75%	2.520 Ton/m	14%	2756 KgSST/d		
	84 Ton/d				
0,40%	378 Ton/m	2%			
	13 Ton/d				
0,70%	702 Ton/m	4%			
	23 Ton/d				
30.0 d/m	18000 Ton/m		<input type="button" value="RESET"/> <input type="button" value="PDF"/>		

Figura 1. Mix de productos proporcionado por la empresa para la evaluar el costo de oportunidad.

Fuente: Cerezo, 2023.

Para el cálculo del costo de oportunidad, se consideraron los precios actuales en el mercado para cada producto que forma parte de la mezcla. Seguidamente, se estimó el precio de venta de Alimentos Polar aplicando la Ley de Precio Justo, la cual establece que la ganancia no puede ser mayor al 30% por cada nivel de la cadena de distribución. En este propósito, se aproximó el costo de fabricación de cada producto, tomando un margen de ganancia máximo del 15% para Alimentos Polar (Ver cuadro 38).

Cuadro 38. Estimación de costo de producción por unidad de producto en Alimentos Polar.

	Unidad	Margarina	Mayonesa	Tomate	Queso	Vinagre
Contenido Neto	gr/u	500	175	397	200	1005,6
<i>Precio de Venta en Mercado</i>	Bs/u	83,5	60,9	56,04	104,01	78,46
<i>Precio de Venta de Alimentos Polar (-0,3)</i>	Bs/u	58,45	42,63	39,228	72,807	54,922
<i>Costo de producir Alimentos Polar (-0,15)</i>	Bs/u	49,68	36,24	33,34	61,89	46,68

Fuente: Cerezo, 2023.

Continuando, fue calculada la utilidad estimada que percibe Alimentos Polar por la venta de una unidad de producto, a través de la resta de su precio de venta y el costo de producir encontrado anteriormente. El valor obtenido fue convertido a su equivalencia en dólares, para luego, utilizando el contenido neto por unidad, calcular la utilidad en dólares por cada gramo de producto fabricado (Ver cuadro 39).

Cuadro 39. Utilidad estimada por cada gramo de producto fabricado.

	Unidad	Margarina	Mayonesa	Tomate	Queso	Vinagre
Contenido Neto	gr/u	500	175	397	200	1005,6
<i>Utilidad estimada Alimentos Polar</i>	Bs/u	8,7675	6,3945	5,8842	10,92105	8,2383
<i>Utilidad estimada Alimentos Polar (\$)</i>	\$/u	0,3	0,2	0,2	0,4	0,3
<i>Utilidad estimada por gramo de producto</i>	\$/gr	0,0006	0,0013	0,0005	0,0019	0,0003

Fuente: Cerezo, 2023.

Luego, al tomar en cuenta que 1 tonelada equivale a 1 000 000 gramos, se calculó cuantos gramos se estarían produciendo para la mezcla de productos con una producción de 18.000 TON/mes. Igualmente, se calculó por medio de proporción, cuantos gramos se están produciendo actualmente para 11.500 TON/mes. Entonces, se utilizó la utilidad estimada por gramo de producto para calcular el valor monetario percibido.

Cuadro 40. Utilidad estimada para una producción de 18.000 TON/mes.

	Margarina	Mayonesa	Tomate	Queso	Vinagre	Total
Ton/mes	9540	4860	2520	378	702	18000
\$/mes	\$ 5.970.970,37	\$ 6.338.632,65	\$ 1.333.178,28	\$ 736.744,62	\$ 205.276,97	\$ 14.584.802,88

Fuente: Cerezo, 2023.

Cuadro 41. Utilidad estimada para una producción de 11.500 TON/mes.

	Margarina	Mayonesa	Tomate	Queso	Vinagre	Total
Ton/mes	6095	3105	1610	241,5	448,5	11500
\$/mes	\$ 3.814.786,62	\$ 4.049.681,97	\$ 851.752,79	\$ 470.697,95	\$ 131.149,17	\$ 9.318.068,51

Fuente: Cerezo, 2023.

Finalmente, se calculó el costo de oportunidad como la diferencia entre el valor de la opción que se está evaluando y el valor de la opción operativa actual. Con ello, se consiguieron los siguientes resultados:

Cuadro 42. Costo de Oportunidad estimado.

	Margarina	Mayonesa	Tomate	Queso	Vinagre	Costo de Oportunidad
\$/mes	\$ 2.156.183,74	\$ 2.288.950,68	\$ 481.425,49	\$ 266.046,67	\$ 74.127,79	\$ 5.266.734,37

Fuente: Cerezo, 2023.

Rentabilidad.

- **Relación beneficio – costo.**

Para calcular la rentabilidad fue utilizado el indicador financiero razón beneficio - costo, se encarga de medir la relación entre los ahorros y los costos involucrados para determinar la factibilidad económica de un proyecto en beneficio de una empresa y la comunidad. En este sentido, se recopilan cada uno de los costos calculados para la implementación y los beneficios observados para un periodo de un (1) mes, como son, el ahorro en sanciones, la disminución en dosificación de polímero y el costo de oportunidad al limitar la producción.

$$Relación\ beneficio - costo = \frac{\sum Beneficios}{\sum Costos} = \frac{\$5.283.799,11\ USD}{\$279.640,32\ USD} = 18,89$$

Por lo tanto, al ser la relación beneficio – costo mayor a uno (1) se puede evidenciar la factibilidad económica de la propuesta, donde los beneficios que esta propone son considerablemente superiores al costo que representa su implementación. Por otro lado, si se decide sustraer el costo de oportunidad la relación costo-beneficio tiene la siguiente forma:

$$Relación\ beneficio - costo = \frac{\sum Beneficios}{\sum Costos} = \frac{\$17.064,74\ USD}{\$279.640,32\ USD} = 0,061$$

En este caso, al ser menor a uno (1) la propuesta no presenta beneficios mayores a su costo, sin embargo, se debe tomar en cuenta de que se trata de un proyecto ambiental, donde de aumentar la producción sin realizar los ajustes demandados en el sistema biológico, el impacto para la empresa llega a ser incuantificable debido a que las sanciones alcanzan hasta el cierre parcial o total de la compañía.

CONCLUSIONES

La presente investigación se realizó con el propósito de evaluar la tecnología MBBR como alternativa para la ampliación de la capacidad del sistema de tratamiento biológico en la empresa Alimentos Polar Comercial – “Planta Salsas y Untables”. Actualmente, la organización hace uso del 64% de su capacidad instalada, en respuesta a la poca habilidad del sistema de tratamiento existente para asimilar las cargas hidráulicas y másicas que se generarían al aumentar la producción. En este sentido, surge la necesidad de encontrar una opción de mejora que permita el aprovechamiento de los equipos disponibles, sin perjudicar a la conservación ambiental, a la sociedad y a la imagen de la empresa.

El estudio comienza con la **Fase I**, consistió en el diagnóstico de la situación actual en el sistema de tratamiento biológico, para la determinación de las condiciones operacionales del mismo. Primeramente, se destacó la cultura organizacional de Empresas Polar y su gran marco formal para implementar una gestión ambiental responsable, el compromiso ambiental está presente en cada paso de su gestión al involucrar la mejora continua y la toma de iniciativas en sus procesos. Luego, se realizó una caracterización de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales por medio de diagramas de flujo, diagramas esquemáticos, el análisis de su comportamiento según registros de parámetros críticos de calidad, listas de observación para la inspección de las actividades y entrevistas estructuradas a los operadores del área.

Seguidamente, se analizó la información recolectada en la **Fase II**, titulada análisis de oportunidades de mejora encontradas en el sistema de tratamiento biológico. En esta etapa, se organizaron las debilidades encontradas con ayuda de un diagrama Causa-Efecto, distribuyéndolas según medición, mano de obra, métodos, material, maquinaria y medio ambiente. Con la revisión de la información, se concluyó que el personal cuenta con una amplia experiencia respecto a la operación de la planta y está consciente de su responsabilidad con la empresa y el medio ambiente. No obstante, fueron identificadas debilidades en relación con los estándares de proceso, la cantidad de inspecciones requeridas para el control del tratamiento, la poca flexibilidad de la distribución de equipos y la sensibilidad de los componentes actuales del sistema biológico ante un cambio de volumen de entrada promedio. En general, la mayoría de las causas de la limitación en el sistema apuntan a la poca capacidad de los equipos presentes.

Continuando con esta segunda fase, se estudiaron tres alternativas para aumentar la capacidad del sistema biológico, estas fueron, instalar una unidad de flotación por aire disuelto con otras dimensiones, implementar un tratamiento biológico por membrana (MBR) o implementar un tratamiento biológico por lecho móvil (MBBR). Para la selección, fue utilizada una matriz multicriterio, donde se estableció como importante para la priorización la eficiencia, la inversión, la operatividad, la mantenibilidad y la viabilidad de instalación. Con la valoración de las opciones, se establece la tecnología MBBR como la más adecuada para su evaluación.

Una vez que se definió la opción a estudiar, se procedió a la revisión exhaustiva de bibliografía relacionada con los requerimientos técnicos para su implementación. Todo ello, con el objetivo de comprender las modificaciones que tendrían que ser ejecutadas para realizar la adaptación desde el sistema convencional actual hasta el sistema MBBR. Entre las modificaciones requeridas, se tiene el cambio de difusores de burbuja fina a difusores de burbuja gruesa, en miras de garantizar la movilidad de los soportes plásticos dentro del tanque de aireación.

En la **Fase III**, se procedió al diseño de un reactor biológico piloto a escala que simule las condiciones reales de los efluentes de la planta de tratamiento de aguas ante un aumento de producción aproximado del 36%, adaptado a los requerimientos estudiados para la aplicación de la tecnología MBBR. En este propósito, se definieron criterios que sirvieron como guía para el diseño basados en la herramienta de proyección del comportamiento del sistema actual denominada Biologyx, la cual fue desarrollada por la Gerencia de Aguas y Servicios Industriales perteneciente a la empresa caso estudio. Esta etapa finaliza con la realización del Programa de Inspección de Variables Operativas (PIVO) para el seguimiento de los resultados que arroje la prueba una vez se agreguen los biosoportes.

Posterior a 165 días de ensayos y registro constante de las condiciones diarias dadas en el reactor piloto, se evaluó la propuesta a través del desempeño de la tecnología MBBR en la **Fase IV**, con el estudio e indagación de los datos recolectados. Los períodos de prueba fueron divididos en dos etapas según el método de alimentación implementado, debido a que la transición de uno al otro redireccionó a la evaluación por completo. Iniciando con alimentación por batch y un porcentaje de relleno del 20%, no se observó desarrolló de la biopelícula en los medios de soportes plásticos, en su lugar, se encontró que los microorganismos se reproducían en el medio líquido, reflejado en la concentración de SST.

El poco crecimiento experimentado en la alimentación por cargas se relacionó al bajo contacto que mantenían los microorganismos con los medios plásticos debido a un porcentaje de relleno inferior al 25%, así como a la suspensión de la aireación mientras se dejaba sedimentar los sólidos para descargar el efluente clarificado.

Cuando se empezó a alimentar al reactor en modo continuo con un porcentaje de relleno del 26%, el aspecto de los biosoportres cambió con rapidez demostrando adherencia de la biopelícula. En esta etapa, se comprobó que los microorganismos adheridos eran los encargados de realizar la degradación de la carga orgánica, al encontrarse los SST dentro del reactor en concentraciones mínimas en comparación a un sistema convencional por lodos activados. Específicamente, el análisis estadístico de los parámetros críticos de calidad entregó que la concentración SST estuvo en un rango entre 61 a 278 mg/L, la DQO de salida tuvo un promedio de 195 mg/L y la eficiencia en remoción de carga orgánica dada por el sistema fue de 77,36%. Así mismo, por medio del análisis microbiológico, se comprobó la existencia de una comunidad microbiológica que convivía en la estructura de los soportes plásticos.

Luego, se modeló matemáticamente el desempeño del reactor piloto en función de los resultados obtenidos en el plan de inspección y ensayo. En esta fase, se destacó la importancia de la relación de los parámetros SARR/SALR como rendimiento del sistema MBBR. En este propósito, fue utilizada la regresión lineal para representar gráficamente y por medio de una ecuación la respuesta de la variable SARR ante los diferentes valores conseguidos experimentalmente para la variable de entrada SALR. Con ello, se consiguió que la relación entre ambas es lineal con una correlación positiva, donde un aumento de la carga orgánica de entrada implica un aumento proporcional en la remoción del sistema, lo anterior refleja la habilidad adaptativa de la tecnología ante distintas condiciones.

Continuando, se presentó el estudio para el valor óptimo del parámetro de diseño principal de la tecnología MBBR, es decir, SALR, mediante la programación no lineal. Para lograrlo, se establecieron los elementos de un problema de investigación de operaciones, estos son, función objetivo, restricciones y variables de decisión. El resultado obtenido por la solución mediante Solver implica que el valor óptimo para el SALR es de $9,08 \text{ gDBO}/\text{m}^2 \text{ d}$.

Para concluir, se analizó la relación entre el crecimiento de la biopelícula adherida a los medios de soporte y el tiempo, permitiendo conocer que el peso máximo que estos podrán alcanzar se encuentra en 3,69 gramos, así como que se obtendrán eficiencias superiores al 70% al conseguir

una media en peso de 1,63 gramos. Igualmente, se conoció que su comportamiento tendrá características de una curva sinusoidal, al auto regularse el grosor de la biopelícula para mantener el balance del sistema.

Finalmente, en la **Fase V** fue determinada la factibilidad operativa, técnica, ambiental, social y económica de la propuesta. Para ello, se analizó la responsabilidad detrás de aumentar la producción, donde esta implica la obligatoriedad del ajuste en la planta de tratamiento de aguas residuales, fueron propuestas estrategias que permitieran la asimilación del cambio con fluidez, donde resaltó la capacitación del personal que labora en el área estudiada y un plan para el mantenimiento de los equipos que afectan directamente el rendimiento del reactor biológico.

En general, de los resultados del reactor piloto MBBR se obtiene:

- El medio de soporte plástico seleccionado EEVE675 garantiza adherencia y eficiencia suficiente para ser implementado en el sistema biológico de la planta de tratamiento de aguas de Alimentos Polar Comercial – “Planta Salsas y Untables”.
- La tecnología MBBR es capaz de reducir la DBO característica de los efluentes industriales de la empresa estudiada.
- Todos los requerimientos de diseño para instaurar la tecnología MBBR fueron comprobados experimentalmente.
- De someterse a condiciones reales de la planta, incluyendo paradas largas y descargas imprevistas (higienes o químicos), se recuperan condiciones óptimas en 2 semanas.
- Los sólidos en suspensión en el reactor biológico operando como MBBR tendrían una reducción estimada del 70% respecto a la condición actual, permitiendo manejar mayor carga hidráulica en la etapa de clarificación (DAF II). En consideración de ello, se reduciría el consumo de polímero para la separación (Ver anexo G).
- Alimentos Polar Comercial – “Planta Salsas y Untables” contaría con la capacidad requerida en la planta de tratamiento de aguas residuales para producir todas sus categorías a capacidad instalada.

RECOMENDACIONES

- Como se observó en las últimas semanas de evaluación de la tecnología en alimentación continua, se experimentó un aumento del grosor de la biopelícula. La biopelícula tiene la capacidad de atrapar los sólidos que provienen de la etapa anterior al sistema biológico, estas son aceites y grasas emulsionadas capaces de obstruir los medios de soporte y afectar directamente su eficiencia. En este sentido, se debe robustecer la operación del tratamiento primario, para evitar la entrada eventual de estos compuestos perjudiciales al sistema biológico.
- Dentro de la descripción del proceso, se hizo mención del espesador de lodos encargado de almacenar los lodos químicos y biológicos en su espera para la disposición final. Atendiendo a que los sólidos producidos en un reactor MBBR suelen ser más livianos y dispersos, su almacenamiento se debe destinar en otro tanque de lodos biológicos para servir de buffer al sistema de deshidratación.
- Para implementar la tecnología MBBR se resalta la importancia de cumplir con los análisis establecidos en el programa de inspección y ensayo de variables operativas (PIVO) en la planta de tratamiento de aguas residuales, para el seguimiento oportuno del desarrollo de la tecnología.

REFERENCIAS

- Agencia de protección Ambiental de Estados Unidos. (2022). **Términos**.
<https://espanol.epa.gov/espanol/terminos>
- Aguas y Aguas de Pereira (2013). **Sección 11: Sistemas de Control de Olores**. [Archivo PDF].
<https://www.aguasyaguas.com.co/images/ptar/Cap%202%3A%20Descripcion%20del%20Proyecto/Anexos/3.MEMORIAS%20DE%20CALCULO/Seccion%2011.%20Control%20de%20Olores.pdf>
- Arias, F. (2012). **El Proyecto de Investigación**. (6ta ed.). Editorial Episteme.
- Arnold, M. y Osorio, F. (1998). **Introducción a los conceptos básicos de la teoría general de sistemas**. Cinta de Moebio. <https://www.moebio.uchile.cl/03/frprinci.html>
- 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: Process Design Calculations**. [Archivo PDF].
- Benjamin, N., Freivalds, A. (2009). **Ingeniería Industrial: Métodos, estándares y diseño del trabajo**. McGraw-Hill Interamericana.
- Burgasí, D., Cobo, D., Pérez, K., Pilacuan, R., Rocha, M. (2021). **El Diagrama de Ishikawa como herramienta de calidad en la educación: una revisión de los últimos 7 años**. [Archivo PDF].
- Cardenas, F. (2023). **El modelo ADKAR y la gestión del cambio**. HubSpot.
<https://blog.hubspot.es/sales/que-es-modelo-adkar>
- Castellanos, M. (2021). **Planta de Tratamiento para el Manejo Adecuado de los Desechos Sólidos generados en la empresa Granja El Cedro JGC, C.A.** [Trabajo especial de grado]. Universidad José Antonio Páez.
- Constitución de la República Bolivariana de Venezuela**. 24 de marzo de 2000. (Venezuela)
- COVENIN (1981). **Designación del diámetro nominal y diámetro exterior en tuberías, conexiones y accesorios para tuberías en sistema inglés y métrico**.

- Crites, R., & Tchobanoglous, G. (2000). **Sistema de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados Tomo 1**. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana, S.A.
- Educación Ambiental en la República Dominicana. (S.f). **Eutrofización**. <https://jmarcano.com/temas-diversos/glosarios/>
- Fernández-Ríos, M. y Sánchez, J., (1997) **Eficacia Organizacional**. Madrid
- Figueredo, O., González, Y., Martínez, E., Moreno, J., Jiménez, E., Weffer E. (2020). **Manual para la elaboración y presentación de los anteproyectos, proyectos de trabajos de grado, trabajos de grado, tesis doctoral e informe de pasantía y extramuros de la Universidad José Antonio Páez**. Universidad José Antonio Páez.
- Fuentes, L. y Fiorella, I. (2019). **Evaluación de la Influencia de la Proporción de Llenado en un Biorreactor de Lecho Móvil con Biopelícula (MBBR) utilizando saccharomyces cerevisiae para la biodepuración de colorante en efluentes textiles**. [Trabajo especial de grado]. Universidad Católica Santa María.
- Gavin, H. (2022). **The Levenberg-Marquardt algorithm for nonlinear least squares curve-fitting problems**. [Archivo PDF].
- Goldratt, E. (1993). COX, Jeff. **The Goal**. North River Press.
- González, R. y Ojeda, R. (2019). **Estrategias del Uso del Lodo Residual como Materia Prima en Smurfit Kappa Cartón de Venezuela S.A.** [Trabajo especial de grado]. Universidad José Antonio Páez.
- Grajales, A., Serrano, E., Hahn Von-H., C. (2013). **Los métodos y procesos multicriterio para la evaluación**. Revista Luna Azul, (36), 285-306.
- Grau, M y Soler, J. (1997). **Simulación de reactores biológicos en el tratamiento de aguas residuales**. [Archivo PDF].
- Gutiérrez, P., De la Vara. (2009). **Control estadístico de Calidad y Seis Sigma**. McGraw-Hill Interamericana.
- Henze M., van Loosdrecht M.C.M., Ekama G.A., (2008). **Biological Wastewater Treatment: Principles, Modeling, and Design**. Intl Water Assn Publishing.
- Hernández, E. (2015). **Metazoarios**. <https://es.slideshare.net/EdgarHernandez71/metazoarios>

- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2006). **Metodología de la Investigación**. (4ta ed.). Editorial McGraw-Hill Interamericana.
- Hillier, F y Lieberman, G. (2010). **Introducción a la Investigación de Operaciones**. (9na ed.). Mcgraw-Hill.
- Holly tech, 2021. (2021). **China Gold Supplier for Bio Filter Media**. <https://www.hollyep.com/china-gold-supplier-for-bio-filter-media-strong-k1-k3-k5-moving-bed-biofilm-reactor-mbbr-media-holly-2-product/>
- Hurtado, Jacqueline. (2008). **El proyecto de investigación. Comprensión holística de la metodología y de la investigación**. Caracas: Quirón/ Sypal.
- IICA. (2000). **Manual de evaluación de impacto ambiental de actividades rurales**. Uruguay: Ministerio de ganadería, agricultura y pesca.
- Ley Orgánica de Precios Justos**. 8 de noviembre de 2015. (Venezuela).
- Ley Orgánica del Ambiente**. Art. 19 y Art. 122. 22 de diciembre de 2006. (Venezuela).
- Ley Penal del Ambiente**. 02 de mayo de 2012. (Venezuela)
- Ley sobre Sustancias, Materiales y Desechos Peligrosos**. 13 de noviembre de 2001. (Venezuela)
- Loaiza, J., Vargas, J., Foucault, E. (1990). **Teoría y práctica: Algoritmos diagramas de flujo y diagramas estructurados**. Vadell Hermanos.
- Martínez, Y. (2014). **La Responsabilidad Social Empresarial (RSE)**. <https://www.eoi.es/blogs/mintecon/2014/04/07/la-responsabilidad-social-empresarial-rse/>
- Mcquarrie, J., Roltz, J. (2011). **Moving Bed Biofilm Reactor Technology: Process Applications, Design and Performance**.
- Mejía, C. (2013). **El concepto de capacidad instalada**. https://planning.com.co/bd/valor_agregado/Julio2013.pdf
- 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.
- Minitab, LLC (2021). **Prueba de hipótesis**, Getting Started with Minitab. www.minitab.com.

- Mooers Products (2014). **Diferencias entre difusores de burbuja.** <https://www.mooersproductsinc.com/bubble-diffuser-aeration-differences/>
- Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de las Aguas de la Cuenca del Lago de Valencia.** 1 de febrero de 1999. (Venezuela).
- Observatorio de ecología política de Venezuela. (2022). **La crisis del agua en Venezuela: algunos datos.** <https://ecopoliticavenezuela.org/2022/05/26/la-crisis-del-agua-en-venezuela-algunos-datos/>
- Oficina de Información científica y tecnológica para el congreso de la unión. (2019). **Tratamiento de aguas residuales.** https://www.foroconsultivo.org.mx/INCYTU/documentos/Completa/INCYTU_19-028.pdf
- Organización Mundial de la Salud. (2022). *Agua para consumo humano.* <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Ortega, S. y Hernández, E. (2018). **Biopelículas microbianas y su impacto en áreas médicas: fisiopatología, diagnóstico y tratamiento.** https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1665-11462018000200079&script=sci_arttext#:~:text=Las%20biopel%C3%ADculas%20son%20comunidades%20de,las%20mol%C3%A9culas%20con%20actividad%20antimicrobiana.
- Palella, S. y Martins, F. (2012). **Metodología de la Investigación Cuantitativa.** (Quinta edición). Caracas: Fondo Editorial de la Universidad Pedagógica Libertador (FEDUPEL).
- Pérez, F. (2021) **Abastecimiento de aguas. Tema 5: Decantación y flotación.** [Archivo PDF]. https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/12609/mod_resource/content/1/Tema%2005%20DECANTACION%20Y%20FLOTACION.pdf
- Picazo, J. (1995). **Aguas residuales en la industria agroalimentaria: caracterización y sistemas de tratamiento y depuración.** [Archivo PDF].
- Radjenovic, J., Matosic, M., Mijatovic, I., Petrovic, M., Barceló D. (2008) **Membrane Bioreactor (MBR) as an Advanced Wastewater Treatment Technology.**
- Real Academia Española. **Diccionario de la lengua española, 23.^a ed.,** [versión 23.6 en línea]. <https://dle.rae.es> [mayo 2023].

- Revilla, M. (2017). **Análisis y modelado de un proceso BAS (Biofilm Activated Sludge) para el tratamiento biológico de aguas residuales de alta carga orgánica con limitación de nutrientes.** [Tesis Doctoral]. Universidad de Cantabria.
- Rodríguez, N. (2023). **Cómo realizar un análisis de costo-beneficio.** HubSpot. <https://blog.hubspot.es/sales/analisis-cost-beneficio>
- Sabino, C. (2014). **El Proceso de Investigación.** Editorial Episteme.
- Salvador, P. (2008). **Técnicas Computacionales,** 20-28. [Archivo PDF].
- 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.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México. (2019). **Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento - Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: lodos activados.** [Archivo PDF].
- Sierra, C. (2004). **Estrategias para la Elaboración de un Proyecto de Investigación.** Maracay, Venezuela: Insertos Médicos de Venezuela.
- Torres, D. (2023). **Qué es el coste de oportunidad y cómo se calcula.** HubSpot. [https://blog.hubspot.es/sales/que-es-coste-oportunidad#:~:text=4.-.Calcula%20el%20coste%20de%20oportunidad,%E2%80%93%20\(Valor%20de%20opc%C3%B3n%20elegida\)](https://blog.hubspot.es/sales/que-es-coste-oportunidad#:~:text=4.-.Calcula%20el%20coste%20de%20oportunidad,%E2%80%93%20(Valor%20de%20opc%C3%B3n%20elegida))
- Valdivielso, A. (2016). **¿Qué es un sistema de lodos activados?** <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-sistema-lodos-activados>
- Van Haandel A., Van der Lubbe J., (2012). **Handbook of Biological Wastewater Treatment.** IWA Publications.
- Zalakain G. y Manterola G., (2011). **Tratamiento biológico de la EDAR de Sniace mediante el proceso BAS.** Tecnología del agua, 335, 52-58.
- Zalakain, G. (2009). **Procesos avanzados de biomasa fija sobre lecho móvil.** IMU Ingeniería Municipal, 52-53.

ANEXOS

ANEXO A. *Validación de instrumento de recolección de datos.*



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESTIMADO PROFESOR (A): ING. ANA AVENDAÑO

Seguidamente se le presenta un guión de entrevista que va dirigido a un panel de expertos de diferentes áreas de trabajo en la **Empresa Alimentos Polar Comercial C.A.**, ubicada en **Valencia, estado Carabobo**, para un total de tres (03) personas; las respuestas que se obtendrán de la aplicación de este instrumento de recolección de datos va a permitir dar respuesta al objetivo específico número uno (01) de la investigación, que se denomina: **Diagnosticar la situación actual en el sistema de tratamiento biológico, con el fin de determinar las condiciones operacionales del mismo**, de tal manera que permita obtener información de una fuente confiable. Por lo que se solicita a usted de sus buenos oficios para la validación de este instrumento dada su formación académica y experiencia en el ramo industria y académico.

A tal efecto se anexa el cuadro técnico metodológico, el guión de entrevista y el formato de validación.

AUTOR (A):

Cerezo, Isis.

C.I.: 29.727.396

TUTOR (A):

Mujica, Viky.

C.I.: 12.033.474



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

INSTRUCCIONES PARA LA GUIA DE ENTREVISTA

- Registre la función dentro de la empresa del entrevistado.
- Describa de forma general el proyecto, así como el propósito de la entrevista.
- Comparta el motivo por el cual fueron seleccionados los participantes elegidos.
- De información sobre la confiabilidad de la entrevista y el tiempo de duración de esta.
- Finalmente, pida permiso para grabar o tomar notas, resaltando que esto es sólo con fines de posterior análisis.

Nº	Guión de entrevista
1	Según su criterio, ¿qué etapa del tratamiento del agua residual industrial requiere su mayor atención y control? ¿Por qué?
2	¿Cuáles son los efectos potenciales de verter aguas residuales que no cumplen con los estándares de calidad en cuerpos hídricos?
3	¿Usted ha recibido formación previa entorno al funcionamiento del tratamiento biológico de las aguas residuales? Indicar qué temas abordaron en la capacitación si es el caso.
4	¿Cómo describiría el rendimiento del sistema biológico de la planta de tratamiento de aguas residuales? Es decir, reactor biológico y el equipo de flotación por aire disuelto.
5	¿Cuál es la capacidad de tratamiento real con la que funciona diariamente el sistema de tratamiento biológico? En términos de concentración de carga orgánica y volumen de agua tratado.
6	¿Con qué frecuencia es realizado mantenimiento a los equipos que forman parte del sistema de tratamiento biológico?
7	¿Qué parámetros químicos y/o biológicos son críticos para asegurar la calidad del agua efluente del reactor biológico?
8	¿Cuáles son las normativas aplicadas para regular los parámetros críticos de calidad en el efluente de salida del reactor biológico?
9	Actualmente, ¿existen desviaciones importantes en dichos parámetros? Indicar porcentajes o valores significativos si es el caso.
10	¿Cuentan con estrategias de control en caso de una descompensación temporal en el sistema de tratamiento biológico?



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO (GUIÓN DE LA ENTREVISTA)

Coloque con una (X), en la alternativa que corresponda según opinión sobre los aspectos planteados, anote las observaciones que considere necesario en el recuadro destinado para ello.

Ítems	Redacción de Ítems			Pertinencia de los objetivos		Observaciones
	Clara	Confusa	Tendenciosa	Pertinente	No pertinente	
1	✓			✓		
2	✓			✓		
3	✓			✓		
4	✓			✓		
5	✓			✓		
6	✓			✓		
7	✓			✓		
8	✓			✓		
9	✓			✓		
10	✓			✓		

Fecha: 17/03/2023


Firma del Especialista:

Breve descripción del perfil académico del Especialista:

Ingeniero Especialista Industrial



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO (GUIÓN DE LA ENTREVISTA)

Coloque con una (X), en la alternativa que corresponda según opinión sobre los aspectos planteados, anote las observaciones que considere necesario en el recuadro destinado para ello.

Ítems	Redacción de Ítems			Pertinencia de los objetivos		Observaciones
	Clara	Confusa	Tendenciosa	Pertinente	No pertinente	
1	✓			✓		
2	✓			✓		
3	✓			✓		
4	✓			✓		
5	✓			✓		
6	✓			✓		
7	✓			✓		
8	✓			✓		
9	✓			✓		
10	✓			✓		

Fecha: 17/03/2023


Firma del Especialista:

Breve descripción del perfil académico del Especialista:	Ingeniero Industrial
--	----------------------



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
 UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO (GUIÓN DE LA ENTREVISTA)

Coloque con una (X), en la alternativa que corresponda según opinión sobre los aspectos planteados, anote las observaciones que considere necesario en el recuadro destinado para ello.

Ítems	Redacción de Ítems			Pertinencia de los objetivos		Observaciones
	Clara	Confusa	Tendenciosa	Pertinente	No pertinente	
1	X			X		
2	X			X		
3	X			X		
4	X			X		
5	X			X		
6	X			X		
7	X			X		
8	X			X		Cuales son las alternativas
9	X			X		
10	X			X		

Fecha: 17/03/2023

[Firma manuscrita]
 Firma del Especialista:

Breve descripción del perfil académico del Especialista:	Ingeniero Industrial, Maestría en Finanzas, Maestría en Seguridad Industrial, Consultor en el área de Costos. Profesor Universitario UC - UJAP
--	--

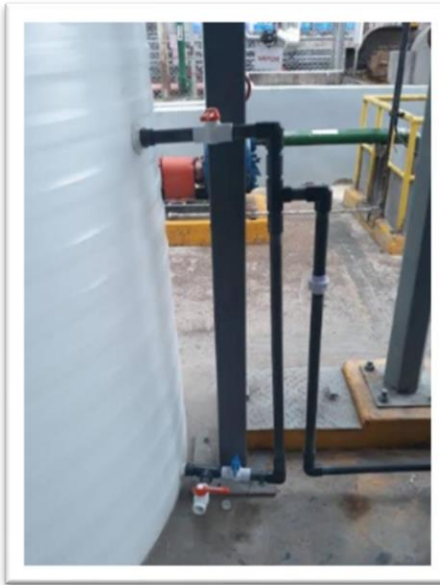
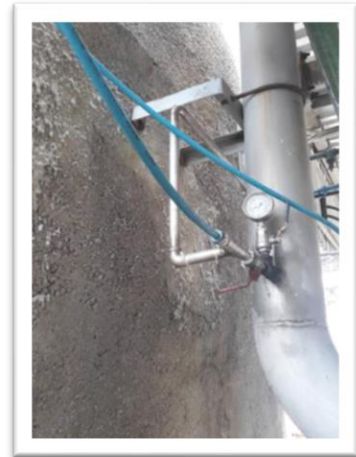
ANEXO B. *Cuadro de Operacionalización de Variables.*

OBJETIVO ESPECÍFICO	VARIABLE	DIMENSIÓN	INDICADORES	ÍTEMS	FUENTE DE INFORMACIÓN
Diagnosticar la situación actual en el sistema de tratamiento biológico, con el fin de determinar las condiciones operacionales del mismo.	Aspectos operativos involucrados en el sistema de tratamiento biológico de Alimentos Polar Comercial – “Planta Salsas y Untables”.	Proceso.	Parámetros críticos de calidad.	7, 9	
			Comportamiento del sistema biológico.	4-6	
			Monitorización y control.	1, 10	
		Cognitiva.	Impacto ambiental.	2	
			Tratamiento biológico de aguas residuales.	3	
			Normativas relacionadas a vertimiento de aguas residuales tratadas.	8	

ANEXO C. Memoria de fórmulas para cálculos.

PARÁMETRO	FÓRMULA
Carga DBO (g/d).	$Carga\ de\ DBO = Caudal\ diario * Concentración\ de\ DBO$
Área superficial de carriers requerida (m^2)	$Área\ superficial\ de\ carriers\ requerida = \frac{Carga\ de\ DBO}{SALR}$
Volumen de soportes requerido (m^3)	$Volumen\ de\ tanque\ requerido = \frac{Volumen\ de\ soportes\ requerido}{\% Relleno\ de\ soportes}$
Volumen del tanque requerido (m^3)	$Volumen\ de\ tanque\ requerido = \frac{Volumen\ de\ soportes\ requerido}{\% Relleno\ de\ soportes}$
Volumen del líquido en el tanque (m^3)	$Volumen\ del\ líquido\ en\ el\ tanque$ $= Volumen\ de\ tanque\ requerido$ $- (Volumen\ de\ soportes\ requerido (1 - \% Sin\ carrier))$
Tiempo de retención promedio (HRT) (minutos)	$HRT = \frac{Volumen\ de\ líquido\ en\ el\ tanque}{Caudal\ diario\ tratado}$
Tiempo de retención en hora pico (HRTp) (minutos)	$HRTp = \frac{HRT}{Factor\ de\ hora\ pico}$
Oxígeno requerido ($lb\ O_2/d$)	$Oxígeno\ Requerido = \frac{lb\ O_2}{lb\ DBO} * \frac{lb\ DBO}{día}$
SOTE (%)	$SOTE = SOTE\ en\ función\ de\ la\ profundidad * Profundidad\ del\ difusor$
AOTE (%)	$AOTE\% = Relación\ AOTE:SOTE\ teórica * SOTE\%$
Requerimiento de Aire (SCFM)	$Requerimiento\ de\ aire = \frac{Oxígeno\ requerido/AOTE}{O_2\ Contenido\ en\ Aire}$
FLUX ($Sm^3/h * m^2$)	$Flux = \frac{Requerimiento\ de\ aire\ en\ condiciones\ normales}{Área\ del\ tanque}$
Caudal (l/s)	$Caudal = Área\ de\ la\ sección * Velocidad\ del\ flujo$
Área de un círculo (m^2)	$Área = \frac{\pi (Diámetro)^2}{4}$
Volumen de un Cilindro (m^3)	$Volumen\ de\ un\ cilindro = \pi * (Radio)^2 * Altura$

ANEXO D. *Instalación del reactor piloto con tecnología MBBR.*



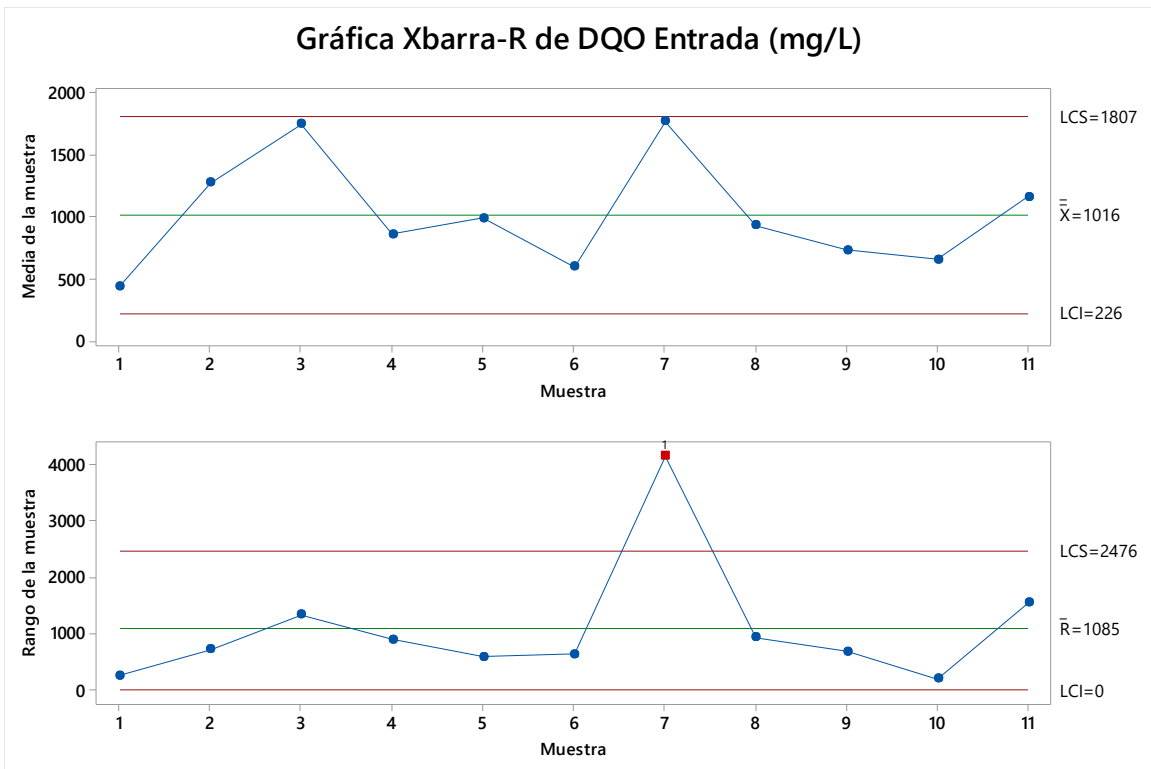
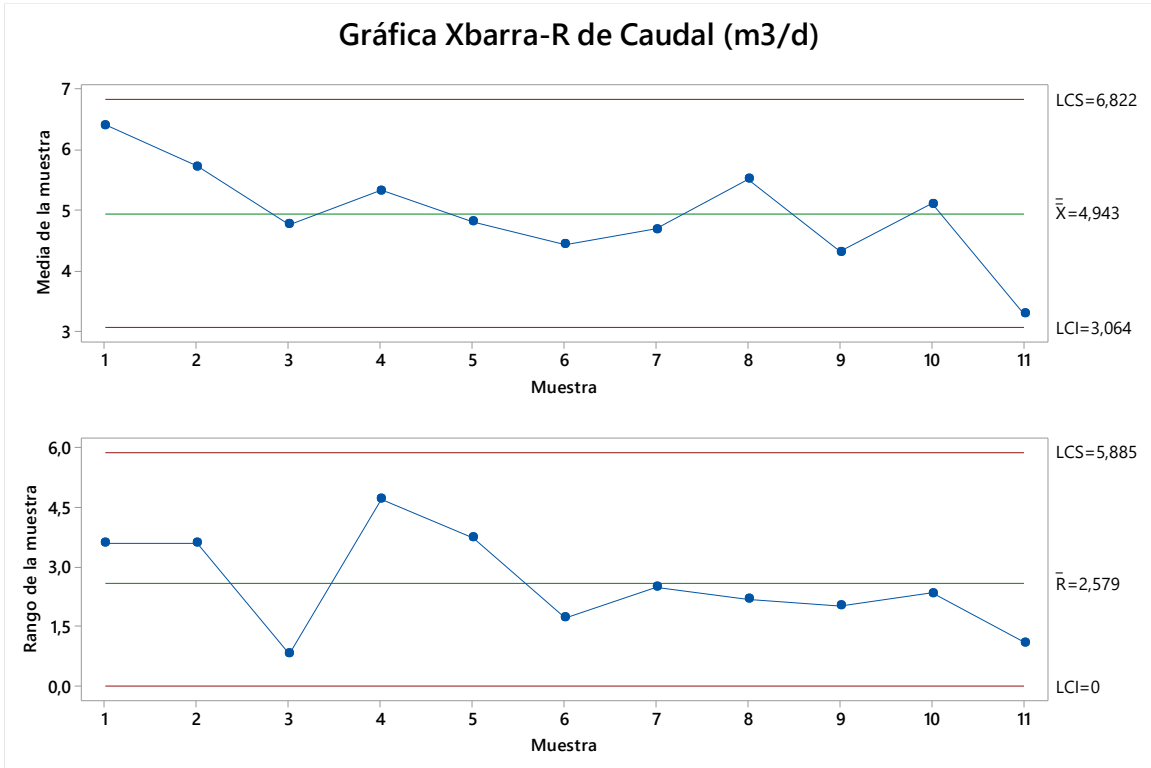
ANEXO E. Materiales requeridos para la construcción del reactor piloto MBBR.

1.- MATERIALES			
Código	Descripción	Unidad	Cantidad
TANQPLAS	TANQUE PLÁSTICO 5.000 LTS 184 M DE DIAM X 204 M DE ALT	PZA	1,00000
TBNOX010	TUBO DE ACERO INOXIDABLE SCH40 1-1/2" X 6 M	M	6,00000
PLORAC7	VALVULA DE CIERRE RÁPIDO 1 1/2" DE ACERO INOX (PARA AIR	PZA	1,00000
PLO497	VÁLVULA REGULADORA DE PRESIÓN 1 1/2" (PARA AIRE) 100A1	PZA	1,00000
PLORAC5	VALVULA DE PASO RAPIDO BOLA D= 1" PVC PEGA	PZA	1,00000
PLOF25	TUBO PVC D= 1" PRESION AGUA FRIA	M	15,00000
MEDFLJ3	MEDIDOR/CONTADOR VOLUMETRICO FLUJO 1/2" a 1"	PZA	1,00000
FILTMAL	MALLA MESH CONEXION 2" ORIFICIOS MENOR A 10 MM	PZA	1,00000
TBNOX002	TUBO DE ACERO INOXIDABLE SCH40 1/2" X 6 M	M	6,00000
NIPINO12	NIPLE DE ACERO INOXIDABLE 1/2" X 4"	PZA	4,00000
CINOX000	CODO DE ACERO INOXIDABLE 1/2" X 90° P/R	PZA	8,00000
ANGAC119	ANGULO ACERO INOXIDABLE 1" X 3/16" X 6, M	M	6,00000
PLOB114	VALVULA DE PASO RAPIDO BOLA D= 1/2" NPT ACERO INOXIDA	PZA	2,00000
PLO428	CODO PVC 90 GRADOS A B. D=1" (SOLDADURA CON PEGA)	PZA	10,00000
PLOC74	PEGAMENTO PARA PVC ENVASE 1/8 GL P/AGUA TUBRICA	ENV	1,00000
MAN016	MANOMETRO (0-160) PSI/DIAL 2" CON GLICERINA A/INOXID	PZA	1,00000
RMBBRBF	RELLENO MBBR BIOFILM CARRIERS EEEVE675	M ³	1,00000
ACA146	DISCO DE CORTE INOX 4 1/2" ULTRA FINO	PZA	2,00000
HER064	BOMBONAS DE GAS ARGON DE 6 M3	CIL	1,00000
VAPI1-16	VARILLA DE APORTE 308 INOX 1/16 X 1 MT	PZA	10,00000
ACE680	MECHA DE 1/4" ACERO RAPIDO	PZA	2,00000

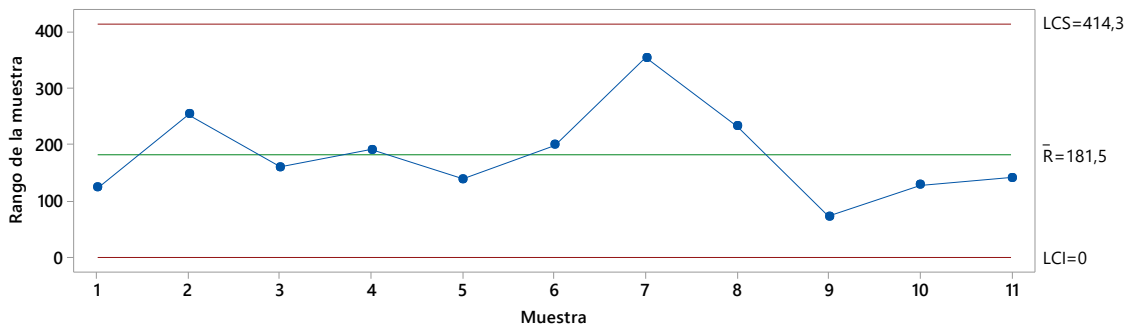
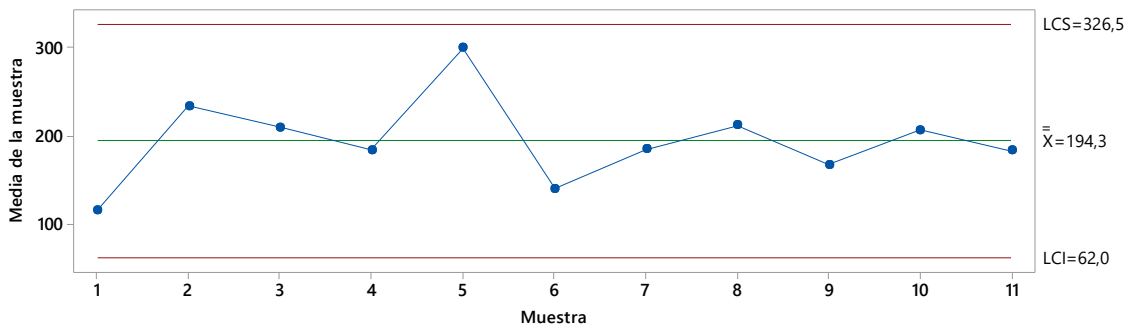
2.- EQUIPOS		
Código	Descripción	Cantidad
VEH012	CAMION CON PLATAFORMA JAC CAP 7 TON	0,50000
KITMECAN	KIT DE HERRAMIENTAS PARA MECANICOS	1,00000
ALB097	TALADRO 1/2" BOSCH 1800 RPM 450 W	1,00000
ELE040	EXTENSION ELECTRICA HASTA 50 MTS	2,00000
HER140	ESMERIL PORTATIL / MANUAL 4 1/2"	1,00000
MAQSOLD	MAQUINA DE SOLDAR PORTATIL 110/220V 200 AMP	1,00000
KITARGON	KIT SOLDADURA ARGON (ANTOR, PRENSA TUNGST, REGULAD	1,00000

3.- MANO DE OBRA DIRECTA		
Código	Descripción	Cantidad
SOLD02	SOLDADOR DE PRIMERA ACERO INOX	1,00000
AYUDANT1	AYUDANTE DE PRIMERA	2,00000
FAB01	FABRICADOR DE PRIMERA	1,00000
ESP006	SUPERVISOR DE OBRA	1,00000
TECSSA	INSPECTOR DE SEGURIDAD HIGIENE Y AMBIENTE	1,00000

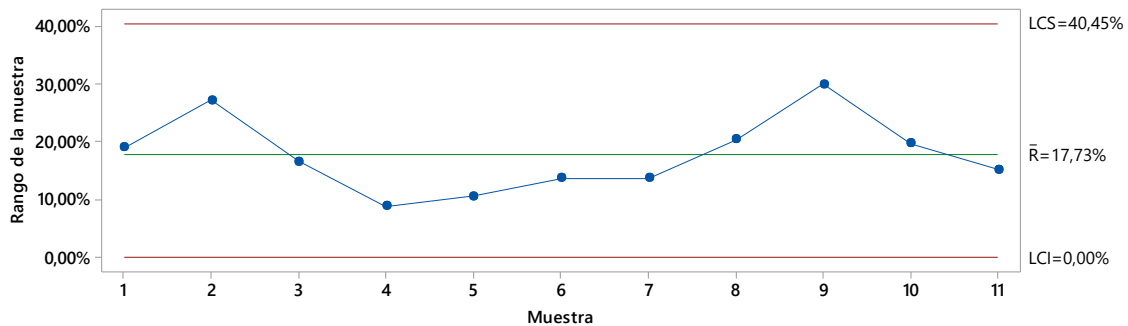
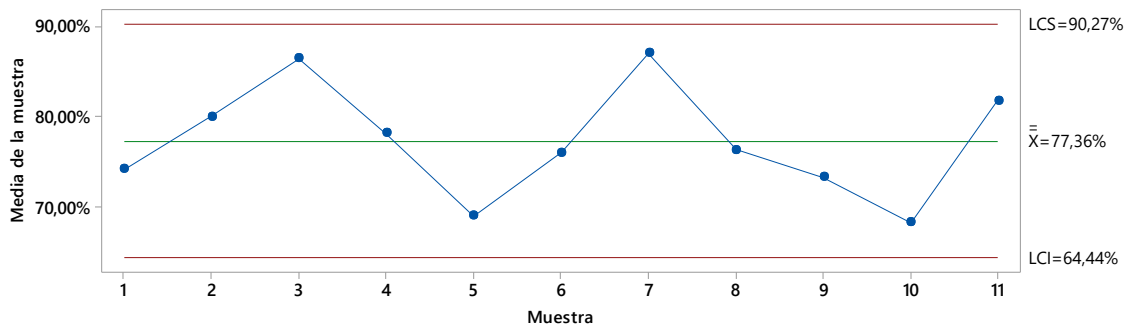
ANEXO F. Gráficos de control para variables críticas de calidad medidas.



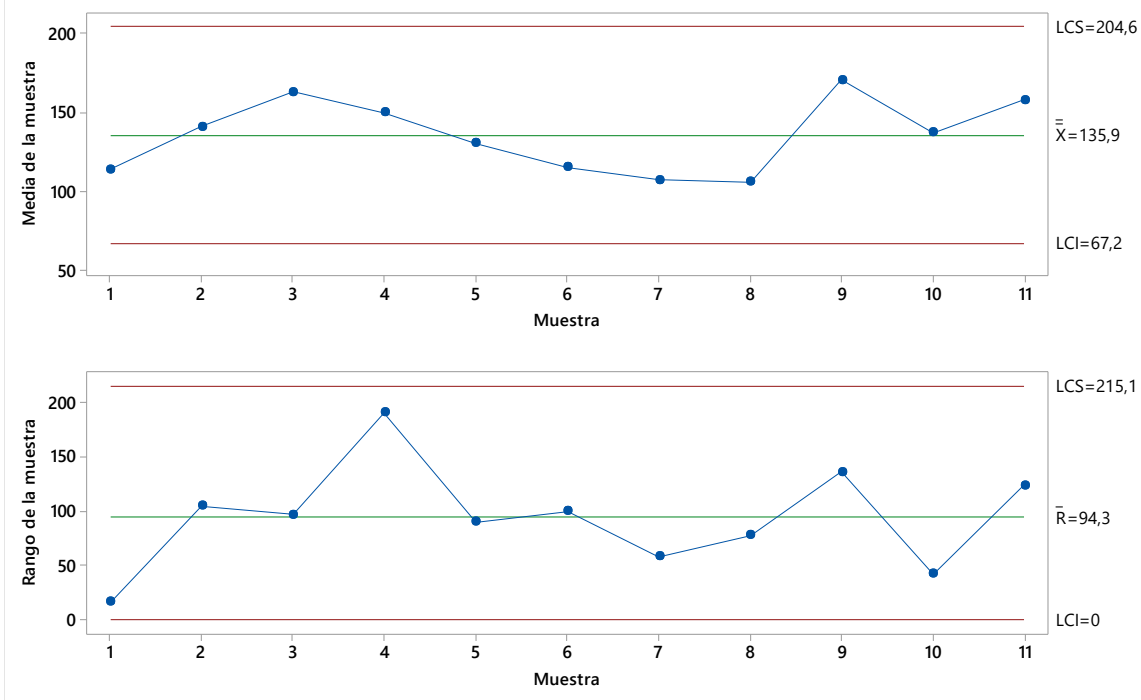
Gráfica Xbarra-R de DQO salida (mg/l)



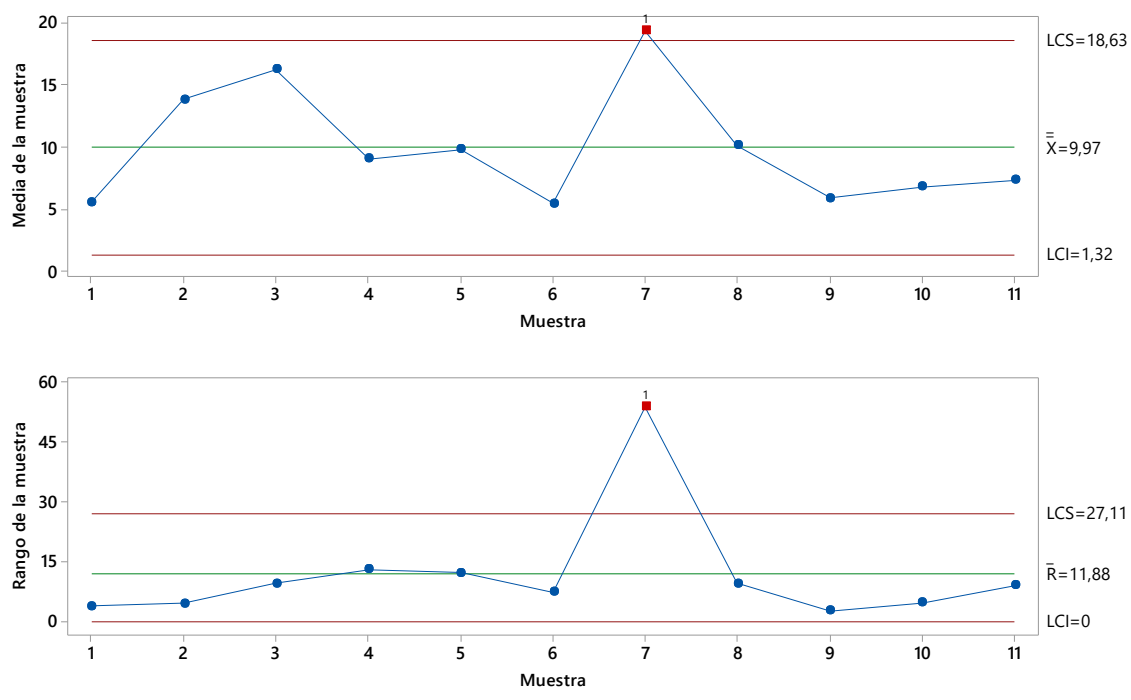
Gráfica Xbarra-R de Eficiencia (%)



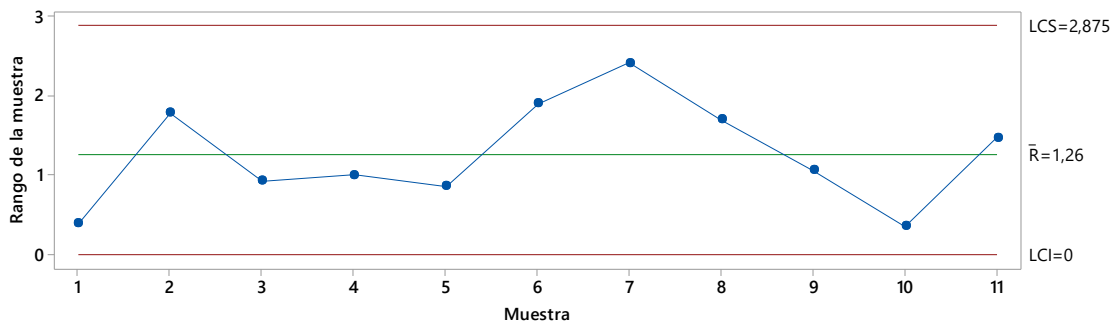
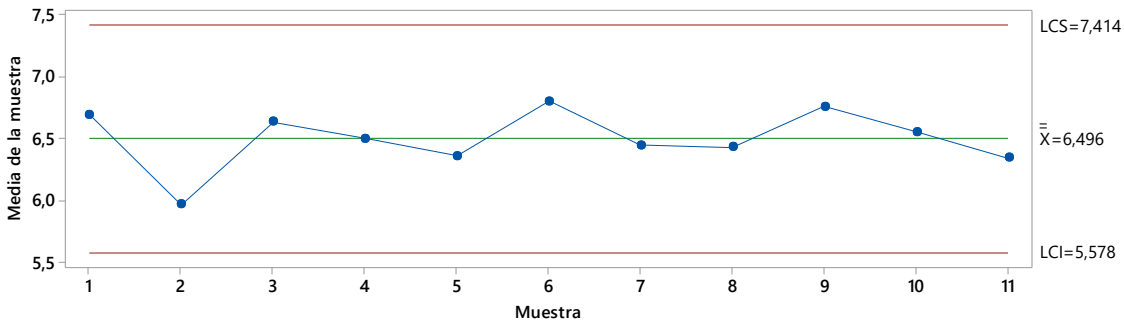
Gráfica Xbarra-R de SST en agua del reactor (mg/L)



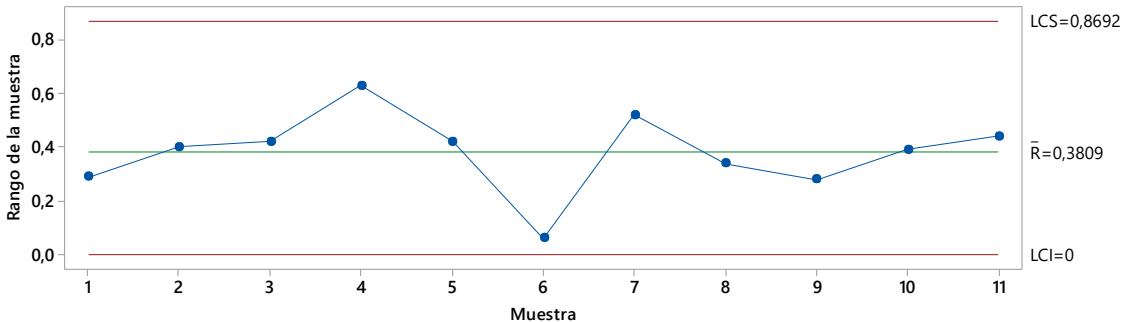
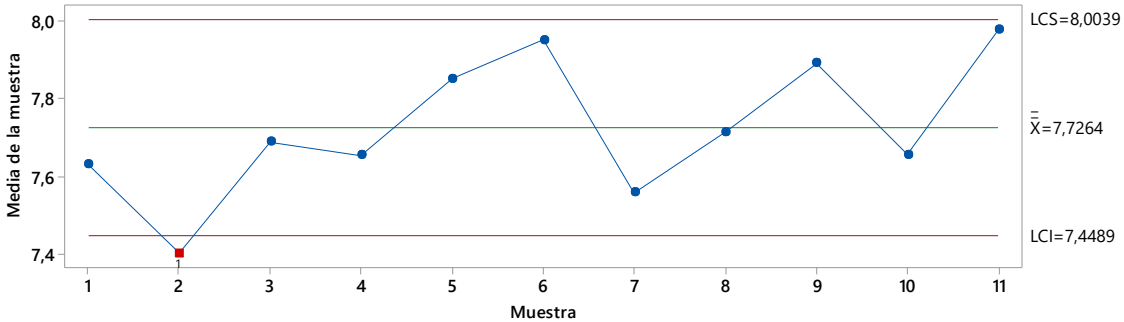
Gráfica Xbarra-R de SALR



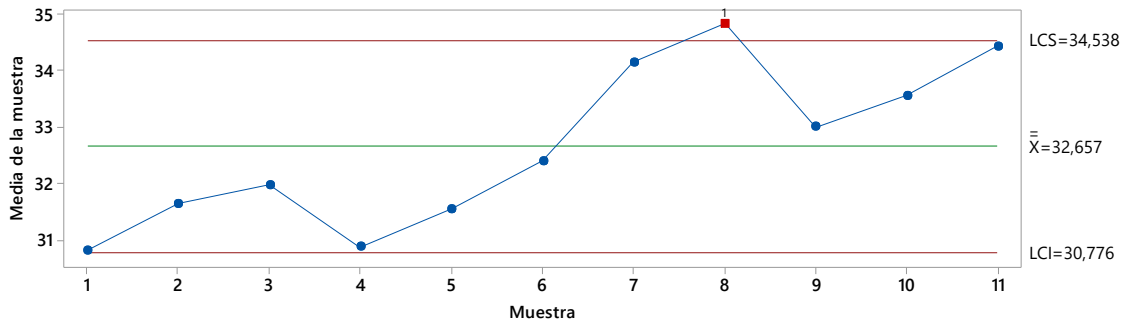
Gráfica Xbarra-R de pH entrada



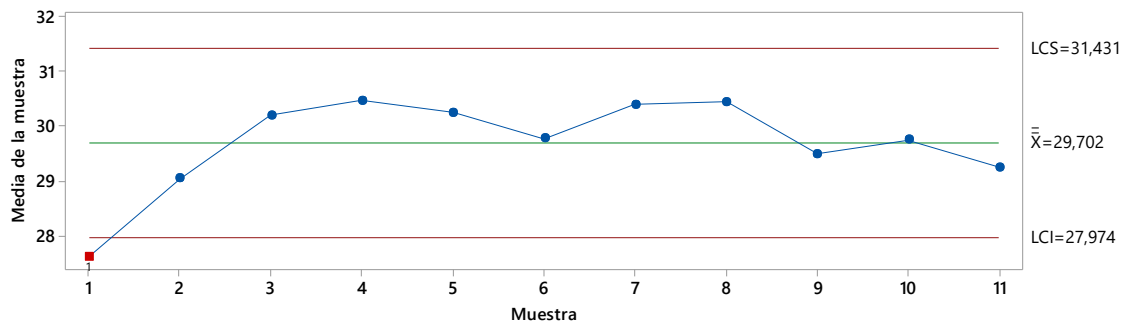
Gráfica Xbarra-R de pH salida



Gráfica Xbarra-R de Temp Entrada (°C)



Gráfica Xbarra-R de Temp Salida (°C)



ANEXO G. Resultados de prueba de jarras para definir dosis de polímero.



REPORTE PERSONAL DE SERVICIO

Planta de: Alimentos Polar Fecha: 24/5/2023
Dirección: Zona industrial de Valencia Sistema: PTAR
Ciudad: Valencia Estado: Carabobo País: Venezuela
Atención: Gerencia Técnica

El objetivo principal de la visita fue realizar las pruebas de jarras en el reactor piloto MBBR ubicado en la PTAR de APC Salsas y Untables.

Inicialmente, se validó la dosis de polímero con la operación actual de planta. De acuerdo con los resultados obtenidos, la dosis adecuada es de 15 ppm.

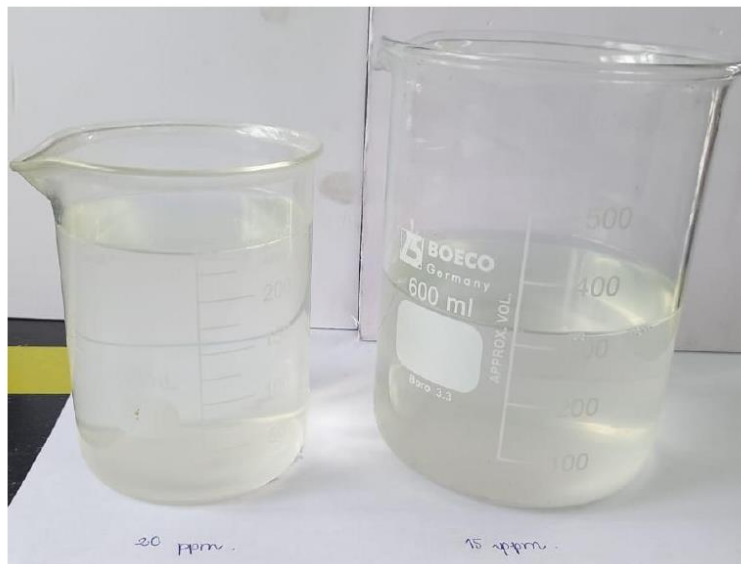


Imagen 1. Resultados de pruebas con dosis de 15 ppm y 20 ppm de polímero

REPORTE PERSONAL DE SERVICIO

Planta de: Alimentos Polar Fecha: 24/5/2023
Dirección: Zona industrial de Valencia Sistema: PTAR
Ciudad: Valencia Estado: Carabobo País: Venezuela
Atención: Gerencia Técnica

Posteriormente, se realiza la prueba con la muestra del reactor MBBR, obteniéndose cualitativamente una dosis óptima 7 ppm



Imagen 2. Resultados de pruebas con dosis de 6 ppm, 7 ppm y 8 ppm de polímero

Siempre a sus órdenes,

Rosmely Nava