



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Facultad de Biología

Programa de Maestría
en Ciencias en Ingeniería Ambiental

**Evaluación experimental de un biorreactor de lecho móvil
secuencial automatizado para tratamiento de agua residual
doméstica.**

Tesis para obtener el grado de

Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Presenta

Ing. Juan Carlos Beirana Villalobos

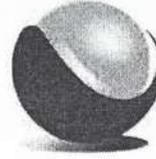
Director de tesis

Dr. Ricardo Pérez Munguía

Co-director de tesis

Dr. Constantino Domínguez Sánchez

Morelia, Michoacán febrero de 2023



MCIA
Maestría en Ciencias
en Ingeniería Ambiental
UMSNH

DR. JESUS ALBERTO RODRIGUEZ CASTRO
COORDINADOR GENERAL DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
AMBIENTAL
PRESENTE

Por este conducto nos permitimos comunicarle que después de haber revisado el manuscrito final de la Tesis titulada "**Evaluación experimental de un biorreactor de lecho móvil secuencial automatizado para tratamiento de agua residual doméstica**" presentado por el Ing. **Juan Carlos Beirana Villalobos** con matrícula **2023439e**, consideramos que reúne los requisitos suficientes para ser publicado y definido en Examen de Grado de Maestro en Ciencias.

Sin otro motivo particular por el momento, reiteramos a usted un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Morelia, Michoacán 17 de febrero de 2023
MIEMBROS DE LA COMISIÓN REVISORA



Dr. Ricardo Miguel Pérez Munguía
Director de Tesis



Dr. Constantino Domínguez Sánchez
Co-director de Tesis



Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe
Sinodal



Dr. José Jaime Madrigal Barrera
Sinodal



Dr. Raúl Cortez Martínez
Sinodal

Agradecimientos

En primera instancia agradezco a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y en específico al programa de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental por permitirme ser parte de este proceso. Agradezco a la CONACYT por la beca otorgada para poder desarrollarme en este posgrado y en mi carrera profesional.

Agradezco a mi asesor el Dr. Ricardo M. Pérez Munguía por todo el apoyo que me brindó durante la maestría, la paciencia que me tuvo y la disposición que hasta el final mostró. Agradezco también a mis asesores el Dr. Constantino Domínguez, la Dra. Sonia T. Sánchez, el Dr. José J. Madrigal y el Dr. Raúl Cortez, por su valioso apoyo para mi formación como Maestro en Ciencias y su consideración en la participación de eventos, prestamos de equipos y atenciones en general.

De manera especial agradezco al Dr. José Apolinar Cortés que, desde su profesionalismo como docente e investigador, me brindó siempre la mejor de las atenciones, me prestó el laboratorio y los instrumentos necesarios para poder llevar a cabo los análisis pertinentes y me capacitó en conjunto de su equipo de laboratorio para poder desarrollarme y desarrollar mi proyecto. Al igual agradezco al equipo del laboratorio de Ingeniería Ambiental en el posgrado de la Facultad de Ingeniería Química, que siempre estuvo para resolver mis dudas, solventar mis problemas y brindarme su apoyo.

Un agradecimiento al Dr. Juan M. Sánchez Yáñez, que a través de un arduo trabajo y con la ayuda de su equipo de laboratorio, me instruyó para adquirir los conocimientos necesarios de los cuales yo más carecía. También agradezco a su equipo de laboratorio que siempre estuvo ahí para apoyarme.

Agradezco fuerte, especialmente y por igual a mis padres Ignacio A. Beirana Bolaños y Elsa J. Villalobos Bulle que, con todo su esfuerzo, su amor y su paciencia, siempre me han apoyado en todos mis progresos de la vida, y que en este caso no fue la excepción, donde me apoyaron económica, moral y espiritualmente. También agradezco a mi hermano, su esposa y toda mi familia en general por el apoyo que siempre me brindan, en la medida que les es posible.

Agradezco al fraccionamiento “Latérsi” y al APAS por la disposición en ayudarme a poder obtener las muestras de agua para poder llevar a cabo mi proceso, las atenciones brindadas y la confianza que me tuvieron desde que me acerque a ellos.

Agradezco a JLAPAS y al Dr. Juan A. Villalón por poner en mi disposición la planta de tratamiento de tres marías, donde me recibieron amablemente y me proveyeron en todo momento del lodo que yo requería, incluso me permitieron llevar a cabo un proceso de inoculación dentro de su reactor.

Agradezco a todos mis compañeros de la maestría y en especial a Estela Rubí Ojeda que siempre estuvieron para mí, para resolver mis dudas, para calmar mis inquietudes y para compartir mis alegrías durante todo este proceso.

Finalmente, pero no menos importante, agradezco a todos mis amigos que siempre han confiado en mí, en mis metas, en mis sueños y mis anhelos; sé que siempre voy a tener una mano dispuesta a ayudarme de ser necesario y de igual manera siempre voy a estar ahí para lo que necesiten.

Índice de Contenido

1. Resumen	xi
2. Abstract.....	xii
3. Introducción.....	1
4. Antecedentes.....	3
5. Marco teórico.....	4
5.1 Tren de tratamiento.....	4
5.2 Tratamientos biológicos.....	5
5.3 Biomasa y biopelícula.....	6
5.4 Crecimiento de microorganismos y mineralización	7
5.5 Reactores biológicos	7
5.5.1 Reactores de biopelícula	7
5.6 Reactor MBBR	8
5.7 Ventajas y desventajas MBBR	9
5.8 Elementos principales de un reactor MBBR.....	11
5.8.1 Portadores plásticos de biopelícula	11
5.8.2 Forma del tanque del biorreactor	12
5.8.3 Bombas o Compresores de aire.....	12
5.8.4 Difusores de aire.....	12
5.9 Parámetros de control	12
5.9.1 Volumen de llenado útil del lecho.....	12
5.9.2 Tipo de movimiento del lecho móvil en el biorreactor	13
5.9.3 Tamaño de burbuja.....	13
5.9.4 Puesta en marcha del biorreactor	13
5.10 Parámetros de diseño y operación.....	13
5.10.1 Caudal (Q).....	13
5.10.2 Carga orgánica.....	14
5.10.3 Tiempo de residencia:	14
5.10.4 SALR y SARR	14
5.11 Consideraciones en la creación del modelo.....	15
5.11.1 Sistema discontinuo.....	15

6. Justificación.....	16
7. Hipótesis	17
8. Objetivos.....	18
8.1 General.....	18
8.2 Específicos	18
9. Materiales y métodos.....	19
9.1 Diseño del biorreactor MBBR	19
9.1.1 Dimensionamiento de tanques de aireación.	19
9.1.2 Volumen del líquido, TRH y Área del reactor.	20
9.1.3 Requerimiento de oxígeno	21
9.1.4 Características calculadas del modelo.....	22
9.2 Estructura del modelo de la PTAR MBBR.....	23
9.3 Construcción de los tanques de la PTAR	25
9.4 Diagrama de funcionamiento del modelo.....	27
9.5 Toma de agua residual y muestreo	29
9.5.1 Recolección de agua residual para funcionamiento del modelo	29
9.5.2 Puntos de muestreo en el modelo.....	30
9.6 Puesta en operación del biorreactor	32
9.7 Automatización de la planta de tratamiento MBBR.....	34
9.7.1 Reglas de operación del sistema automatizado.	35
10. Resultados y discusión	36
10.1 Análisis y caracterización del agua residual doméstica.....	36
10.1.1 Parámetros fisicoquímicos en el afluente.....	37
10.1.2 Materia orgánica presente en el afluente.....	39
10.1.3 Caracterización de agua residual.....	40
10.2 Análisis del biorreactor MBBR	41
10.2.1 Oxígeno disuelto (OD) en reposo.....	46
10.3 Análisis y caracterización del agua residual tratada	47
10.3.1 Parámetros fisicoquímicos del efluente.....	49
10.3.2 Materia orgánica presente en el efluente.....	51
10.3.3 Caracterización del agua residual tratada.....	52

10.3.4 Análisis del tratamiento del agua residual doméstica	52
10.4 Consumo energético	58
10.5 Crecimiento de biofilm en acarreador	59
11. Conclusiones.....	61

Índice de Figuras

Figura 1. Esquema típico PTAR (STORM, 2009)	5
Figura 2. Crecimiento del biofilm	6
Figura 3. Principio de un MBBR (Tomado de: Ødegaard et al., 1994).....	8
Figura 4. Soporte plástico marca Kandles tipo “K1”	11
Figura 5. Esquema de alturas de tanques.....	23
Figura 6. Altura modelo original	24
Figura 7. Alturas del modelo para presión de electroválvulas	24
Figura 8. Alturas del modelo final.....	24
Figura 9. Dimensiones del tanque de grasas y aceites.....	25
Figura 10. Dimensiones del biorreactor	25
Figura 11. Tanque de separación de grasa y aceites.....	26
Figura 12. Tanque biorreactor	26
Figura 13. Tanque de separación de grasa y aceites.....	26
Figura 14. Tanque sedimentador	26
Figura 15. Diagrama de funcionamiento del modelo MBBR.....	27
Figura 16. Tanque MBBR con límite de descarga para mantener los soportes hidratados (fuente propia)	28
Figura 17. Agua residual tratada, enfrascada para su análisis (fuente propia)	29
Figura 18. Diagrama de muestreo del modelo.....	30
Figura 19. MBBR con inóculo	32
Figura 20. PTAR Club de golf Tres Marías (fuente propia)	32
Figura 21. Sedimentación de lodo del licor mixto de la PTAR (fuente propia).....	33
Figura 22. Diagrama de automatización del sistema.....	34
Figura 23. Gráfica de sólidos totales presentes en el agua residual	38
Figura 24. Gráfica de sólidos volátiles presentes el agua residual cruda	39

Figura 25. Gráfica de materia orgánica representada como DQO en el agua residual cruda	40
Figura 26. Alcantarillado con solidos acumulados.....	41
Figura 27. Gráfica de pH vs Tiempo de residencia celular del reactor	42
Figura 28. Gráfica de Temperatura vs Tiempo de residencia celular del reactor.....	43
Figura 29. Gráfica de relación F/M vs tiempo de residencia celular del reactor.....	44
Figura 30. Análisis de interacción de SSLM, SSVLM, DQO del afluente y SST en el afluente	46
Figura 31. Gráfica de oxígeno disuelto tras 2 horas de reposos en el reactor vs TRC	47
Figura 32. Gráfica de SST vs TRC en agua tratada.....	50
Figura 33. Gráfica de SSV vs TRC en agua tratada	50
Figura 34. Gráfica de DQO vs TRC en agua tratada.....	51
Figura 35. Muestras de agua residual cruda, tratada y lodo del proceso de clarificación (fuente propia).....	53
Figura 36. Gráfica temperatura vs TRC en el afluente y efluente del biorreactor	54
Figura 37. pH vs TRC en el afluente y efluente del biorreactor.....	54
Figura 38. Reducción de DQO en el proceso de clarificación del agua residual	55
Figura 39. Reducción de SST en el proceso de clarificación del agua residual	56
Figura 40. Porcentajes promedio de eliminación de SST, SSV y DQO.....	58
Figura 41. soportes "K1" con crecimiento de biofilm	60
Figura 42. Distintos crecimientos de biopelícula en soportes "K1"	60
Figura 43. Comportamiento del lodo dentro del reactor en reposo	60

Indice de Cuadros

Cuadro 1. Acrónimos en español.....	ix
Cuadro 2. Acrónimos en inglés	x
Cuadro 3. Ventajas y desventajas del biorreactor MBBR.....	9
Cuadro 4. Comparativa del porcentaje de remoción de DBO	10
Cuadro 5. Comparativa del porcentaje de remoción de SST.....	10
Cuadro 6. Valores de SALR.....	15

Cuadro 7. parámetros biocinéticos aeróbicos de tratamiento de aguas residuales	22
Cuadro 8. Parámetros del agua residual y dimensionamiento del reactor (fuente propia)...	23
Cuadro 9. Parámetros del agua residual y dimensionamiento del reactor a escala	23
Cuadro 10. Normas de medición de parámetros.....	31
Cuadro 11. Análisis del agua residual cruda en el alcantarillado	36
Cuadro 12. Análisis del agua residual cruda en el cárcamo	37
Cuadro 13. Caracterización de agua residual del fraccionamiento “Latërsi”	40
Cuadro 14. Caracterización del lodo en el reactor MBBR.....	45
Cuadro 15. Análisis de agua residual doméstica	48
Cuadro 16. Caracterización de agua tratada y valores máximos permisibles	52
Cuadro 17. Tabla de parámetros en agua residual cruda, tratada y porcentaje de eliminación	57
Cuadro 18. Valores de gastos del modelo, del diseño y típicos para PTAR	59

Cuadro 1. Acrónimos en español

Acrónimo	Descripción
DBO	Demanda Biológica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
ICE	Índice de Consumo Eléctrico
OD	Oxígeno Disuelto
PH	Potencial de Hidrógeno
PTAR	Planta de Tratamiento de Agua Residual
PPM	Partes por millón
Q	Caudal
SST	Sólidos Suspendidos Totales
SSV	Sólidos Suspendidos Volátiles
SSLM	Sólidos Suspendidos en Licor Mixto
SSVLM	Sólidos Suspendidos Volátiles en Licor Mixto
TRH	Tiempo de Retención Hidráulica

Cuadro 2. Acrónimos en inglés

Acrónimo	Descripción	Traducción
F/M	Food-Microorganism	Relación comida con microorganismo
MBBR	Moving Bed Biofilm Reactor	Biorreactor de lecho móvil
MBR	Membrane Bioreactor	Reactor de membrana
SARL	Surface Area Loading Rate	Tasa de carga de superficie
SARR	Surface Area Reduction Rate	Tasa de reducción de superficie

1. Resumen

Debido a las actividades de limpieza en casa habitación, la contaminación del agua doméstica aumenta progresivamente, cada año. Entre las opciones de depuración del agua doméstica, el Biorreactor de lecho móvil (MBBR) es considerado uno de los tratamientos biológicos más económicos, pero presenta un mayor consumo energético en comparación con un reactor de los activados convencionales. La revisión teórica del uso de esta tecnología permitió tomar decisiones acordes a tipos eficientes de lechos móviles, porcentaje de ocupación del lecho dentro del volumen útil y tiempos de retención (TRH) óptimos. Se diseñó un reactor MBBR discontinuo para aguas residuales domésticas, en base a las características del lugar de muestreo, con sistema automatizado para su correcto funcionamiento; posteriormente, se hizo un escalamiento a un reactor modelo en laboratorio donde se evaluaron la eficiencia de eliminación de la materia orgánica y sólidos suspendidos y se midieron los parámetros de pH, temperatura y OD. Se encontraron porcentajes de eliminación de 92%, 96% y 96% para DQO, SST y SSV respectivamente. El biorreactor también fue evaluado, encontrando características óptimas para funcionamiento como lo es un F/M de 0.5, temperaturas menores a 30°C y condiciones de pH entre los valores 6.5 y 7.5. Finalmente se calculó el gasto energético encontrado un ICE de 8 Kwh/m³ y se comparo con distintas PTAR y reactores MBBR de la literatura.

Palabras Clave: Biorreactor, MBBR, Materia orgánica, Mineralización, DQO, SST, lecho móvil, Tiempos de retención hidráulica.

2. Abstract

Due to household cleaning activities, domestic water pollution increases progressively every year. Among the domestic water purification options, the Moving Bed Bioreactor (MBBR) is considered one of the most economical biological treatments, but it has a higher energy consumption compared to a conventional activated reactor. The theoretical review of the use of this technology allowed decisions to be made according to efficient types of mobile beds, bed occupancy percentage within the useful volume and optimal retention times (HRT). A discontinuous MBBR reactor for domestic wastewater was designed, based on the characteristics of the sampling site, with an automated system for its correct operation; Subsequently, a scale-up was made to a model reactor in the laboratory where the removal efficiency of organic matter and suspended solids were evaluated and the parameters of pH, temperature and DO were measured. Elimination percentages of 92%, 96% and 96% were found for COD, SST and SSV respectively. The bioreactor was also evaluated, finding optimal characteristics for operation such as an F/M of 0.5, temperatures below 30°C and pH conditions between 6.5 and 7.5. Finally, the energy expenditure found in an ICE of 8 Kwh/m³ was calculated and compared with different WWTPs and MBBR reactors in the literature.

Keywords: Bioreactor, MBBR, Organic matter, Mineralization, COD, TSS, moving bed, Hydraulic retention times.

3. Introducción

La producción a gran escala de agua doméstica es una consecuencia inevitable en todas las sociedades contemporáneas. La mayoría de estas aguas suelen ser peligrosas para las poblaciones humanas y el medio ambiente y deben tratarse antes de su eliminación en arroyos, lagos, mares y superficies terrestres (Zhou et al., 2008). Datos proyectados en un estudio realizado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2020a) estima que la aportación de aguas domesticas en zonas habitacionales en México sería de 159 l/hab-día para el año 2020. “Durante el año 2017, las 2526 plantas en operación a lo largo del país trataron 135.6 m³/s, es decir el 63% de los 215.2 m³/s recolectados a través de los sistemas de alcantarillado” (CONAGUA, 2020b).

La necesidad de crear un ambiente más equilibrado y reducir la contaminación que aportamos como sociedad ha llevado a que la construcción de casas ecológicas sea una práctica cada vez más recurrente, con el uso de ingeniosos sistemas de producción energética limpia como los paneles solares y aprovechamiento de los recursos como captadores de agua de pluvial, tratamiento y reutilización del agua residual generada. (Revista ferrapat, 2020). Incluso existe una certificación en construcción de reconocimiento internacional para edificios sustentables creado por el consejo de Edificación Sustentable de Estados Unidos que lleva el nombre de LEED (liderazgo en Energía y Diseño Ambiental, por sus siglas en inglés) donde el tratamiento del agua residual es un requisito (Bioconstrucción y Energía Alternativa, 2020). Por lo tanto, existe un interés del sector privado por el tratamiento de agua residual doméstica, que permita reutilizar el agua tratada de manera económica y efectiva.

En este sentido los tratamientos biológicos son los más populares, debido a su bajo costo y su fácil mantenimiento. En estos tratamientos el principal objetivo es el reducir su contenido orgánico y en algunos casos de nutrientes, tales como el nitrógeno y el fósforo. En muchos sitios, la remoción de compuestos orgánicos traza, que resultan tóxicos, es también un objetivo importante (Moeller y Tomasini, 2003). Para ello se han utilizan los reactores biológicos, como lo son el goteo por filtro, contactores biológicos rotativos (RBC por sus siglas en inglés), biofiltros de medios granulares y reactores de lecho fluidizado, todos con distintas desventajas. Los filtros no son efectivos en cuanto a volumen, los RBC experimentan fallas mecánicas con frecuencia, los biofiltros sumergidos de medios

granulares necesitan constante retrolavado y los reactores de lecho fluidizado muestran inestabilidad hidráulica (Ødegaard, et al., 2004). Existen estudios que sugieren el uso de reactores biológicos de membrana (MBR, por sus siglas en inglés) como una tecnología innovadora y confiable en términos de tratamiento biológico avanzado y eliminación de contaminantes que muestran una excelente eficiencia de eliminación de materia orgánica y microorganismos, pero la viabilidad en vista de los costos operativos y la inversión estimada sigue sin estar clara (Jabornig y Favero., 2013). Lesjean y Huisjes en 2008, mencionan que este método se ha usado, pero no comúnmente, para tratamiento de aguas domésticas en hogares y unidades comunitarias (4-50 habitantes). Un obstáculo para una amplia aplicación podría representar la alta inversión y costes operativos de las unidades disponibles comercialmente, mayores en comparación con el tratamiento biológico convencional, por lo tanto, no son rentables para casas unitarias o edificios pequeños (Jabornig y Favero, 2013 en Humeau et al., 2011). Otros problemas de aceptación pueden resultar de un mayor mantenimiento debido al ensuciamiento de las membranas y por ende mayor costo de mantenimiento (Kraume et al., 2010). Por ello, se decidió trabajar sobre el proceso MBBR, que se desarrollado en Noruega a finales de los 80's y principios de los 90', siendo un proceso de trabajo continuo, con una pérdida baja de carga, alta superficie específica de biopelícula, por ende, menor volumen de construcción y poca producción de lodos, lo cual lo hace más eficiente y menos costoso que otros reactores biológicos (Ødegaard, et al., 1994), para el año 2004, este sistema ya había sido probado con éxito y llevado a cabo en más de 200 plantas de tratamiento de agua alrededor de 22 países en el mundo (Ødegaard et al., 2004).

El objetivo de esta investigación fue estudiar el comportamiento de biorreactor MBBR secuencial automatizado diseñado en laboratorio, que se adapte a viviendas y lugares donde exista fluctuaciones en su caudal, aprovechando las fuerzas físicas de la gravedad y la tecnología actual, para poder desarrollar un diseño con la menor medida posible, bajos costos de operación y altos índices de remoción de contaminantes, de manera que sea costeable para el sector privado de la sociedad. Con ello desarrollar una nueva visión en el país para el tratamiento de aguas domésticas, permitiendo reutilizarlas para diferentes fines o reducir la carga de contaminante que a diario se vierte en el alcantarillado urbano y en las aguas superficiales, ayudando a los procesos de tratamiento de aguas públicas y disminuyendo el vertido de aguas no tratadas en las fuentes hídricas del país.

4. Antecedentes

Los reactores de lodos activados y específicamente los reactores MBBR ya han sido probados con distintas configuraciones para tratamientos de agua doméstica, tanto en tamaños industriales como para casa o departamentos. En el año 2011 McQuarrie y Boltz realizaron un resumen de las aplicaciones, diseño y rendimiento del proceso MBBR, ayudando a seleccionar de manera correcta el diseño para el proceso que se requiera y una amplia visión de los soportes plásticos para la biopelícula que pueden ser utilizados.

En 2014 Barwal y Chaudhary realizaron una revisión de 26 bibliografías, de 1992 hasta 2012, de reactores MBBR, donde abordaron tratamiento desde de agua domestica municipal, agua residual de la industria química, hasta agua sintética elaborada en laboratorio. Desde plantas a escala real, hasta modelos a escala de laboratorio. Los resultados encontrados fueron los siguientes: DQO de 60-90%, DBO de 75-97%, nitrógeno y algunos otros nutrientes de 45-85%.

Jabornig y Favero en 2013 realizaron un prototipo de un reactor MBBR con una membrana de filtración con retro lavado, para un caudal de 200 l/día (para una sola casa), encontrado resultados satisfactorios en la reducción de SST en un 98%, DBO en un 95% y turbidez en un 99%, pero la DQO tan solo se redujo en un 65% para ello el ICE de su modelo fue de 1.26 Kwh/m³.

García y Gutiérrez para el 2018 realizaron un diseño y operación de un MBBR convencional para tratamiento de agua residual doméstica a escala. Utilizaron agua que sintetizaron en laboratorio, los porcentajes de remoción de contaminantes encontrados fueron bajos, entre ellos: SST de 45.84% ± 26.45, SSV de 59.20% y DBO de 22.67 ± 21.77 %.

5. Marco teórico

5.1 Tren de tratamiento

Para poder llevar a cabo un proceso de tratamiento de agua residual con éxito, se requiere de una serie de pasos para eliminar sus contaminantes, conocido como tren de tratamiento. Se diseñan en base en los contaminantes a ser eliminados. Generalmente se trata de un proceso de flujo o caudal continuo y regulado, pero en algunos casos se usan procesos secuenciales, donde los distintos procesos inician hasta que el proceso anterior termina. El número de procesos unitarios que pueden combinarse es ilimitado. El término tren de tratamiento se usa para describir una combinación particular de procesos o sistemas empleados para alcanzar un objetivo específico de tratamiento. Un esquema típico de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) se presenta a continuación:

- Tratamiento preliminar: remueve basura, arena y ayuda a regular el caudal.
- Tratamiento primario: se remueven sólidos en suspensión presentes en el agua. Los principales son la sedimentación, la flotación, coagulación, floculación y filtración.
- Tratamiento secundario: se remueve la materia orgánica biodegradable. Los procesos biológicos aeróbicos son los más comunes.
- Tratamientos terciarios: remueve materiales suspendidos remanentes y nutrientes. Los más populares son filtros de carbón activado, ultrafiltración, osmosis inversa y membranas cerámicas.
- Desinfección: remueve microorganismos remanentes y patógenos

Si los procesos fueron diseñados correctamente, el agua ya debe de tener una excelente calidad, apta para ser reutilizada en servicios al público. La Figura 1 muestra un esquema típico de un tren de tratamiento.

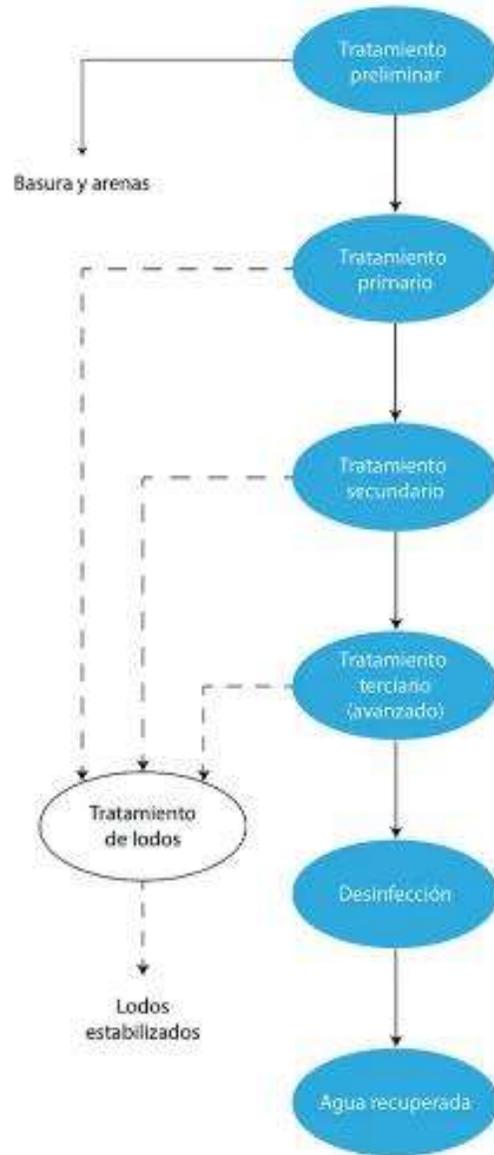


Figura 1. Esquema típico PTAR (STORM, 2009)

5.2 Tratamientos biológicos

Los tratamientos biológicos, son los encargados de mineralizar la materia orgánica y eliminar nutrientes presentes en el agua residual, por medio del metabolismo de un conjunto de microorganismos que se alimentan de estos contaminantes. Estos crecen y se desarrollan dentro del agua residual y reciben el nombre de biomasa o lodo biológico. Esta biomasa puede estar

compuesta de microorganismos aerobios que requieren de oxígeno para su metabolismo o de anaerobios que requieren ausencia de oxígeno para poder desarrollarse, o una combinación de ambos. Los procesos metabólicos aerobios se dan más rápido que los anaerobios, pero requieren de suministración de oxigenación constante (Moeller, G. y Tomasini, A. 2003). En ellos los niveles de OD se deben mantener por arriba de las 3ppm, lo que requiere de un consumo energético permanente (Torrescano, K. 2009). El espacio donde se lleva a cabo el tratamiento biológico recibe el nombre de reactor biológico o biorreactor.

5.3 Biomasa y biopelícula

La biomasa se define como una comunidad de microorganismos que crecen en una matriz de exopolisacáridos, por medio de macromoléculas de carbohidratos, que se sintetizan por enzimas bacterianas y se excretan y acumulan extracelularmente dando al cultivo un aspecto viscoso. Esta es una forma habitual de crecimiento de las bacterias en la naturaleza (Lasa, Del Pozo, Penadés, y Leiva, 2005).

Una biopelícula es biomasa inmovilizada en donde las especies individuales de la biopelícula trabajan en conjunto para mineralizar la materia orgánica presente en el agua doméstica, participando tanto microorganismos aerobios y anaerobios, ayudando a que el proceso de degradación sea más rápido. El soporte ayuda a que los microorganismos se protejan del exterior dentro del mismo y a que el lodo permanezca adherido al soporte y separado del agua tratada.

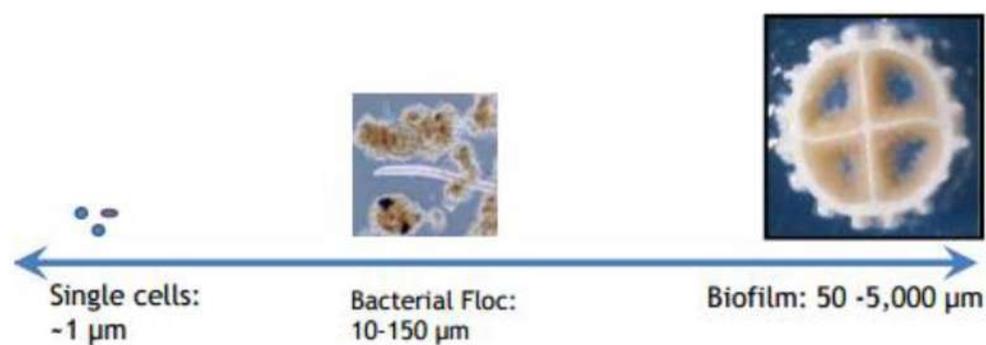


Figura 2. Crecimiento del biofilm

5.4 Crecimiento de microorganismos y mineralización

Como menciona Jaramillo en 2005, el tratamiento biológico de las aguas residuales es un proceso en el cual los agentes microbiológicos convierten el sustrato en productos, siendo así, una conversión de los elementos en su forma orgánica a su forma inorgánica altamente oxidada, llamada mineralización. Para el caso aerobio el agente biológico es la biomasa, que es un conjunto de microorganismos aerobios que actúan sobre el sustrato, siendo este el alimento de los microorganismos, produciendo más microorganismos junto con agua (H₂O) y dióxido de carbono (CO₂). Las bacterias encargadas de este proceso se encuentran inicialmente en baja proporción, pues los organismos están en fase de retardo, que es un proceso de aclimatación o adaptación y ocurre porque los microorganismos están produciendo enzimas para el nuevo sustrato o la nueva concentración en la alimentación inicial, ya que se han aclimatados comienza la fase de crecimiento balanceado, pues las bacterias no necesitan nueva maquinaria enzimática, ya que tienen gran cantidad de sustrato o alimento en comparación con el número de bacterias; cuando el sustrato se comienza a agotar las bacterias se han multiplicado y estas no fluctúan considerablemente, se presenta la fase estacionaria, y por último, cuando el sustrato orgánico se agota junto con las reservas internas se da inicio a la fase de declinación y muerte.

5.5 Reactores biológicos

Los reactores biológicos, como se menciona antes, son tanques donde se llevan a cabo procesos metabólicos de microorganismos, con el fin de reducir la materia orgánica presente y convertirla en biomasa que después tendrá que ser separada por algún proceso físico. En los reactores biológicos convencionales la biomasa se encuentra suspendida, esto quiere decir, que el lodo biológico está libre y mezclado con el agua residual. Por lo tanto, es necesario purgar el lodo microbiológico que se genera en el sistema para retirarlo del agua tratada, pero también es necesario llevar a cabo una recirculación constante del lodo para que pueda degradar la materia orgánica del agua residual que entra al sistema (Ramalho, 1996)

5.5.1 Reactores de biopelícula

En los reactores de biopelícula el tratamiento biológico se da por medio del metabolismo de microorganismos presentes en una biomasa adherida a soportes, ya sean orgánicos o

inorgánicos. Estos soportes proveen de un espacio protegido a los microorganismos donde puede crecer, desarrollarse y degradar la materia orgánica.

Las características de la biopelícula permiten que un elevado número de microorganismos se mantengan e interactúen dentro del reactor ayudando a que la degradación de la materia orgánica se lleve en menores TRH, comparado a reactores de biomasa suspendida y, por ende, el agua doméstica pueda tratarse en reactores que ocupan un menor espacio (Liu y Tay, 2001). Nava et al., en 2013 demostró que los reactores de biomasa adherida tienen mejores eficiencias de eliminación de DQO (81%) en comparación de los reactores de biomasa suspendida (73%).

5.6 Reactor MBBR

El reactor MBBR es un reactor de biopelícula, que lleva a cabo un tratamiento de biomasa adherida, donde la biopelícula se adhiere a pequeños elementos plásticos comúnmente llamados “soportes o acarreadores” con una gran superficie específica. Las características que le da ser un reactor de biopelícula evita la recirculación y purga de lodos (Rusten et al., 1992). Al conjunto de acarreadores con biomasa adherida se le conoce como lecho.

Este reactor se basa en el constante movimiento del lecho en todo el volumen del agua a tratar, ya sea por medio de aireación para la versión aerobia o por movimiento mecánico en la versión anaerobia, como se muestra en la figura 3a y 3b respectivamente (Ødegaard et al., 1994).

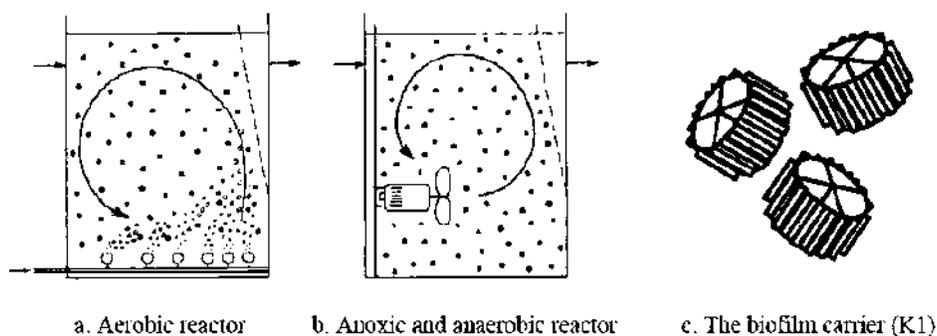


Figura 3. Principio de un MBBR (Tomado de: Ødegaard et al., 1994)

El área en la superficie de la biopelícula en cada reactor se controla mediante la cantidad de elementos plásticos añadidos (figura 3c). Si una planta de tratamiento necesita más capacidad debido al aumento de las cargas orgánicas, esto se puede solucionar fácilmente simplemente agregando más elementos plásticos al reactor (Rusten et al., 1992).

5.7 Ventajas y desventajas MBBR

Una de las características más importantes del reactor de biopelícula de lecho móvil es que debido a sus características que la fracción de llenado del portador en el reactor puede variar dependiendo de las características fisicoquímicas del afluente y objetivos del proceso. La fracción de llenado estándar es del 67%, sin embargo, para que el movimiento del portador sea libre en toda la cámara se recomienda que las fracciones de llenado sean inferiores al 70%, aun así, se puede usar tanto como sea necesario debajo de esto (Ødegaard et al., 2004). En la tabla 3 se presentan las ventajas y desventajas recopiladas por Huartos (2018), para un sistema de tratamiento de un biorreactor de lecho móvil.

Cuadro 3. Ventajas y desventajas del biorreactor MBBR

Ventajas	Desventajas
Larga vida útil	Alto consumo energético debido a la aeración
Requerimiento de un área de terreno pequeña	Alto costos debido al consumo eléctrico.
Económica mente viable para la construcción	El mantenimiento es complejo
Efectividad demostrada a bajas temperaturas	Puede requerirse adición de productos químicos para mejorar las características el licor mixto estabilizado
No es necesaria la recirculación de lodos	Requiere de tamizado para prevenir pérdida del medio plástico y daños en bombas
Los sólidos producidos son fácilmente sedimentables	La información al respecto del diseño de este tipo de tecnología es muy escasa y este es generalmente realizado por el proveedor
Poca producción de lodos	Como parte del proceso de tratamiento, existen zonas anóxicas e incluso zonas anaerobias. Estas configuraciones producen olores indeseables que requieren de sistemas para el control

El sistema MBBR es una tecnología avanzada de tratamiento de aguas domésticas de alta tasa con alta eficiencia de tratamiento; bajo costo de capital, operación, mantenimiento y reemplazo; esta tecnología es aplicable a una amplia gama de flujos de aguas domésticas que van desde 10.000 a 150.000 m³/día-1 y ha demostrado ser eficaz para eliminar hasta el 90% de DQO y el 95% de la DBO, siempre que haya suficiente TRH (Barwa y chaudhary, 2014) La tabla 4 presenta la eficiencia de remoción de DBO de distintos reactores biológicos y la tabla 5 muestra la remoción de los sólidos suspendidos totales (SST), para el mismo tipo de reactores (Huartos, 2004).

Cuadro 4. Comparativa del porcentaje de remoción de DBO

Tecnología	Porcentaje de remoción de DBO
Reactor biológico de membrana	99
Reactor biológico secuencial	92
Reactor biológico de lecho móvil (MBBR)	92
Lodos activados	90
Biodiscos rotativos	88
Filtro percolador	80
Filtro biológico aireado	80

Cuadro 5. Comparativa del porcentaje de remoción de SST

Tecnología	Porcentaje de remoción de DBO
Reactor biológico de membrana	99.9
Reactor biológico secuencial	47
Reactor biológico de lecho móvil (MBBR)	95
Lodos activados	80
Biodiscos rotativos	92
Filtro percolador	80
Filtro biológico aireado	85

5.8 Elementos principales de un reactor MBBR

5.8.1 Portadores plásticos de biopelícula

Comúnmente llamados “carriers” son soportes de material plástico con densidad más baja que las del agua, próxima a 1 gr/cm^3 que les permite moverse fácilmente en el reactor incluso con porcentajes de llenado del 70%. Los portadores de biopelícula de plástico se moldean a partir de polietileno virgen de alta densidad, pero pueden ser polietileno de alta densidad reciclado, algunos se fabrican con una densidad aumentada (por ejemplo, 0.98 gr/cm^3 para portadores de biopelícula pesados). El área de superficie específica a granel se basa en el 100% de relleno del portador, está dado por el proveedor y es característica de un portador de biopelícula de plástico específico, se reduce proporcionalmente al relleno del portador, ejemplificando, un portador de biopelícula de plástico con un área de superficie específica a granel de $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ tiene un área de superficie específica neta de $250 \text{ m}^2/\text{m}^3$ al 50% de llenado del portador (McQuarrie et al., 2011). Uno de los portadores de biopelícula más eficientes y el más utilizado es el Kandless “K1” que se muestra en la figura 4, está hecho de polietileno de alta densidad (densidad 0.95 gr/cm^3), tiene la forma de un pequeño cilindro con una cruz en el interior del cilindro y aletas en el exterior, tiene una longitud de 7 mm y un diámetro de 10 mm, se han introducido varios portadores de otros tamaños y formas, pero el portador K1 sigue siendo el más útil (Ødegaard et al., 2004).

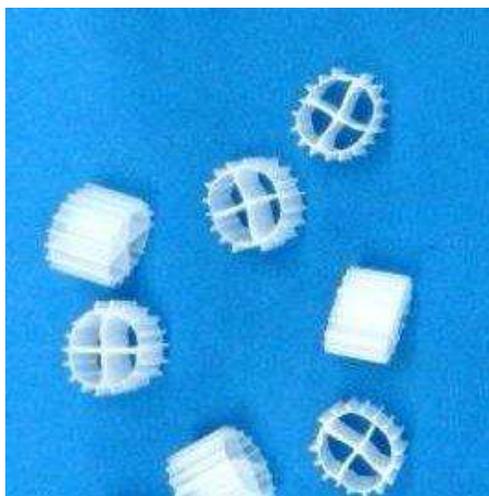


Figura 4. Soporte plástico marca Kandless tipo “K1”

5.8.2 Forma del tanque del biorreactor

El tanque del biorreactor se basa en el constante movimiento del lecho en todo el volumen del agua a tratar (Ødegaard *et al.*, 1994), para que el lecho móvil se mueva por todo el biorreactor se encuentra la geometría rectangular como la más eficiente con otras geometrías probadas.

5.8.3 Bombas o Compresores de aire

En los sistemas MBBR aerobios, la oxigenación del sistema es clave, por lo que se requieren de compresores de aire con la capacidad necesaria que aporte el oxígeno que requiere el sistema para llevar a cabo los procesos metabólicos de los microorganismos y para generar el movimiento de los soportes en todo el volumen de agua (Rusten *et al.*, 2006).

5.8.4 Difusores de aire

Para poder suministrar oxígeno dentro del líquido en el reactor, se requieren de difusores de aire, que permiten distribuir homogéneamente el aire inyectado, así como generar el movimiento de los soportes en el volumen total del líquido.

5.9 Parámetros de control

5.9.1 Volumen de llenado útil del lecho

Una ventaja importante del reactor de biopelícula de lecho móvil es que la fracción de llenado de los carriers en el reactor puede estar sujeta a preferencias, la fracción de llenado estándar es del 67%. Para poder mover libremente la suspensión del portador, se recomienda que las fracciones de llenado sean inferiores al 70%, aun así, se puede usar debajo de esto, tanto como sea necesario (Ødegaard *et al.*, 2004). Se ha demostrado (Ødegaard *et al.*, 1999) que el área de la biopelícula es el parámetro clave en el diseño y, por lo tanto, la tasa de diseño del proceso se basa más correctamente en el área efectiva del portador ($\text{g} / \text{m}^2\text{día}$)

5.9.2 Tipo de movimiento del lecho móvil en el biorreactor

En los procesos aeróbicos el movimiento del portador de biopelícula es causado por la agitación generada por el aire y se utiliza un sistema especial de aireación de burbujas gruesas; mientras que en los procesos anóxicos y anaeróbicos un mezclador mantiene los portadores en movimiento (Rusten et al., 2006).

5.9.3 Tamaño de burbuja

La aeración para un sistema MBBR aerobio juega un papel importante, ya que es necesario para la oxigenación del sistema, así como para el movimiento constante en todo el reactor de los soportes plásticos. El uso de burbujas finas favorece la transferencia de oxígeno al medio líquido, pero no promueve el movimiento de los soportes en el reactor, por otra parte, la burbuja gruesa mueve fácilmente el soporte en el medio líquido, pero limita la transferencia de oxígeno al líquido. Por ello se selecciona burbuja media o una combinación de ambas.

5.9.4 Puesta en marcha del biorreactor

En la lectura algunos autores proponen el uso de semillas o licor mixto de una PTAR para una inoculación de los bioportadores antes de arrancar el sistema, lo cual llevo alrededor de 2 semanas para que el biorreactor empezara a dar los resultados deseados (Jabornig y Favero 2013); sin embargo, Merz et al., 2007, no inoculo su reactor, pero tampoco evaluó la eficiencia del biorreactor en las primeras semanas, teniendo resultados óptimos. Lo cual indica que la siembra en los soportes plásticos del biorreactor no es necesario y no presenta cambios negativos en el sistema después de la puesta en marcha del biorreactor.

5.10 Parámetros de diseño y operación

5.10.1 Caudal (Q)

es el flujo de entrada del afluente, este debe ser regulado para poder abastecer de manera correcta a los sistemas de flujo continuo y que el proceso funcione de manera correcta.

5.10.2 Carga orgánica

Es la cantidad de sustrato que ingresa en determinado tiempo al sistema, necesaria para el desarrollo de los microorganismos y por ende el correcto funcionamiento del reactor. Se ve representado por la cantidad de DBO o DQO que ingresa al sistema en Kg.

5.10.3 Tiempo de residencia:

5.10.3.1 Tiempo de residencia hidráulico (TRH)

Es el tiempo que pasa desde que el influente ingresa al reactor hasta que sale del mismo. Es necesario calcularlo para la correcta eliminación del material orgánico. A mayor tiempo de residencia hidráulica, mayor la eliminación de los contaminantes orgánicos.

$$TRH=Q/Volumen$$

5.10.3.2 Tiempo de residencia celular (edad de lodo θ)

Es el tiempo que pasa el lodo dentro del reactor, desde el día del arranque, hasta el día que se purga el lodo. Para reactores MBBR la edad lodo no tiene límite, ya que el lodo se encuentra adherido en los acarreadores que permaneces siempre dentro del reactor.

5.10.4 SALR y SARR

a. SALR es la cantidad de masa de DBO en gramos, que el reactor acepta diariamente por m² de área total protegida del soporte (g/d·m²)

$$SALR \left(\frac{g}{m^2} \right) = \frac{\text{Daily Load} \left(\frac{g}{day} \right)}{\text{Total PSA} (m^2)}$$

b. SARR es la cantidad de masa de DBO en gramos, que el reactor remueve diariamente por m² de área total protegida del soporte:

$$SARR \left(\frac{g}{m^2} \right) = \frac{\text{Daily Reduction} \left(\frac{g}{day} \right)}{\text{Total PSA} (m^2)}$$

La tabla 6 presenta los valores típicos de remoción de DBO en relación a la cantidad de SALR del agua a tratar:

Cuadro 6. Valores de SALR

Valores típicos de diseño para reactores MBBR a 20°C		
Propósito	Objetivo de tratamiento % remoción	SALR de diseño $\left(\frac{g}{m^2} \cdot d\right)$
Remoción de DBO		
Tasa Alto	75-80 (DBO ₅)	25 (DBO ₅)
Tasa Normal	85-90 (DBO ₅)	15 (DBO ₅)
Tasa Baja	90-95 (DBO ₅)	7.5 (DBO ₅)

Traducción de tabla de valores de SALR de Ødegaard H. (1994)

5.11 Consideraciones en la creación del modelo

5.11.1 Sistema discontinuo

Los sistemas convencionales de lodos activados y MBBR generalmente trabajan con un flujo continuo y regulado, lo que permite a los microorganismos dentro de los soportes estar en contacto constante con su fuente de alimentación y permanezcan oxigenados. Al ser un proceso de flujo secuencial se tuvo especial atención de que los soportes se encontraran la mayor parte del tiempo en contacto con el agua y el oxígeno disuelto fuera el suficiente para la supervivencia de los microorganismos aerobios.

Este proyecto se diseñó como un sistema discontinuo y secuencial, debido a la inconstancia de descarga de aguas residuales en una casa habitación, a los horarios habituales de los inquilinos, así como a las condiciones referente a la época del año, evitando también el uso de equipos que requieren costos elevados como ecualizadores y medidores de caudal.

6. Justificación

El biorreactor de lecho móvil ha sido probado a escala en diferentes ocasiones para diferentes circunstancias dando resultados prometedores de hasta el 95% de remoción de materia orgánica en el agua doméstica. Este presenta ventajas sobre un sistema de lodos activados convencional en la construcción y operación, ya que requiere menor tamaño y genera menos lodos. La desventaja principal se debe a la necesidad de mantener en movimiento los soportes, lo que consume una cantidad mayor de energía y por ende el costo operativo aumenta considerablemente.

La construcción de un biorreactor a escala automatizado, que utilice un sistema en el que, basado en la fuerza de la gravedad y de carga secuencial, evite el uso de costosos equipos como un ecualizador de caudal o medidores de flujo y que reduzca el consumo eléctrico evitando usar bombas para el transporte del efluente y teniendo un ciclo de encendido/apagado de las bombas, de manera que estas no trabajen las 24 horas del día, ayudara a mejorar algunas desventajas en los reactores MBBR comunes.

La investigación tuvo el propósito de evaluar el efluente del reactor, para caudales variables que se presentan en complejos departamentales y hogares con el fin de satisfacer la necesidad de tratamiento de un sector reducido de la sociedad. El correcto funcionamiento podrá dar pauta a la creación de sistemas de tratamientos de agua económicamente viables, con un bajo costo de producción y un menor costo de mantenimiento y operación comparado con los biorreactores más comunes en el mercado.

7. Hipótesis

El diseño de un biorreactor experimental MBBR discontinuo automatizado para el tratamiento de agua residual doméstica permitirá eliminar contaminantes biológicos un 80% hasta un 95%, sin importar las variaciones de caudales típicos en conjuntos habitacionales y con un menor costo de construcción y consumo energético a los reactores biológicos convencionales.

8. Objetivos

8.1 General

Evaluar un biorreactor de lecho móvil del tipo MBBR discontinuo a escala y automatizado para mineralizar la materia orgánicos del agua doméstica.

8.2 Específicos

-Diseñar un biorreactor MBBR discontinuo para aguas residuales domésticas del fraccionamiento “Latërsi”.

-Escalar y manufacturar un modelo a escala de laboratorio

-Crear un sistema automatizado para el correcto funcionamiento del biorreactor.

-Evaluar la eficiencia de eliminación de contaminantes: DQO, SST, grasas y aceites, y los parámetros de PH y temperatura en el efluente del biorreactor.

-Evaluar las condiciones de operación de reactor con el porcentaje de eliminación la materia orgánica.

-Hacer una comparativa de los valores obtenidos con los valores requeridos por las normas oficiales mexicanas, en tema de aguas tratadas, con tal de cumplir los parámetros para descarga o reutilización.

-Calcular el consumo eléctrico por litro de agua tratada

9. Materiales y métodos

9.1 Diseño del biorreactor MBBR

9.1.1 Dimensionamiento de tanques de aireación.

El biorreactor MBBR se dimensiono en base al volumen y características de los soportes, el número de personas que habitan el fraccionamiento y características comunes para agua residual doméstica.

Se calculó el área superficial requerida del soporte o Carrier como lo muestra la ecuación 1, para el valor del caudal o flujo del agua se estimó a la entrada del reactor MBBR en atención al criterio de CONAGUA (2020) por el total de número de personas que habitan el fraccionamiento. Al ser un reactor secuencial se estimó el flujo de alimentación en base a la cantidad de personas que habitan en el fraccionamiento.

$$A_m = Q_F \cdot S_e \cdot \frac{E}{SALR \cdot 100\%}$$

Donde:

Q_F : Flujo del agua de alimentación (m^3/d)

S_e : DBO del agua en el afluente (g/m^3)

$SALR$: Carga por área superficial del Carrier en el reactor (g/m^2d)

A_m : Área superficial requerida del Carrier en el reactor (m^2)

E: Porcentaje de eficiencia de eliminación de DBO_5

Posteriormente se calculó el volumen de Carriers necesarios en el reactor, para ello se usa el área superficial específica del Carrier que se obtiene de la ficha técnica del producto

$$V_C = \frac{A_m}{A_{ec}}$$

Para el cálculo del tanque del biorreactor se considera el porcentaje de llenado útil. De tal forma que:

$$Vt = \frac{Vc}{f_m}$$

Donde:

Vc = volumen de Carriers necesarios en el reactor (m^3)

A_{ec} = área superficial específica del Carrier (m^2/ m^3)

A_m = Área superficial requerida del (m^2)

Vt = Volumen del tanque (m^3)

f_m = Porcentaje de llenado de Carrier

9.1.2 Volumen del líquido, TRH y Área del reactor.

El volumen del líquido se puede calcular considerando el porcentaje vacío en el Carrier (Información que proporciona el proveedor), de la manera que:

$$VL = Vt - Vc * (1 - SV)$$

Donde:

VL = volumen del líquido (m^3)

Vc = volumen de Carriers necesarios en el reactor (m^3)

Vt = Volumen del tanque (m^3)

SV = Porcentaje de espacio vacío en los Carriers (proveedor)

El tiempo de retención hidráulica se calcula de la siguiente manera:

$$TRH = \frac{Vt}{QF}$$

Donde:

V_l = volumen del líquido (m^3)

Q_f = Flujo de agua de alimentación(m^3/d)

Para el área del biorreactor se propone una altura del tanque adecuada al volumen del biorreactor, con la consideración que entre más altura la potencia de los equipos aumenta, para sistemas con difusores lo recomendable es usar alturas entre 3 a 4 m, o por debajo de ese rango.

$$AR = \frac{V_t}{H}$$

Donde:

V_t : volumen del tanque (m^3)

H : altura de reactor (m)

AR : Área del reactor (m^2)

9.1.3 Requerimiento de oxígeno

La ecuación para la carga de oxígeno que requiere el sistema se calcula con la ecuación del Ramalho (1996). Los parámetros biocinéticos “a” y “b” varían dependiendo la temperatura del agua, pero para aguas residuales domesticas comunes se enlistan en la tabla 7.

$$Kg \text{ } O_2/d = a(S_F - S_e)Q_f + bX_{v,a}V$$

Donde:

S_F : DBO del agua de alimentación

S_e : DBO del agua en el efluente

$X_{v,a}$: concentración de la biomasa

a: parámetro biocinético

b: parámetro biocinético

V: volumen del reactor

Cuadro 7. parámetros biocinéticos aeróbicos de tratamiento de aguas residuales

Agua residual	a	a'	b	b'	k
Doméstica	0.73	0.52	0.0075	0.106	0.17-0.03
Refinería	0.49-0.62	0.40-0.77	0.10-0.16	0.142-0.227	0.074
Química y petroquímica	0.31-0.72	0.31-0.76	0.05-0.18	0.071-0.255	0.0029-0.018
Cervecería	0.56	0.48	0.10	0.142	-
Farmacéutica	0.72-0.77	0.46	-	-	0.018
Papelera y blanqueamiento	0.5	0.65-0.8	0.08	0.114	-

Traducida de Ramalho (1996)

El funcionamiento y operación del biorreactor se ve afectado por parámetros físico-químicos del agua residual doméstica, por lo tanto, se tienen que hacer ajustes, principalmente por su temperatura y carga orgánica, que fueron calculados y son detallados en el anexo 1.

Con el fin de poder ajustar nuestro modelo a cualquier tipo de parámetro que presente el agua doméstica y las características del lugar (tales como caudal, temperatura y presión), se diseñó una hoja de cálculo que facilita la obtención de los valores de diseño. En el Anexo 2 se presentan 2 imágenes del programa que se creó para el cálculo de estos parámetros.

9.1.4 Características calculadas del modelo

En base a las características del lugar como del agua residual en cuestión, se encontraron los valores mostrados en la tabla 8, con los cuales obtuvimos las características del reactor para dicho fraccionamiento.

Estos valores fueron escalados a un sistema en dimensiones de laboratorio, con el fin de observar, analizar y evaluar el comportamiento del reactor. Los valores del escalamiento son los mostrados en la tabla 9.

Cuadro 8. Parámetros del agua residual y dimensionamiento del reactor (fuente propia)

Parámetros de laboratorio		Parámetros calculados	
Número de personas	600	Vc	25.19 m ³
DQO	1600 mg/l	Vt	73.27m ³
SSV	1100 mg/l	TRH	12 h
T	25°C	Oxígeno requerido	4.774 kgmO ² /h
Q	95.4 m ³	Potencia	2.1 KW

Cuadro 9. Parámetros del agua residual y dimensionamiento del reactor a escala

Parámetros de laboratorio		Parámetros calculados	
Número de personas	600	Vc	3.5 l
DQO	1600 mg/l	Vt	7 l
SSV	1100 mg/l	TRH	12 h
T	25 °C	Oxígeno requerido	0.038 KgmO ² /h
Q	10 l/día	Potencia	0.701 w

9.2 Estructura del modelo de la PTAR MBBR

Las cámaras se colocaron a diferentes alturas (h) con el fin de aprovechar el efecto de la gravedad para que el flujo del agua pase de una cámara a otra como se muestra en la Figura 5 y en la Figura 6.

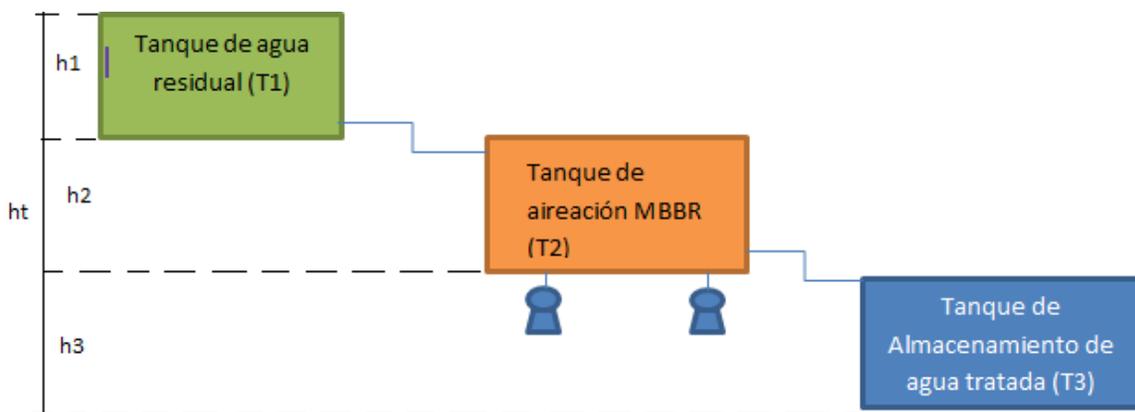


Figura 5. Esquema de alturas de tanques

Al colocar las electroválvulas de ½ pulgada, para el proceso de automatización del sistema, se tuvo que hacer una modificación, ya que estas funcionan con una presión de trabajo mínima de 0.5 Mpa, dando una separación entre cámaras (h1, h2 y h3) de 1.2 metros de altura como podemos observar en la figura 7.



Figura 6. Altura modelo original

Figura 7. Alturas del modelo para presión de electroválvulas

Figura 8. Alturas del modelo final

Para el modelo final, las alturas fueron nuevamente modificadas, debido a que se eliminaron las electroválvulas por problemas en su mal funcionamiento y se observa en la figura 8.

9.3 Construcción de los tanques de la PTAR

Todos los tanques están fabricados de acrílica de 6 mm, de forma rectangular (figuras 9-14), con el fin de observar todo lo que sucede dentro del mismo. Los tanques de grasas y aceites y sedimentador se diseñaron en base al Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento de OAPAS (2020) y el biorreactor con base a las características dadas en el programa creado anteriormente. Todo fue escalado para su reproducción en laboratorio y las dimensiones, en cm, son las siguientes:

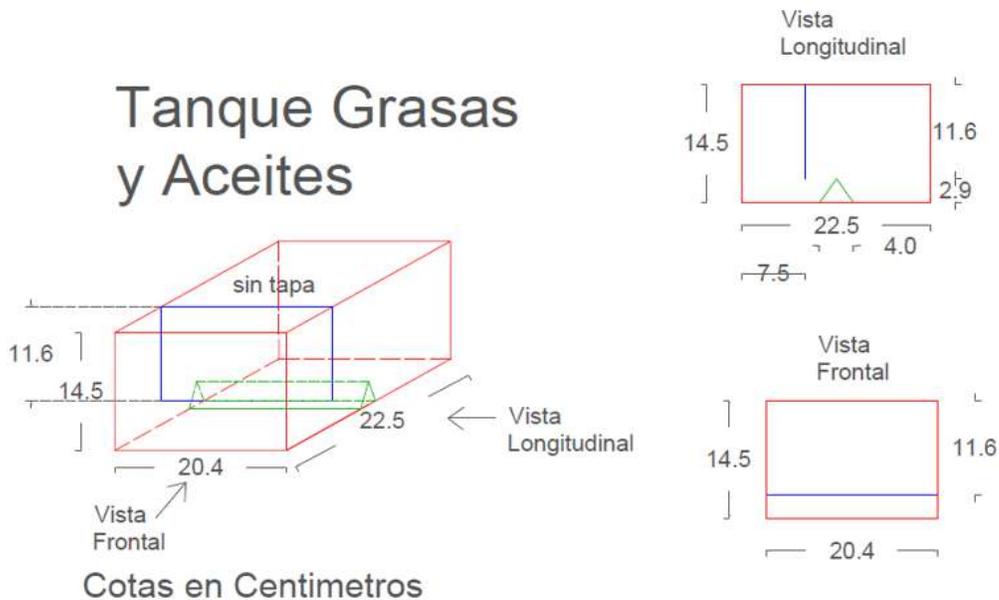


Figura 9. Dimensiones del tanque de grasas y aceites



Figura 10. Dimensiones del biorreactor

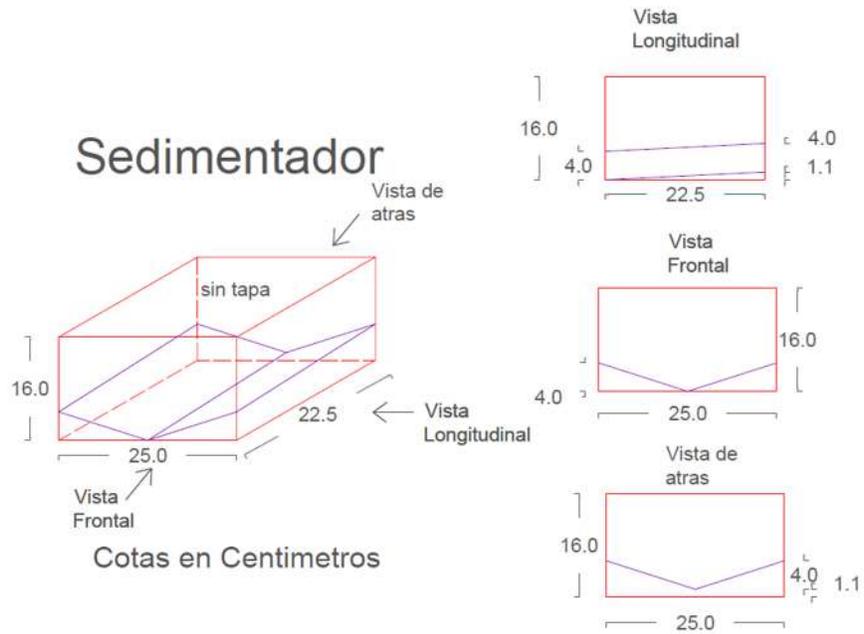


Figura 11. Tanque de separación de grasa y aceites



Figura 13. Tanque de separación de grasa y aceites



Figura 12. Tanque biorreactor



Figura 14. Tanque sedimentador

9.4 Diagrama de funcionamiento del modelo

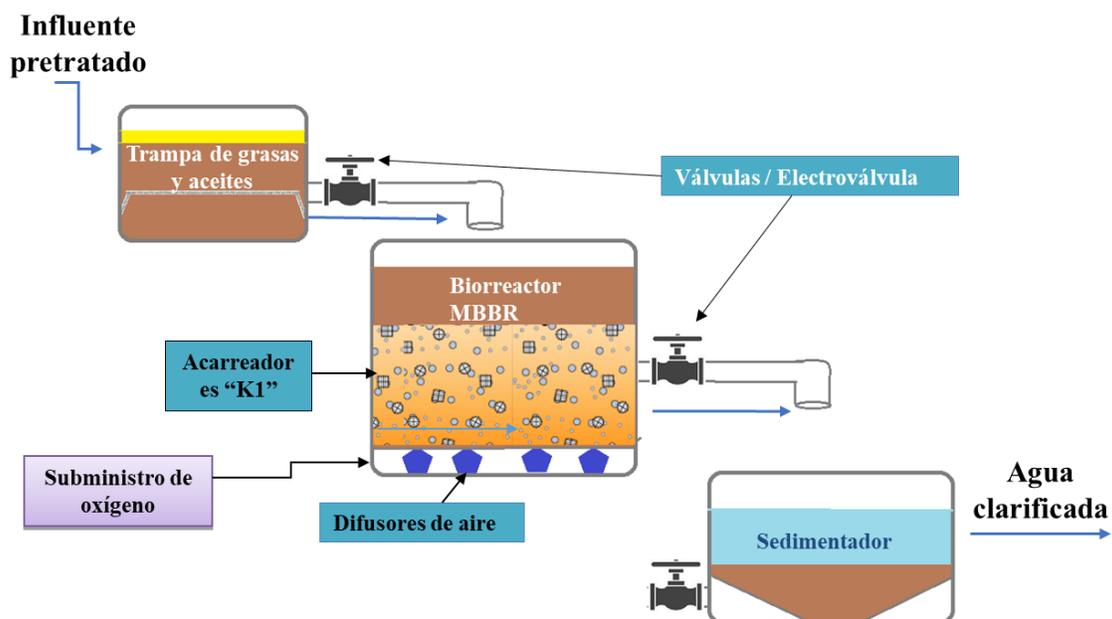


Figura 15. Diagrama de funcionamiento del modelo MBBR

Trampa de grasas y aceites: En este primer tanque ingresa el agua residual con un precolado simple, la separación de las grasas y aceites se lleva a cabo manteniendo el agua estancada durante 1 hora. Consta de un desagua en la parte posterior, para retirar las posibles grasas o aceites que floten. En la parte inferior delantera, se encuentra una válvula/ electroválvula, que una vez concurrido el tiempo de separación se abre para dar paso al agua residual dentro del biorreactor MBBR

Biorreactor MBBR: El agua entra aquí una vez eliminado sólidos mayores a 2mm y posible exceso de grasas y aceites, una vez que el tanque es llenado hasta el límite (donde se encuentra el sensor) empieza el proceso típico de un biorreactor MBBR. El tanque cuenta con 2 bombas o compresores de aire de pesera de 2 w cada una y con 4 barras difusoras, dos laterales de 14 cm y dos intermedias de 12 cm, para subministras el oxígeno y generar movimiento en los acarreadores dentro del tanque. Es importante considerar que los acarreadores deben desplazarse por todo el tanque durante el proceso, por lo cual se tienen que ajustar los difusores para que esto suceda, posterior al proceso también es importante mantener los acarreadores húmedos y con el oxígeno necesario para los microorganismos aerobios dentro de los acarreadores, para ello siempre se deja un poco del agua dentro de

reactor como se muestra en la figura 16. Las bombas se encienden durante el TRH calculado de 10 horas, concluido este tiempo se apagan y se dejan sedimentar el lodo durante 15 min. Finalmente se abre la válvula que se encuentra a la altura necesaria para dejar los acarreadores con el agua suficiente, para dar paso al agua tratada al último tanque, el sedimentador.

Sedimentador: El último paso, es un proceso físico. En este tanque se separan los lodos y solidos que se filtraron del proceso anterior, el agua es descargado del biorreactor y se deja reposar durante 2 horas, tiempo necesario para que sedimenten los lodos y solidos remanentes. Cuenta con una válvula de paso, para extraer los lodos remanentes y el agua tratada es almacenada en frascos de vidrio para llevar a su análisis al laboratorio (figura 17). Hasta aquí termina el proceso microbiológico, posteriormente el agua necesitaría de un postratamiento de desinfección para eliminar los patógenos remanentes, tema que no es abordado en esta investigación.



Figura 16. Tanque MBBR con límite de descarga para mantener los soportes hidratados (fuente propia)



Figura 17. Agua residual tratada, enfrascada para su análisis (fuente propia)

9.5 Toma de agua residual y muestreo

9.5.1 Recolección de agua residual para funcionamiento del modelo

El agua residual que fue tratada y utilizada para el funcionamiento del biorreactor se adquirió del fraccionamiento Latërsi en la tenencia de Jesús del Monte, Michoacán. Fue recolectada y transportada al modelo dentro de la universidad Michoacana, bajo las normas mexicanas de recolección y muestreo para cada tipo de análisis y en base también a la norma NMX-AA-3-1980.

El sitio de muestreo y análisis fue dado por la arquitectura del lugar, donde el agua residual se almacenaba en la parte más baja del fraccionamiento. Debido a problemas presentados en el lugar de análisis, a mitad del proceso, el sitio de muestreo cambio al cárcamo de almacenamiento de agua residual donde se almacena para subirla por medio de bombas a una planta tratadora de agua residual. El sitio presentó parámetros más altos, debido a que cada 2 horas el agua era vaciada del cárcamo y solo quedaba el sedimento que se mezclaba con la nueva agua residual que ingresaba al cárcamo.

Se tomaron muestras en dos horarios diferentes, por la mañana aproximadamente a las 8 am y por la tarde, aproximadamente 7 pm, 2 veces por semana en diferentes días de la semana, con el fin de recolectar al menos 2 muestras en cada horario para cada día de la semana. Se mantuvo la identidad del día de la semana en que se muestreo para reconocer la variación que pudiera surgir el fin de semana. Se llevo a cabo el muestreo aproximadamente durante 2 meses, del día 22 de septiembre al día 29 de noviembre del año 2022.

9.5.2 Puntos de muestreo en el modelo

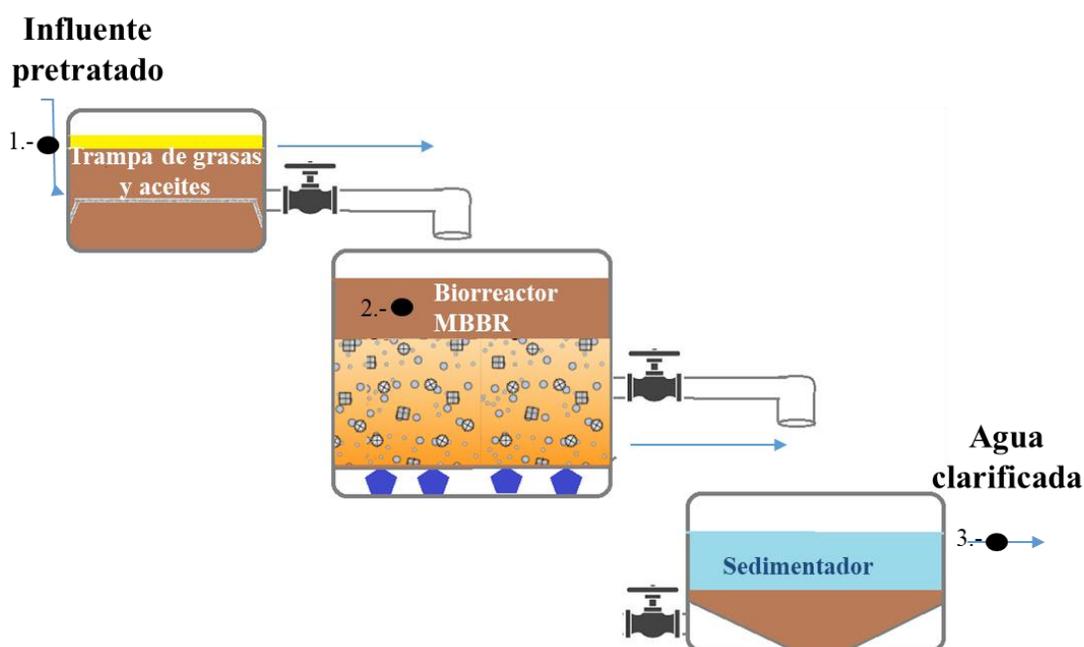


Figura 18. Diagrama de muestreo del modelo

1.- Afluente pretratado: El primer punto de muestro en el sistema es directamente del efluente una vez que ya fue colado de los sólidos más grandes, justo antes de que ingrese a la trampa de grasas y aceites. Este muestreo tiene el fin de dar una caracterización del agua residual, medir las variaciones que presente dependiendo la hora y día en que fue recolectado y hacer una comparativa final con el agua residual trata, para checar el porcentaje de efectividad del tratamiento.

2.- Biorreactor en funcionamiento: El segundo punto de muestreo es dentro del biorreactor, durante el funcionamiento de las bombas con el licor mixto totalmente mezclado. Se tomó muestra justo al terminar el tiempo de retención hidráulica, con el fin de evaluar las características del licor mixto dentro del reactor. También se tomaron las medidas de pH, temperatura y oxígeno disuelto 2 horas después de que las bombas estuvieron apagadas y el reactor estaba en reposo, con el fin de evaluar si había variaciones en la oxigenación que pudieran afectar a la comunidad de microorganismos del licor mixto.

3.Sedimentador: El tercer y último punto de muestreo es en el tanque sedimentador, donde el agua ya está biológicamente tratada, el muestreo se hace 2 horas después de que el efluente entra al tanque, mismo tiempo que es necesario para que el proceso de sedimentación se lleve a cabo. En este punto el agua ya cuenta con las características finales y se evaluó con el fin de caracterizar el agua tratada y compararla con los valores que dictan la norma oficial mexicana NOM-003-ECOL-1997 y NOM-001-SEMARNAT-2021.

Se hizo una comparativa con las características del agua residual cruda y se midieron los porcentajes de reducción de los parámetros grasas y aceites, SST, SSV y DQO, así como el comportamiento del pH y Temperatura antes, durante y después del proceso, bajo las reglas que dictan las normas de caracterización y muestreo para agua residual cruda y tratada, como se muestra en la tabla 10

Cuadro 10. Normas de medición de parámetros

Parámetro	Norma
Grasas y aceites	NMX-AA-005-SCFI-2013
SST	Gravimétrico/nmx-aa-034-scfi-2015
DQO	Digestión-Colorimetría/ NMX-AA-30/1-SCFI-2012
PH	Potenciómetro / NMX-AA-008-SCFI-2016
Oxígeno disuelto (OD)	Volumétrico/NMX-AA-0012-SCFI-2001

9.6 Puesta en operación del biorreactor

Los microorganismos presentes en el biorreactor tienen que adaptarse al medio donde se encuentran y a las características del agua residual a tratar (Jabornig y Favero, 2013). Merz et al. 2007, observaron que en el primer mes de evaluación las bacterias presentes se encuentran en una etapa de adaptación, presentando después una estabilización de los microorganismos en el biorreactor, donde se esperan los resultados más óptimos de eliminación de contaminantes del efluente.

Se arrancó el sistema con el lodo activado de una planta de tratamiento de agua residual doméstica, para el campo de golf del club Tres Marías, Morelia. Los soportes plásticos de la marca kadnlees “K1” se dejaron inoculando con el lodo en cuestión durante 4 semanas en el laboratorio del posgrado de ingeniería civil de la universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (figura 19). Los soportes no presentaron adherencia alguna y estos fueron llevados al tanque de licor mixto de la PTAR de club de golf de Tres María (figura 20) donde se dejaron en contacto con el licor mixto que se creía que contaba las características necesarias (ya que esa información no pudo ser adquirida en el lugar), durante 2 mes.



Figura 19. MBBR con inoculo

Figura 20. PTAR Club de golf Tres Marías (fuente propia)

Después de 2 meses, los soportes presentaban una delgada capa visible de lodo y fueron trasladados, con el cuidado pertinente, a las instalaciones del posgrado de ingeniería química, donde se encontraba el modelo. El modelo se puso en marcha el día martes 13 de septiembre del 2022, donde se dejó en proceso de adaptación, en primera instancia con el licor mixto extraído de la PTAR de “Tres Marías” y posteriormente alimentado cada 12 horas con el agua residual extradía del fraccionamiento “Latërsi”. Después de una semana se recolectaron más muestras del licor mixto en la PTAR “Tres Marías”, se dejó sedimentar por 24 horas, el lodo, como se muestra en la figura 21, se caracterizó ($SSLM= 14,015$ y $SSVLM= 7,755$) y se agregó al reactor en una relación 1/3 (lodo/ agua residual).

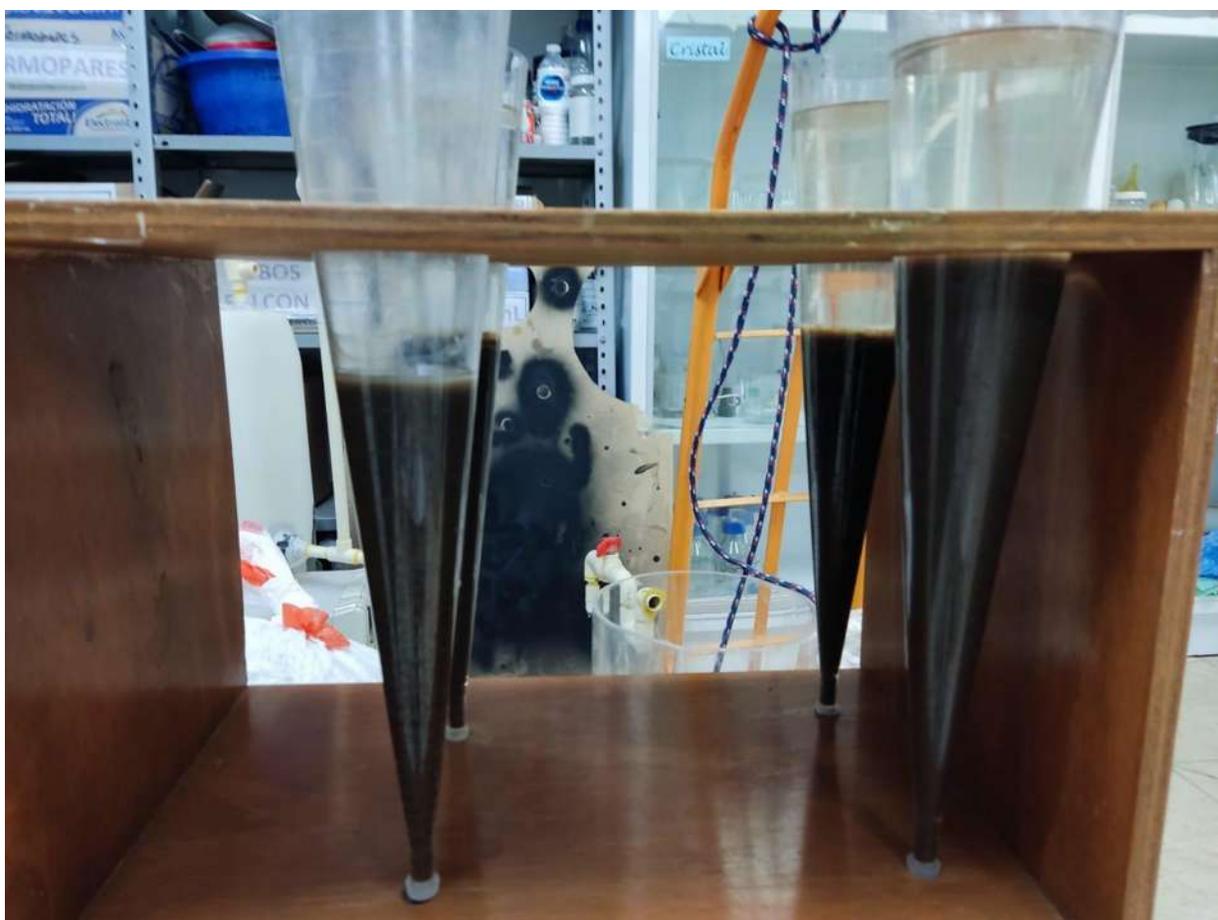


Figura 21. Sedimentación de lodo del licor mixto de la PTAR (fuente propia)

Finalmente, para el día martes 27 de septiembre después de 2 semanas de adaptación de los microorganismos en el reactor, comenzaron los análisis pertinentes. Fue necesario llevar a

cabo una reinoculación y readaptación para el día 18 de octubre del 2022, debido a una falta en el suministro de alimentación al sistema y de un cambio en el lugar de recolección de agua residual. Para el día 24 de octubre se presentaron caracterizas satisfactorias en el agua residual tratada por lo cual se continuo con el análisis y caracterización del modelo.

9.7 Automatización de la planta de tratamiento MBBR

El sistema de suministro de agua doméstica, activación de bombas para aireación y descarga de agua tratada será automatizado con el fin de reducir el consumo eléctrico del trabajo continuo de las bombas. Todo se programó en el programa de software libre “Arduino”. Como muestra la figura 22, se colocaron dos electroválvulas Solenoide de media pulgada normalmente cerrada, una a la salida del tanque de separación de grasas y aceites, con una placa de Arduino que controla únicamente esta válvula y otra a la salida del biorreactor que se controla junto con las bombas por medio de una segunda placa de Arduino. Tanto el tanque de aireación como el tanque de grasas y aceites cuentan con un sensor de nivel de agua, a la altura deseada, para identificar que el tanque este lleno, dando inicio al ciclo del sistema en cada placa de Arduino.

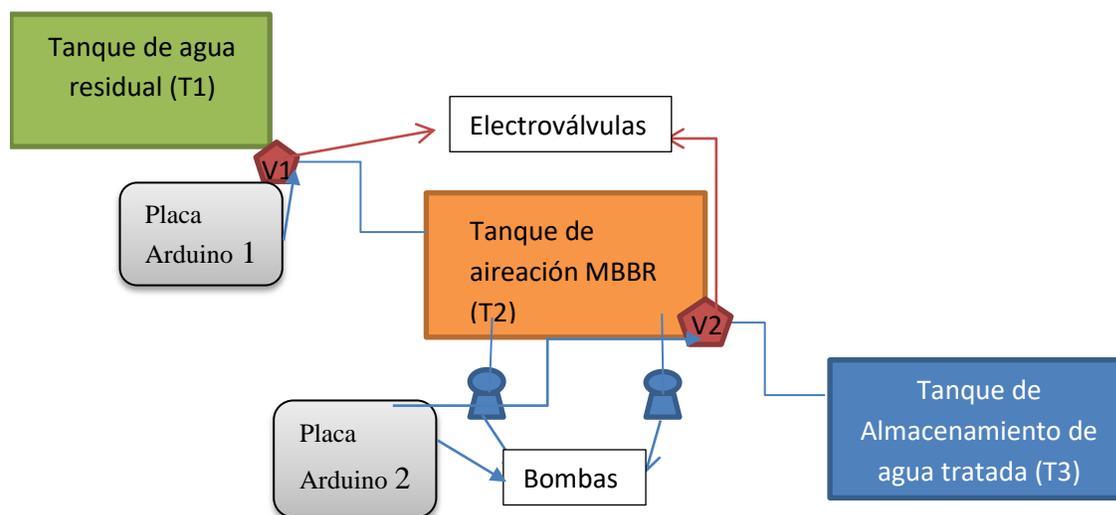


Figura 22. Diagrama de automatización del sistema

9.7.1 Reglas de operación del sistema automatizado.

1.- El agua entra al tanque “T1” con un colado posterior, cuando el tanque llega al nivel máximo, regulado por un sensor de nivel, el programa entrará en modo activo, el agua durará un TRH de 1 hora en reposo donde se separarán grasas y aceites, después de este tiempo la válvula “V1” se abre para verter el agua en el tanque “T2”, la válvula “V1” se cierra después de un tiempo calculado para la descarga.

2. Al llenarse el tanque “T2”, regulado también por un sensor de nivel, se activa el programa cargado en la placa de Arduino 1, lo que dará paso al encendido de las dos bombas de aire, durante el Tiempo de residencia necesario para la completa mineralización de los compuestos orgánicos.

3. Una vez acabado el tiempo de funcionamiento de las bombas en el biorreactor y después de un tiempo de espera para la sedimentación del lodo la válvula “V2” se abrirá para vaciar el agua al tanque de agua tratada “T3”.

4. Al vaciar el agua tratada en el biorreactor del tanque “T2” la válvula “V1” se cerrará y terminará el ciclo. (entre la válvula “V1” y el programa de la placa 2 debe haber un lenguaje para que no se permita abrir la válvula “V1” si el tanque está lleno).

Para la automatización se utilizó el lenguaje del programa Arduino como se muestra en el Anexo 4.

10. Resultados y discusión

10.1 Análisis y caracterización del agua residual doméstica

El efluente para la operación de la planta fue recolectado de dos puntos de muestreos diferentes, dentro del fraccionamiento “Latërsi” y se evaluaron sus parámetros con el fin de caracterizar el agua del lugar y poder desarrollar un tratamiento más adecuado para el lugar. Los resultados del análisis los podemos observar en la tabla 11 y 12. El primer punto de muestreo fue la alcantarilla más baja, donde se acumulaba el agua y se conservaba sus características independientemente de la lluvia o de la hora.

Cuadro 11. Análisis del agua residual cruda en el alcantarillado

Día/ hora de Muestreo	T (°C)	pH	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)	G y A
Lunes 19/sep/22 8:00hrs	19	8.19	1190	443.33	400	0.3136
Lunes 26/sep/22 19:30hrs	22.5	7.24	807	161.66	133.3	-
Jueves 29/sep/22 19:15hrs	21	7.29	869	320	197	-
Lunes 3/oct/22 8:00hrs	22.5	8.30	1079	955	850	-
Jueves 6/oct/22 8:00hrs	20.5	8.20	3070	540	510	0.6730
Domingo 9/oct/22 19:20hrs	19.1	7.44	700	215	190	-
Miércoles 12/oct/22 19:30hrs	22.5	7.53	850	315	275	-

El segundo punto de muestreo fue necesario debido a un cambio en la descarga del agua residual del fraccionamiento, el efluente se adquiría del cárcamo de agua residual del fraccionamiento donde constantemente se descargaban el agua, dejado sedimento y la nueva agua que iba almacenándose. Este segundo punto de muestreo los valores de contaminación eran más altos, debido a la acumulación de sólidos en el lugar, además estaba expuesto a la lluvia, lo pudo haber afectado en la concentración de los sólidos y la materia orgánica

presentes en el agua. En la tabla 12 se muestran las características del cárcamo de agua residual del fraccionamiento.

Cuadro 12. Análisis del agua residual cruda en el cárcamo

Día/ hora de Muestreo	T (°C)	pH	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)	G y A
Domingo 23/oct/22 8:00hrs	21	6.74	1775	955	815	-
Miércoles 26/10/22 8:10hrs	22.2	7.8	3380	5040	4070	-
Sábado 29/oct/22 19:50hrs	23	6.87	2270	5690	4740	0.2349
Martes 1/Nov/22 20:00hrs	20.5	6.87	1190	3485	2875	-
Sábado 5/Nov/22 8:00hrs	21	7.16	1010	785	700	-
Martes 8/Nov/22 8:00hrs	21	7.15	1960	1540	1360	-
Viernes 18/Nov/22 8:00hrs	22.5	7.85	1450	1420	1195	0.6675
Viernes 25/Nov/22 20:00hrs	19	6.82	700	260	230	0.7723

10.1.1 Parámetros fisicoquímicos en el afluente

La temperatura se vio afectada por el clima y la hora del muestreo, sin embargo, la variación no fue significativa y está dentro de la temperatura adecuada para la reproducción y supervivencia de los microorganismos aerobios dentro del proceso de lodos activados. Los valores óptimos para plantas de tratamiento de lodos activados son de 20 a 35 °C según Arcos (2013); los valores del afluente son de 19 a 23°C.

Los valores para pH encontrados en el agua residual muestreada, tanto para la alcantarilla como para el cárcamo se mantuvieron entre 6.8 y 8.3. Torrescano (2009), sugiere que los valores óptimos para una PTAR de lodos activados esta entre los 6.5 y 8.5, por lo tanto, el pH se mantuvo dentro los rangos necesarios para un correcto funcionamiento del biorreactor

Las grasas y aceites se evaluaron con mucho menor frecuencia que los demás parámetros, esto debido a que en cada ocasión siempre se encontraron valores por debajo de los estipulados en las normas NOM-003-ECOL-1997 y NOM-001-SEMARNAT-2021, incluso podríamos decir que para el tipo de agua a tratar el proceso de separación de grasas y aceites no era necesario. Los valores encontrados para grasas y aceites en el agua residual cruda se encontraron entre 0.235 y 0.772 mg/l.

Los SST y SSV sufrieron cambios significativos al cambiar el punto de muestreo, ya que la sedimentación y la concentración de los mismos, aumentó en el cárcamo, debido a la descarga constante del agua. Sin considerar las variaciones por el cambio del punto de muestreo los valores totales valores para SST fueron: máx. 5690 mg/l, min. 161.66 mg/l (μ 421.4, σ 101.3) y para SSV: máx. 4743mg/l, min. 133.3 mg/l (μ 365, σ 1.94.9).24.

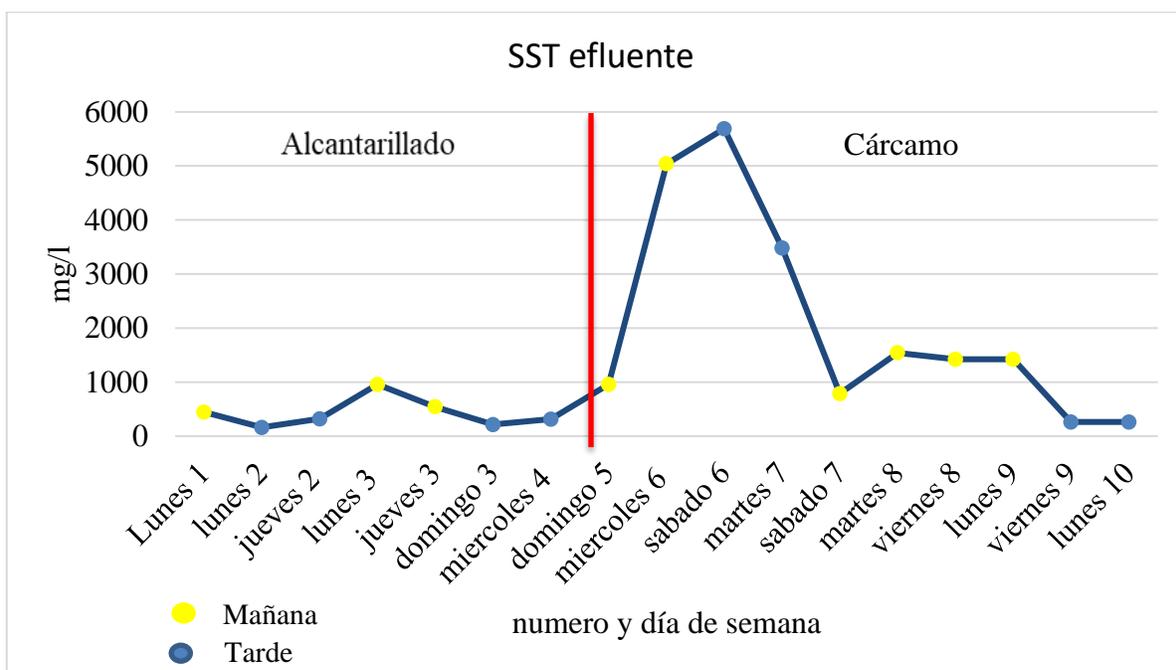


Figura 23. Gráfica de sólidos totales presentes en el agua residual

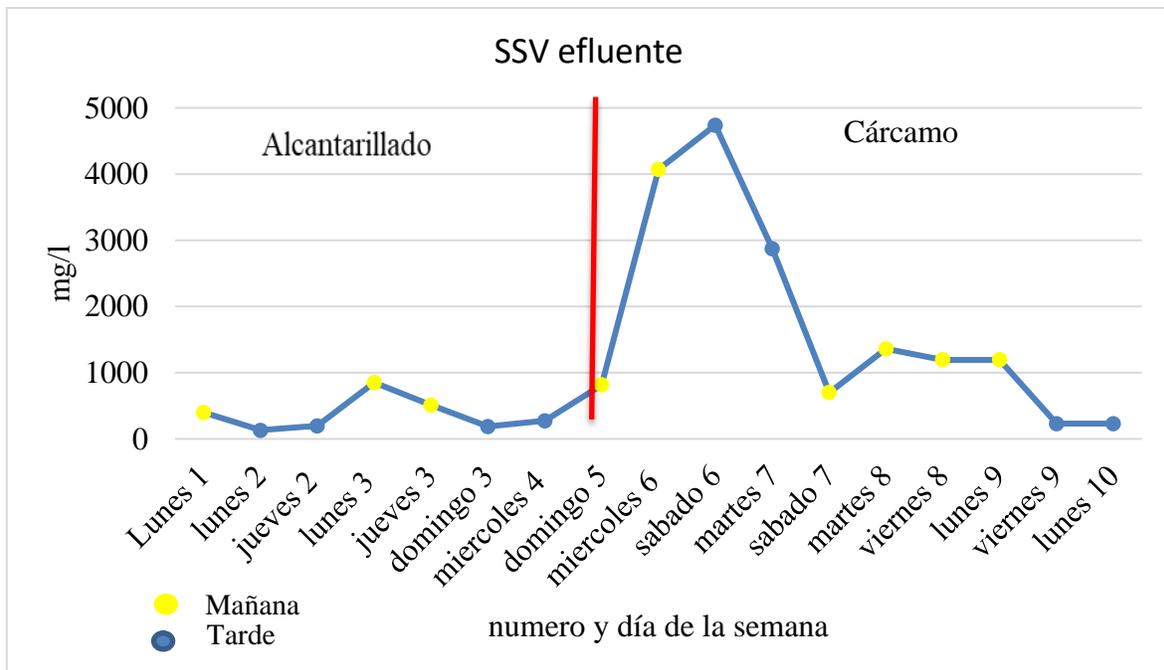


Figura 24. Gráfica de solidos volátiles presentes el agua residual cruda

10.1.2 Materia orgánica presente en el afluente

La materia orgánica fue únicamente medida con los valores de DQO para agua residual y tratada, debido a la factibilidad en tiempo para su análisis, por medio de la digestión y la colorimetría. La DQO engloba los valores de la DBO y puede establecerse una relación entre ambas (Standard Methods Committee of the American Public Health Association, 1992). De igual manera el parámetro para materia orgánica que exige la norma NOM-001-SEMARNAT-2021 es la DQO.

Al igual que con los SST y SSV podemos observar un aumento en el valor de la DQO al cambiar del alcantarillado al cárcamo de agua residual, aunque, no fue tanta la variación como en el caso de los sólidos. los valores para DQO del agua residual del fraccionamiento fueron: máx. 3380 mg/l, min. 700 mg/l (μ 1448.23, σ 200).

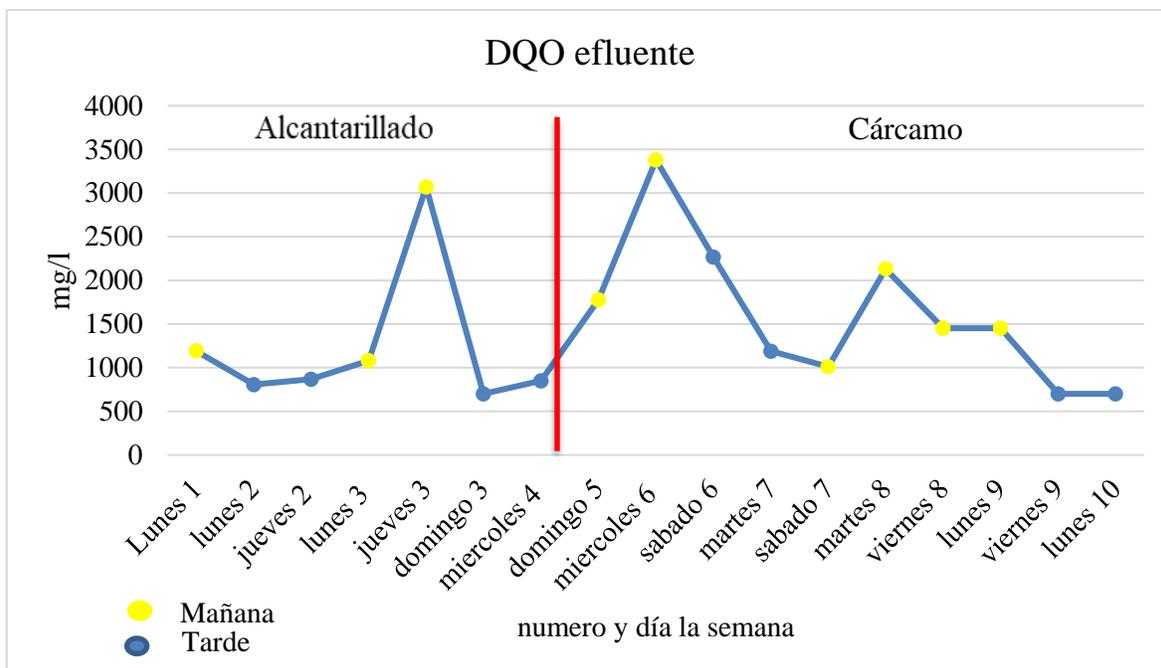


Figura 25. Gráfica de materia orgánica representada como DQO en el agua residual cruda

10.1.3 Caracterización de agua residual

Con los análisis echo al agua residual del fraccionamiento “Latërsi” se caracterizó para poder hacer los ajustes necesarios en el programa creado anteriormente. Los resultados se muestran a continuación:

Cuadro 13. Caracterización de agua residual del fraccionamiento “Latërsi”

Parámetro	Promedio
pH	6.8-8.3
DQO	1448.23±200
Grasas y aceites	0.5322
SST	1400±412.7
SSV	1174.4±338.3

Los parámetros DQO y SST encontrados en el agua residual doméstica, y principalmente los valores muestreados del cárcamo de agua residual, se encuentran dentro de los valores para aguas altamente contaminados con valores mayores a 1000mg/l (Metcalf y Eddy Inc. 2000). Esto quizá debido a la acumulación de sólidos y basura dentro de los puntos de muestreo. El alcantarillado presento esta acumulación debido a problemas en su descarga (Figura 26). El cárcamo, contaba con un tamiz para la reducción de solidos antes de la descarga a la planta de tratamiento, lo que daba como resultado la concentración de los sólidos dentro del mismo.



Figura 26. Alcantarillado con solidos acumulados

10.2 Análisis del biorreactor MBBR

Se tomaron muestras de dentro del tanque MBBR en las mismas fechas que las muestras del agua residual cruda y tratada, con el fin de brindar información de cómo se comportaba el biorreactor. Se tomaron 2 muestras por día, uno justo después de que transcurrió el tiempo de residencia hidráulica del proceso MBBR, donde se evaluaron parámetros fisicoquímicos de

temperatura, pH, SSLM y SSVLM y otra 2 horas después de que las bombas estuvieran apagadas como parte del proceso, donde se tomaron lecturas de pH, temperatura y OD, esta última importante para evaluar si transcurrido el tiempo de reposo del biorreactor la oxigenación era la adecuada para la supervivencia y desarrollo de los microorganismos aerobios. Torrescano (2009), menciona que concentraciones de oxígeno disuelto menores de 2 mg/l están relacionados con el crecimiento excesivo de bacterias filamentosas y flóculos abiertos por lo que se presenta una baja sedimentabilidad.

El pH durante todo el proceso se comportó de una manera estable, esto se muestra en la figura 27 donde los valores se mantuvieron entre 6.31 y 7.8 que son valores óptimos para el correcto funcionamiento de biorreactor. Como podemos observar en la figura 27, el pH se fue estabilizando hacia el valor de 7 conforme el tiempo de residencia celular aumentaba.

Al igual la temperatura se mantuvo estable dentro de los valores pertinentes para un correcto desarrollo de los microorganismos aerobios dentro del biorreactor, su valor mínimo fue de 18 grados centígrados durante la mañana y su valor máximo se encontró en la tarde con un valor de 23.9 grados centígrados. La figura 28 nos muestra que la temperatura fue disminuyendo conforme iba entrando la temporada de frío en Morelia (Hesse et al., 2010), lo cual nos dice que al igual que el agua residual la temperatura del reactor varía dependiendo las condiciones climáticas del espacio donde se encuentre.

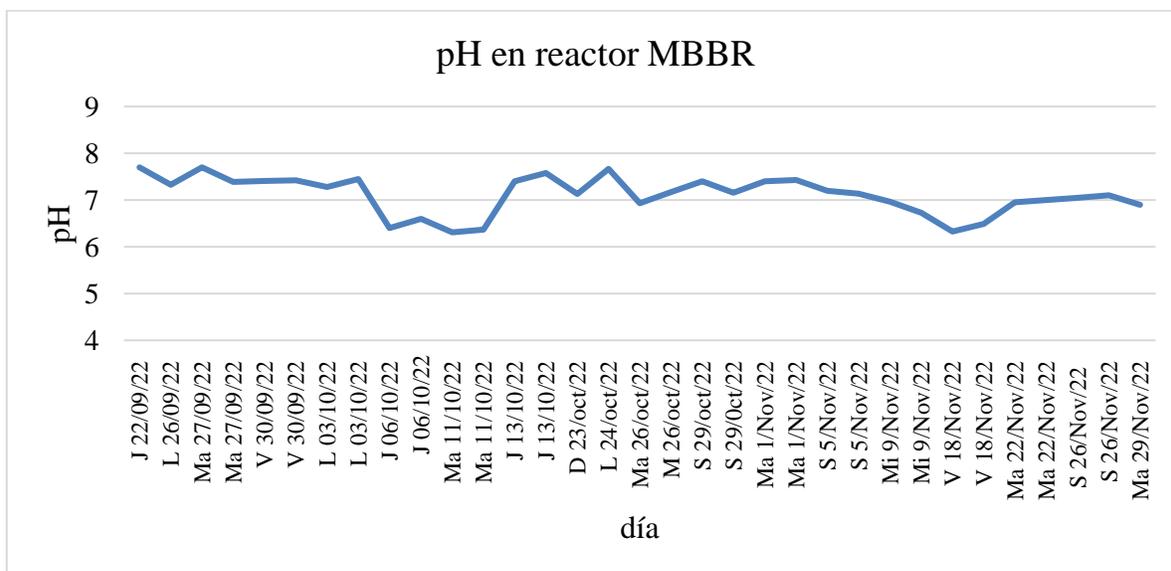


Figura 27. Gráfica de pH vs Tiempo de residencia celular del reactor

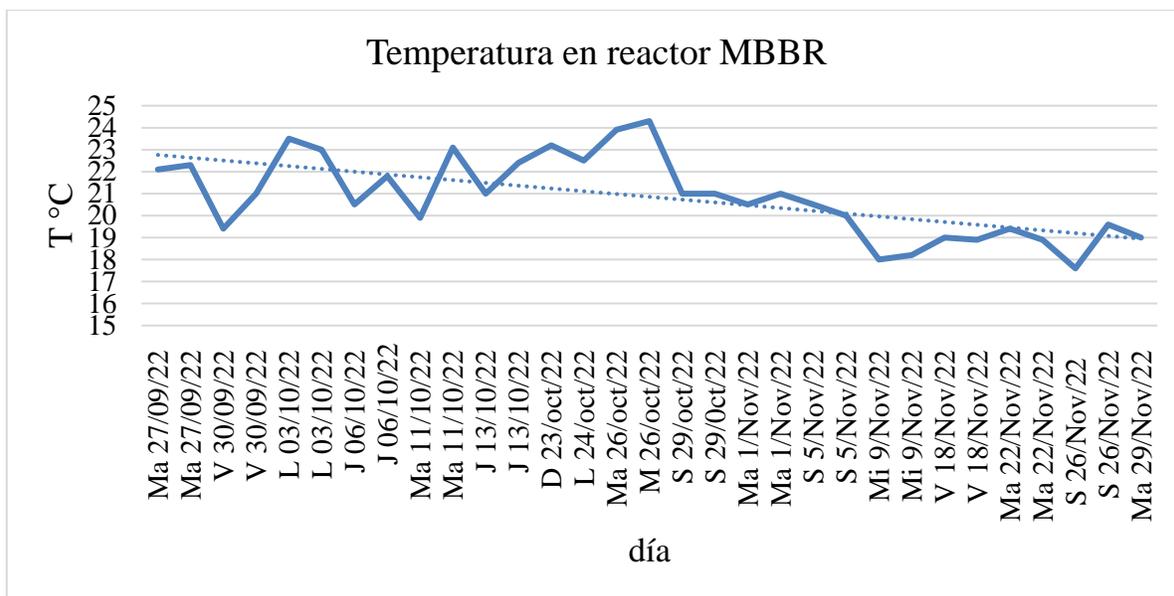


Figura 28. Gráfica de Temperatura vs Tiempo de residencia celular del reactor

Con los valores calculados de SSLVM y los mg/l de la alimentación (expresado en DQO) se calculó la relación F/M acorde a la ecuación establecida por Torrescoano 2009, donde los rangos típicos para un proceso convencional de lodos activados son: 0.15 - 0.7 Kg. DQO / Kg SSVLM y 0.1 - 0.5 Kg DBO / Kg SSVLM en el aireador. La figura 29 nos muestra como conforme al aumento en el tiempo de residencia celular en el reactor tiende hacia una estabilización de la relación F/M a un valor promedio de 0.5, adecuado para reactores aerobios. Incluso desde la segunda semana de arranque los valores de la relación F/M se encontraban dentro de los rangos aceptados según Torrescoano 2009, a excepción de los días 6 y 26 de octubre, que tiene valores de 2.1 y 1.13 respectivamente y son los días en que el afluente presenta cargas muy elevadas de DQO y lo podemos observar en la tabla 14, el aumento drástico en la calidad del afluente afectó la relación de la alimentación y los microorganismos.

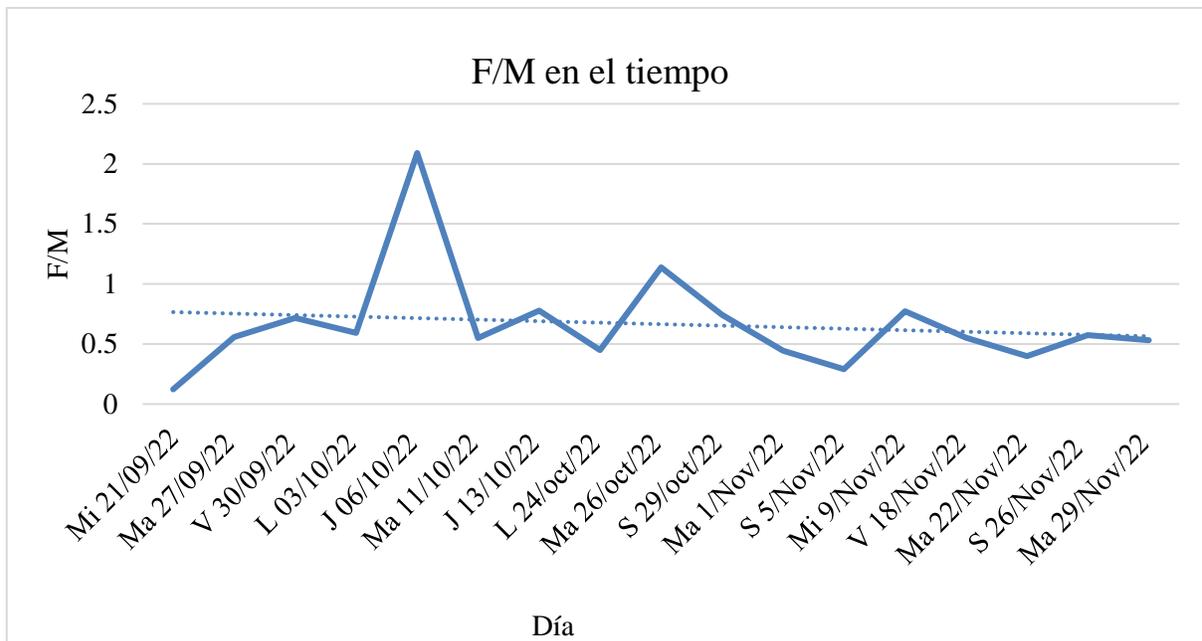


Figura 29. Gráfica de relación F/M vs tiempo de residencia celular del reactor

En la figura 30, se muestra los parámetros de SSLM y SSLVM dentro de reactor MBBR y los parámetros SST y DQO del afluente, tanto del alcantarillado como del cárcamo. De la gráfica podemos observar que antes de que el reactor se quedara sin alimento por 3 días y se cambiara el lugar donde se recolectaba el agua residual, los SSLM y SSLVM de reactor tenían un comportamiento similar a la de los SST de afluente independientemente de los picos en la DQO de agua residual. Después del cambio del lugar de adquisición del agua residual, se vino una desestabilización y un aumento en los valores de lo SSLM y SSLVM en el reactor, debido a la readaptación del reactor y al aumento en los valores de la calidad del agua residual. Sin embargo, a partir del día 5 de noviembre del 2022 se encontró de nuevo una estabilidad entre los parámetros del afluente y las características del reactor.

De ello, podemos considerar que una vez estabilizado el sistema los valores de los SSLM y SSLVM variaron en función a las características del agua residual, principalmente a los parámetros de los SST, DQO y DBO, a mayor concentración de materia orgánica y solidos suspendidos en el agua residual, mayores fueron los sólidos suspendidos y la cantidad de microorganismos en el licor mixto.

Cuadro 14. Caracterización del lodo en el reactor MBBR

Fecha	pH	T° (°C)	SSLM (mg/l)	SSVLM (mg/l)	F/M	DQO (mg/l) en afluente
Mi 21/09/22	Se agregó lodo (1/3)		14,015	7,755	0.12275951	1190
Ma 27/09/22	7.7	22.1	1,695	1,155	0.55896104	807
V 30/09/22	7.41	19.4	1,285	970	0.71670103	869
L 03/10/22	7.28	23.5	2,000	1,455	0.5932646	1079
J 06/10/22	6.4	20.5	1,450	1,175	2.09021277	3070
Ma 11/10/22	6.31	19.9	1,270	1,020	0.54901961	700
J 13/10/22	7.4	21	1,065	875	0.77714286	850
L 24/10/22	7.67	22.5	4,020	3,160	0.44936709	1775
Ma 26/10/22	6.93	23.9	2,875	2,375	1.13852632	3380
S 29/10/22	7.4	21	2,925	2,440	0.7442623	2270
Ma 1/11/22	7.4	20.5	2,635	2,145	0.44382284	1190
S 5/11/22	7.2	20.5	3,472	2,780	0.29064748	1010
Mi 9/11/22	6.97	18	2,530	2,030	0.77241379	1960
V 18/Nov/22	6.33	19	2,884	2,095	0.55369928	1450
Ma 22/Nov/22	6.95	19.4	3,000	1,400	0.4	700
S 26/Nov/22	7.05	17.6	2,380	2,020	0.57425743	1450
Ma 29/Nov/22	6.9	19	2,620	2,180	0.53211009	1450

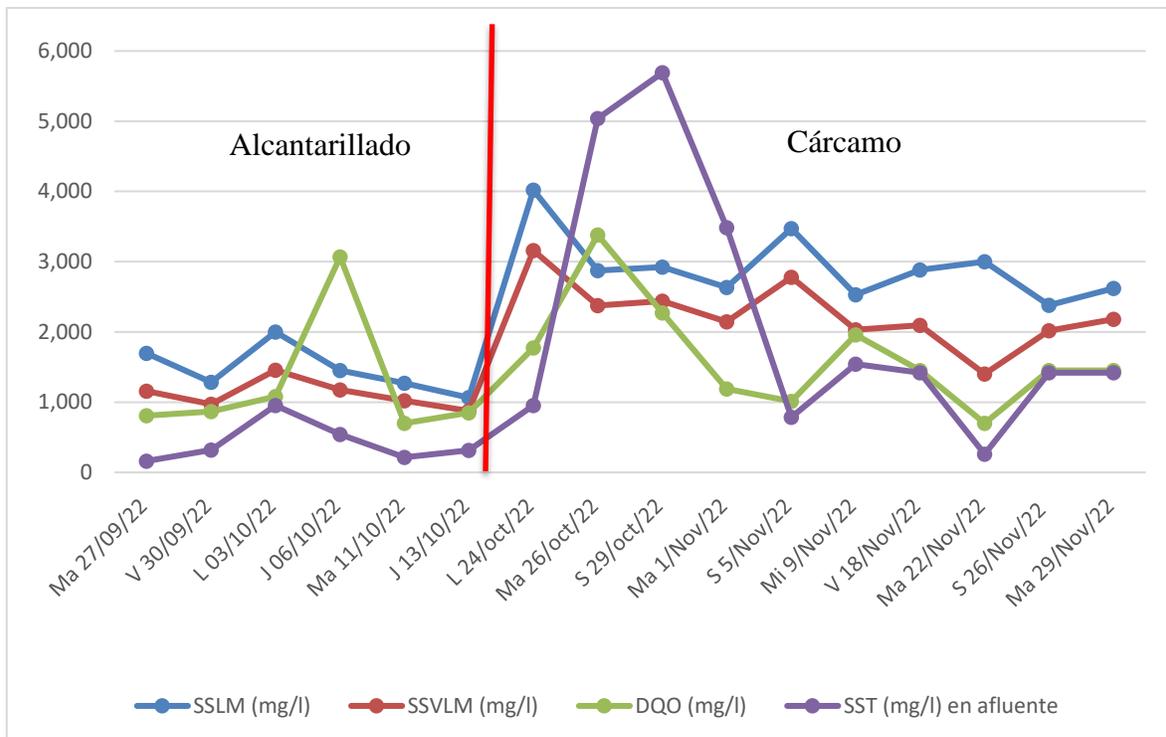


Figura 30. Análisis de interacción de SSLM, SSVLM, DQO del afluente y SST en el afluente

10.2.1 Oxígeno disuelto (OD) en reposo

Se tomaron medidas del oxígeno disuelto en el reactor con el medidor de oxígeno disuelto HI9146 de la marca Hanna, que fue calibrado en laboratorio. El biorreactor trabajaba con las bombas encendidas durante 10 horas, seguido de un descanso de la aireación de 2 horas, en este momento se tomaba la muestra y se media la cantidad de ppm de OD presentes en el reactor. Gracias al análisis pudimos observar que el oxígeno en el tanque MBBR, incluso después de mantenerse en reposo, siempre se mantuvo entre valores de 4.2 y 3 PPM con una media 3.67, lo cual entra dentro de lo recomendado para el correcto funcionamiento de un biorreactor de lodos activados según Torrescano (2009).

La figura 31 muestra el comportamiento del OD a través del tiempo, y aun que en todo momento su valor fue mayor a 3 ppm, la línea de tendencia parece indicar que el OD va en descenso con el aumento del tiempo de residencia celular del lodo. Sería necesario continuar con el análisis de OD en el tiempo de reposo del biorreactor, para hablar con certeza si esto es verdad, si el OD se estabilizaría en un valor óptimo o si fue algún problema en la lectura.

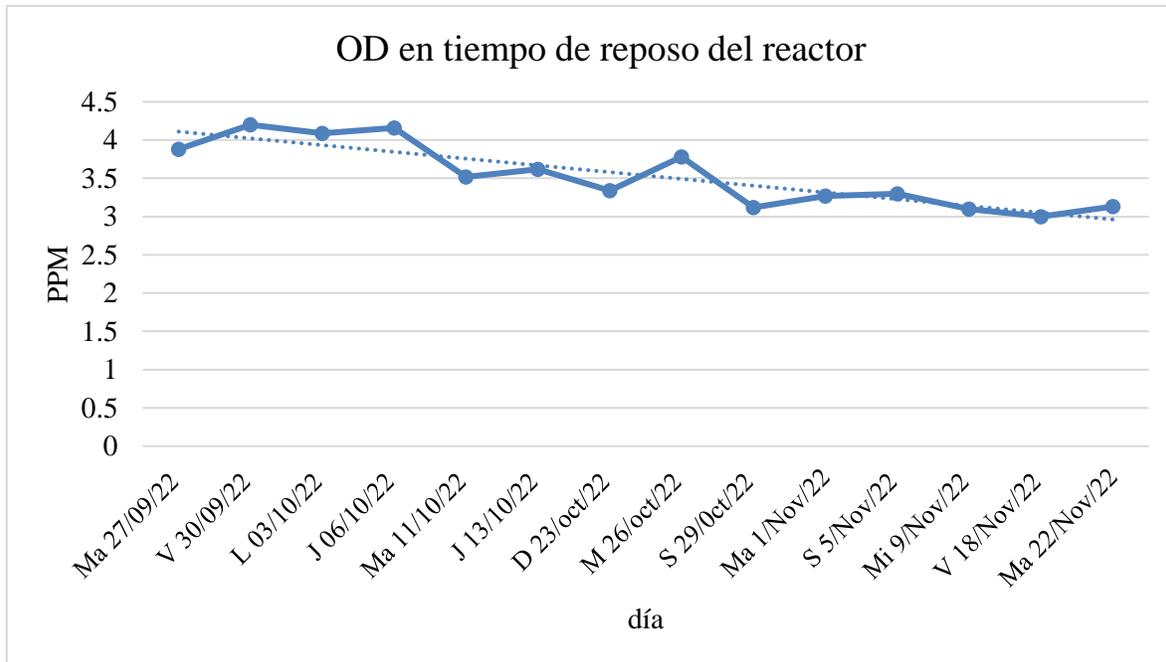


Figura 31. Gráfica de oxígeno disuelto tras 2 horas de reposos en el reactor vs TRC

Las características que presento el biorreactor en todo momento fueron satisfactorias, como se esperaba, conforme avanzaba el TRC aumentaba la estabilidad y mejoraban las características del mismo. El biorreactor presentó características adecuadas para tratamientos biológicos de lodos activados según Torrescano (2009) como lo es una relación F/M de 0.5, pH entre 6 y 9 y temperaturas entre 20 y 35 grados centígrados.

10.3 Análisis y caracterización del agua residual tratada

Finalmente, se hizo la caracterización del efluente o agua residual tratada biológicamente, es importante considerar que el sistema de estudio es únicamente el proceso biológico y después de este se requiere un proceso de desinfección para eliminar cualquier microorganismo patógeno que quede presente en el agua residual. La tabla 15 muestra los resultados del análisis del agua después del proceso de tratamiento biológico.

Cuadro 15. Análisis de agua residual doméstica

Día/ hora de Muestreo	T (°C)	pH	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)	G y A
Martes 20/sep/22 12:00 hrs	23	7.8	123	15	15	0.2664
Martes 27/sep/22 9:00hrs	22	7.33	86	30	21	-
Viernes 30/sep/22 10:00hrs	20	7.63	60	16	15	-
Lunes 3/oct/22 21:00hrs	23	7.25	78	14	14	-
Jueves 6/oct/22 21:00hrs	21.2	6.34	90	30	30	0.5230
Domingo 9/oct/22 19:20hrs	19.5	6.37	110	40	35	-
Jueves13/oct/22 9:30hrs	21.8	7.40	75.5	23.75	21.25	-
Domingo 16/oct/22	Biorreactor 3 días sin alimentación con aireación intermitente (por problemas en la obtención de las muestras)					
Lunes 17/oct/22						
Martes 18/oct/22						
Domingo 23/oct/22 21:00hrs	18.4	7.02	53	21	19	-
Mi-S 26-29/oct/22 21:30hrs	24	6.81	57	28	25	-
Lunes 31/oct/22 10:00hrs	20	7.14	95	23.5	14	0.2219
Jueves 3/Nov/22 9:00hrs	21	7.61	212	11	11	-
Domingo 6/Nov/22 9:00hrs	20	7.33	130	22	22	-
Martes 8/Nov/22 19:00 hrs	21.5	7.22	75	12	11	-
Viernes 18/Nov/22 21:00hrs	19.9	6.9	79	16.25	10	0.6251
Martes 22/Nov/22 9:00hrs	16.9	7.23	40	11	9	-
Sábado 26/Nov/22 9:00hrs	17.9	7.07	83	15	15	0.6544
Ma 29/Nov/22 9:00hrs	19.4	7	80	10	10	-

10.3.1 Parámetros fisicoquímicos del efluente

La temperatura del agua tratada vario entres los rangos de 16.9 °C y los 24°C, el límite máximo permisible para su uso en áreas verdes, infiltración y otros riegos de la norma NOM-001-SEMARNAT-2021 para la temperatura es de 35°C, por lo que en todo momento el agua residual tratada cumplió con esta característica.

Para el pH los limites permisibles de la misma norma se encuentran entre los 6 y 9. En la tabla 15 podemos ver que el valor máximo de pH para el agua tratada fue de 7.8 y el valor mínimo de la misma fue de 6.8, de tal manera, que también entra dentro de los valores aceptados para su uso en riego o descargar a mantos acuíferos.

Para las grasas y aceite el límite máximo permisible para riego según la norma NOM-001-SEMARNAT-2021 y para servicio al público con contacto directo o indirecto según la norma NOM-003-ECOL-1997 es de 15 mg/l. En la tabla 10 podemos observar que los valores para grasas y aceites en los días que se midieron son menores a la unidad (>1 mg/l) por lo tanto, y desde antes del tratamiento, el agua residual cumple con esta característica.

El valor máximo encontrado para los SST fue de 40 mg/l y para los SSV de 35 mg/l. El límite máximo permisible para riego y servicio al público en contacto indirecto u ocasional para SST es de 30 mg/l y para servicio con contacto directo al público de 20 mg/l, esto quiere decir, que al menos uno de los valores de SST no se encuentra dentro de los limites permisibles de las normas señaladas anteriormente. Sin embargo, los valores para SST fueron: máx. 40 mg/l, min. 10 mg/l (μ 19.9, σ 2) y para SSV: máx. 35mg/l, min. 9mg/l (μ 17.46, σ 1.79). Las figuras 32 y 33 muestran la gráfica del comportamiento de los sólidos respecto al tiempo en el reactor, nos revela un comportamiento similar entre SST y SSV biorreactor. La figura 31 muestra que solo en 3 ocasiones el agua tratada supera los límites permisibles, sin embargo, la tendencia que se observa tanto para SST y SSV es hacia la disminución de los mg/l de solidos presente en el agua tratada conforme el TRC aumenta en el biorreactor.

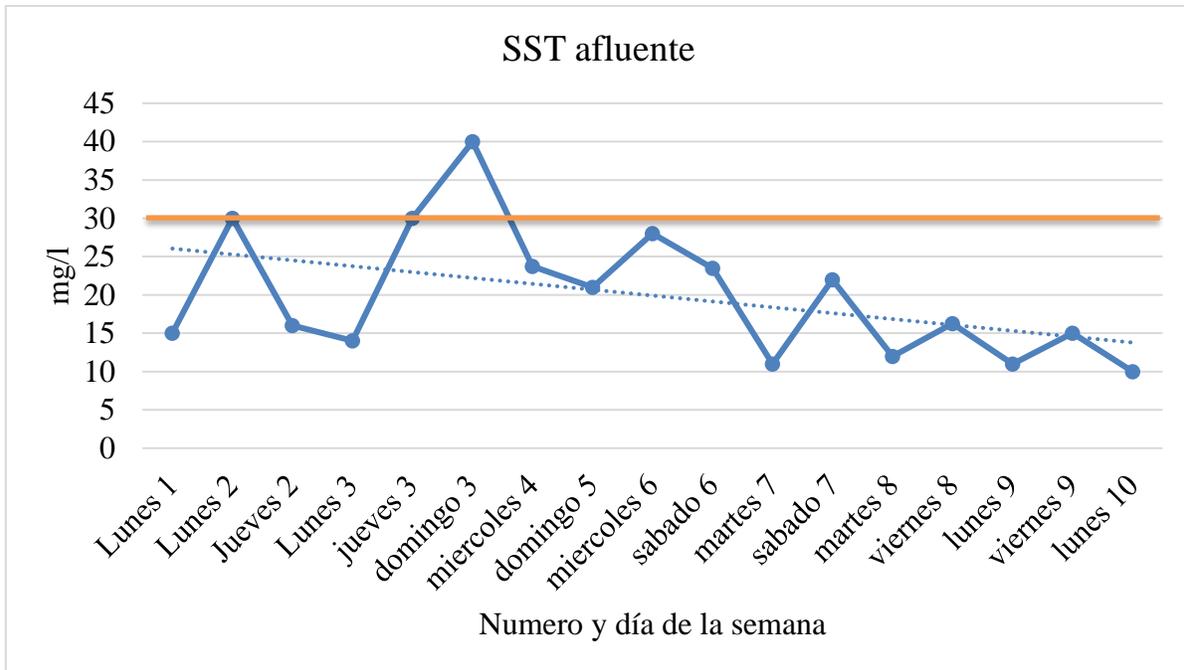


Figura 32. Gráfica de SST vs TRC en agua tratada

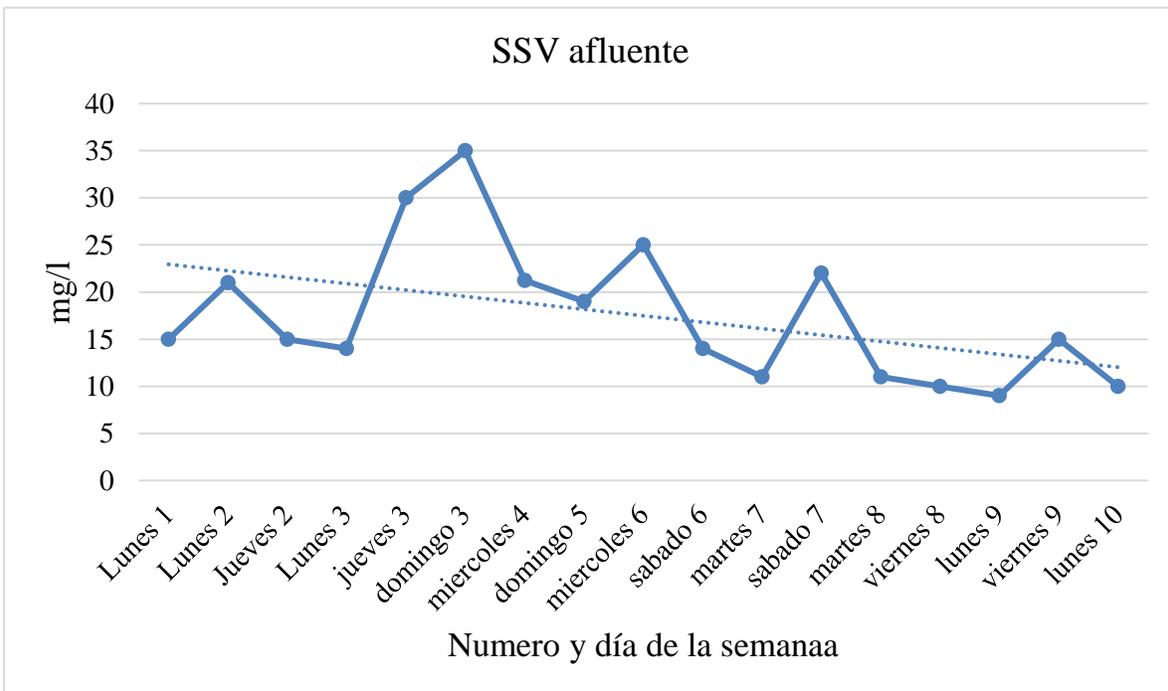


Figura 33. Gráfica de SSV vs TRC en agua tratada

10.3.2 Materia orgánica presente en el efluente

Al igual que con el agua residual, la materia orgánica presente en el agua tratada se midió con el parámetro DQO. El límite permisible de DQO según la norma NOM-001-SEMARNAT-2021 riego y otros usos en el suelo, es de 60 mg/l, la tabla 15 nos muestra un valor máximo de 212 y un valor mínimo de 40 mg/l, lo cual nos muestra que aun que la calidad de afluente es buena, hay rangos de valores que aún no cumple con las normativas para su reutilización. los valores para DQO del agua residual del fraccionamiento fueron: máx. 3380 mg/l, min. 700 mg/l ($\mu 90.55$, $\sigma 39$) lo que indica que se encuentra fuera del límite permisible. Esto quizá a los altos valores del parámetro en el agua residual cruda ($\mu 1448.22$, $\sigma 200$ mg/l), encontrándose dentro de los valores de agua altamente contaminada (>1000 mg/l) según Metcalf y Eddy Inc. (2000). Se observa en la figura 34 que al igual que los SST la línea de tendencia indica una disminución de la DQO respecto al aumento en el tiempo de residencia celular del biorreactor.

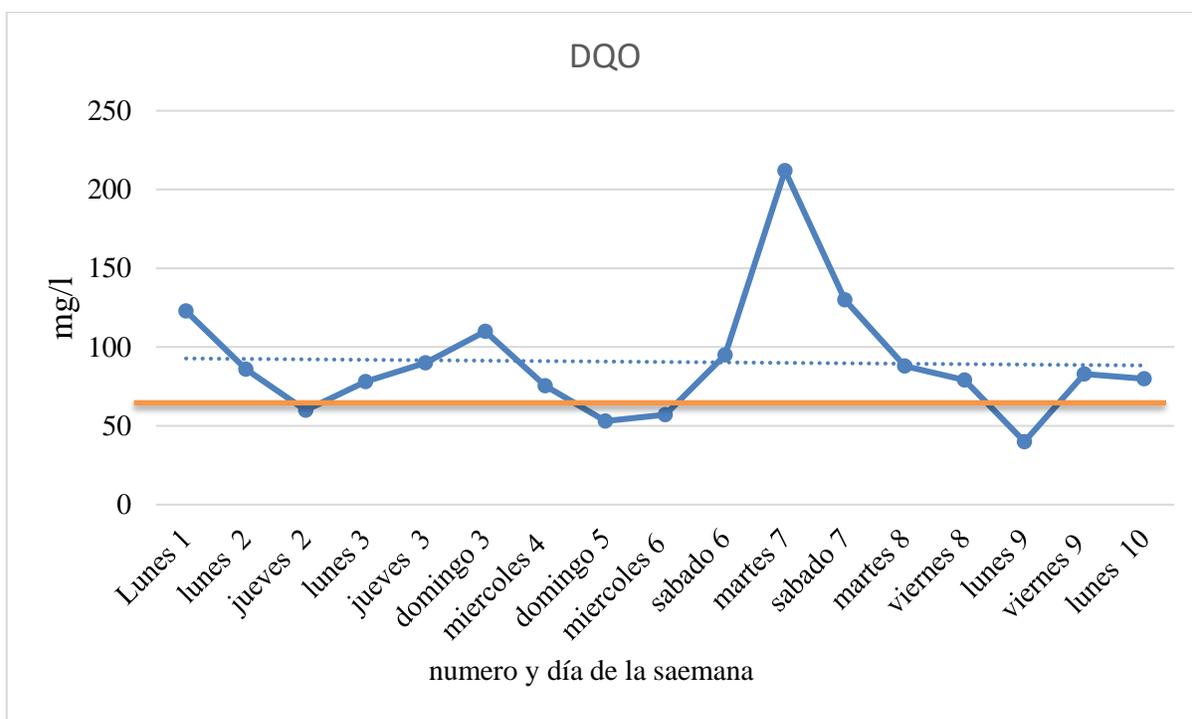


Figura 34. Gráfica de DQO vs TRC en agua tratada

10.3.3 Caracterización del agua residual tratada

Con los datos recopilados se hizo una caracterización del agua residual tratada durante todo el periodo y se comparó con los valores máximos permisibles según las normas y sus usos, que podemos observar en la tabla 16.

Cuadro 16. Caracterización de agua tratada y valores máximos permisibles

Parámetro	Promedio	Riego	Uso con contacto indirecto	Uso con contacto directo
pH	7.14	6-9	-	-
DQO (mg/l)	90.55±39	60	-	-
DBO	-	-	30	20
Grasas y aceites (mg/l)	0.4582	15	15	15
SST (mg/l)	19.9 ± 2	30	30	20
SSV (mg/l)	17.46±1.79	-	-	-

10.3.4 Análisis del tratamiento del agua residual doméstica

Es importante mencionar antes de analizar los valores cuantitativos, que se observaron físicamente cambios cualitativos en el agua residual tratada, se puede observar en la figura 35 que el agua residual trata tiene una transparencia muy superior a como ingreso al sistema, además de que el proceso elimino en un 100% el desagradable olor característico de las aguas residuales domésticas.

Se analizaron y compararon los valores cuantitativos del efluente con los valores del afluente. La temperatura y su comparación entre los valores del efluente vs el afluente a través del tiempo en el reactor se muestra en la figura 36, donde se observa que la variación de la temperatura fluctúa independientemente del proceso de clarificación del agua y que parece estar ligado a al cambio en la temperatura del ambiente (como se mencionó en el análisis del biorreactor).



Figura 35. Muestras de agua residual cruda, tratada y lodo del proceso de clarificación (fuente propia)

La figura 37 nos muestra los valores del pH a la entrada y salida del reactor. Al igual que con la temperatura, la variación del pH en el agua tratada parece no tener una relación directa con el pH de alimentación del reactor, sin embargo, se observa que con el aumento del TRC en el reactor tiende a estabilizarse en valores a 7.

Las figuras 38 y 39 nos muestran la comparativa y comportamiento de los parámetros DQO y SST en mg/l respectivamente, conforme al aumento del TRC del biorreactor MBBR.

En la figura 38 se nota que la disminución o eliminación de la DQO no depende de los valores iniciales de DQO del agua residual cruda, se puede observar que en los días en el que los valores de la DQO en el efluente fue el mayor, la DQO en el afluente no presento los valores más altos y que incluso en días donde la DQO era más baja se presentaron los valores más altos de DQO para el agua tratada. EL porcentaje de eliminación de DQO vario durante todo

el proceso, pero se mantuvo entre los 82% y 98%. En la tabla 17 observamos que el porcentaje de eliminación tiende a aumentar en paralelo del TRC.

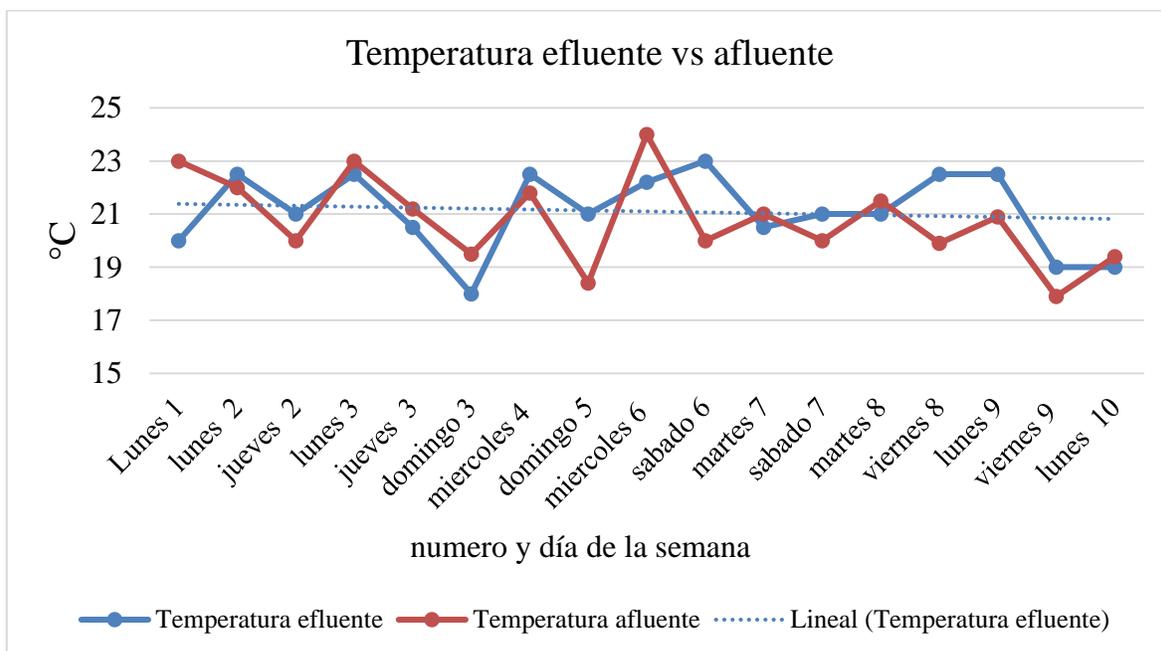


Figura 36. Gráfica temperatura vs TRC en el afluente y efluente del biorreactor

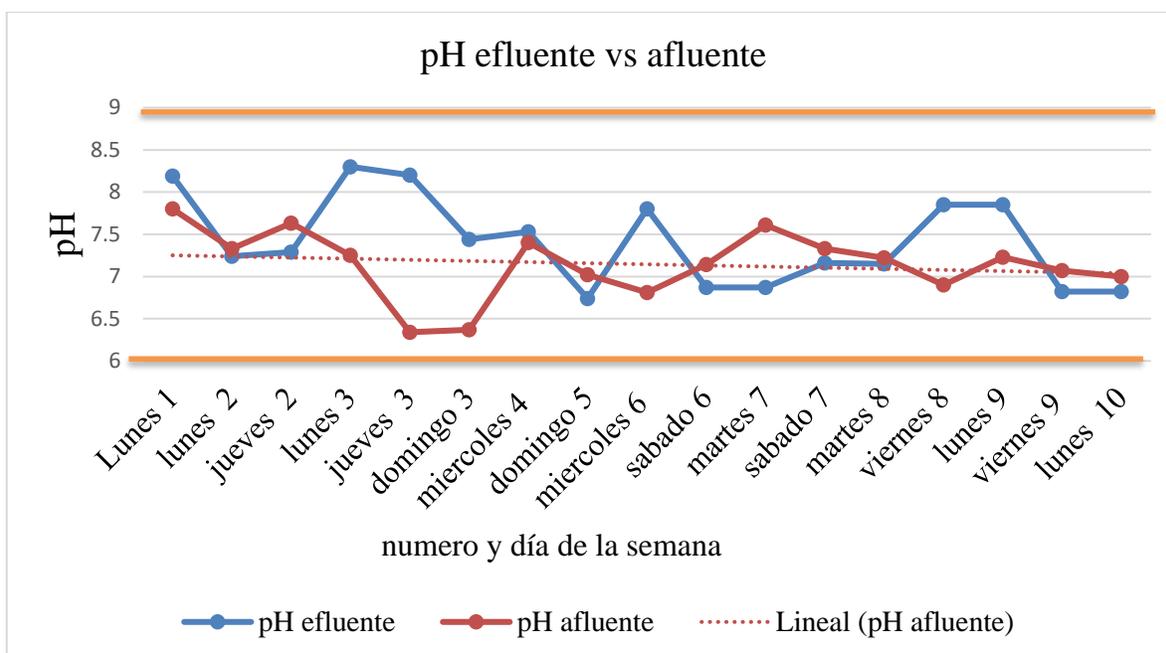


Figura 37. pH vs TRC en el afluente y efluente del biorreactor

En la figura 38 se nota que la disminución o eliminación de la DQO no depende de los valores iniciales de DQO del agua residual cruda, se puede observar que en los días en el que los valores de la DQO en el efluente fue el mayor, la DQO en el afluente no presento los valores más altos y que incluso en días donde la DQO era más baja se presentaron los valores más altos de DQO para el agua tratada. EL porcentaje de eliminación de DQO vario durante todo el proceso, pero se mantuvo entre los 82% y 98%. En la tabla 17 observamos que el porcentaje de eliminación tiende a aumentar en paralelo del TRC.

Los sólidos suspendidos y en especial los SST tuvieron valores más estables en el agua residual tratada, aun así, parece que tampoco responden a una relación en el aumento del valor en el agua residual de entrada, en la figura 39 se observa que el día domingo de la tercera semana presenta el valor más alto para SST en el agua tratada, sin embargo, es uno de los días en que su valor en la alimentación se encontraba por debajo del promedio.

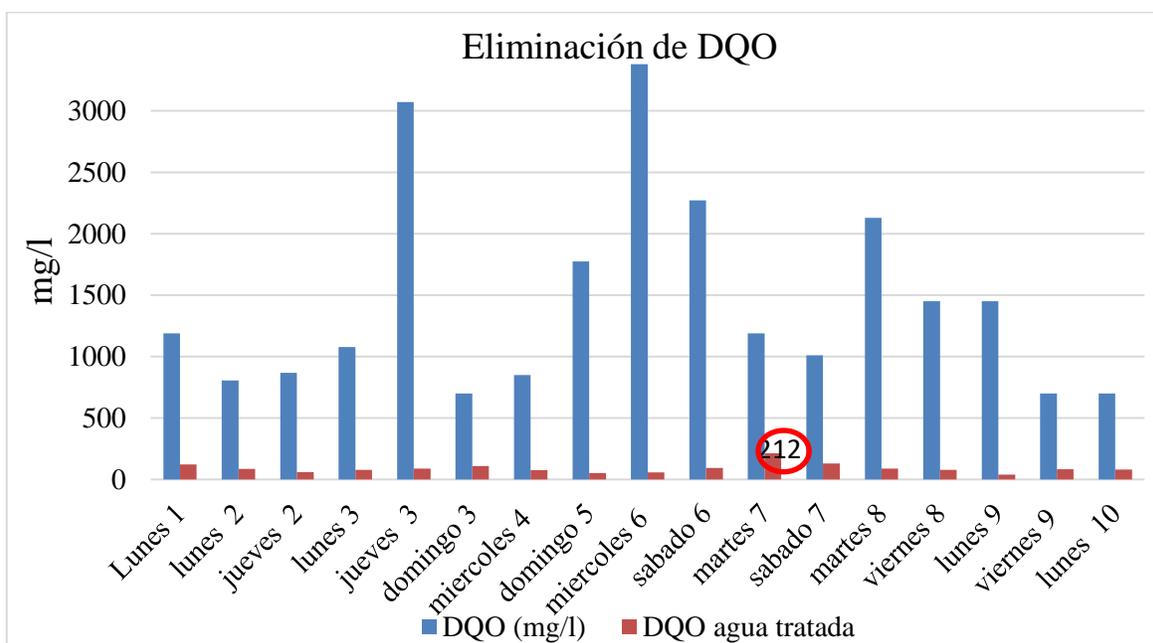


Figura 38. Reducción de DQO en el proceso de clarificación del agua residual

Los porcentajes de eliminación para SST y SSV se muestran en la tabla 17, nos muestran que al igual que en la DQO, conforme avanza el TRC dentro del reactor aumenta la eficiencia en la eliminación de estos parámetros. Podemos observar también, que la variación de los

porcentajes de SST y SSV varían menos que con la DQO y se encuentran entre los 94% y 99% siendo altamente eficiente este proceso para la eliminación de sólidos para el agua residual.

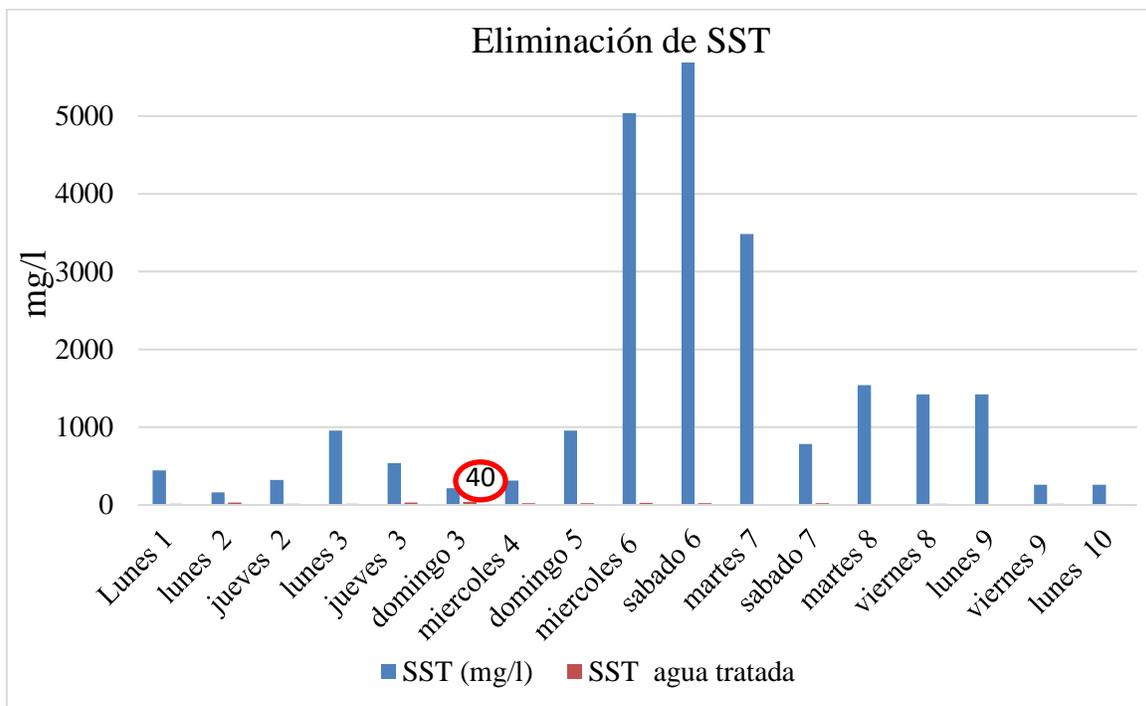


Figura 39. Reducción de SST en el proceso de clarificación del agua residual

Para la grasas y aceites no se hizo evaluación durante el proceso, debido a que, desde antes de ingresar al sistema, el agua residual presentaba valores por debajo de los estipulados en las normas oficiales para el uso del agua tratada. Sin embargo, si se caracterizó en el agua tratada presentando valores para grasas y aceites entre 0.229 y 0.654.

Finalmente, la figura 39 muestra de manera grafica el porcentaje de eliminación promedio por parámetro iniciando por la DQO, SST y finalmente SSV, donde se puede ver que el proceso cumplió con las expectativas iniciales que se seleccionaron para el diseño según Ødegaard (1994) para un SALR de 7.5 con un promedio de eliminación de 90 a 95% de DBO Y DQO

Cuadro 17. Tabla de parámetros en agua residual cruda, tratada y porcentaje de eliminación

Alcantarillado									
Día y semana	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)	DQO agua tratada	SST agua tratada	SSV agua tratada	DQO %	SST %	SSV %
Lunes 1	1190	443.33	400	123	15	15	90%	97%	96%
Lunes 2	807	161.66	133.3	86	30	21	89%	81%	84%
Jueves 2	869	320	197	60	16	15	93%	95%	92%
lunes 3	1079	955	850	78	14	14	93%	99%	98%
Jueves 3	3070	540	510	90	30	30	97%	94%	94%
domingo 3	700	215	190	110	40	35	84%	81%	82%
miércoles 4	850	315	275	75.5	23.75	21.25	91%	92%	92%
						total	91%	91%	91%
Cárcamo									
domingo 5	1775	955	815	53	21	19	97%	98%	98%
miércoles 6	3380	5040	4070	57	28	25	98%	99%	99%
sábado 6	2270	5690	4740	95	23.5	14	96%	100%	100%
Martes 7	1190	3485	2875	212	11	11	82%	100%	100%
sábado 7	1010	785	700	130	22	22	87%	97%	97%
martes 8	2130	1540	1360	88	12	11	96%	99%	99%
viernes 8	1450	1420	1195	79	16.25	10	95%	99%	99%
Lunes 9	1450	1420	1195	40	11	9	97%	99%	99%
Viernes 9	700	260	230	83	15	15	88%	94%	93%
Lunes 10	700	260	230	80	10	10	89%	96%	96%
						total	92%	98%	98%

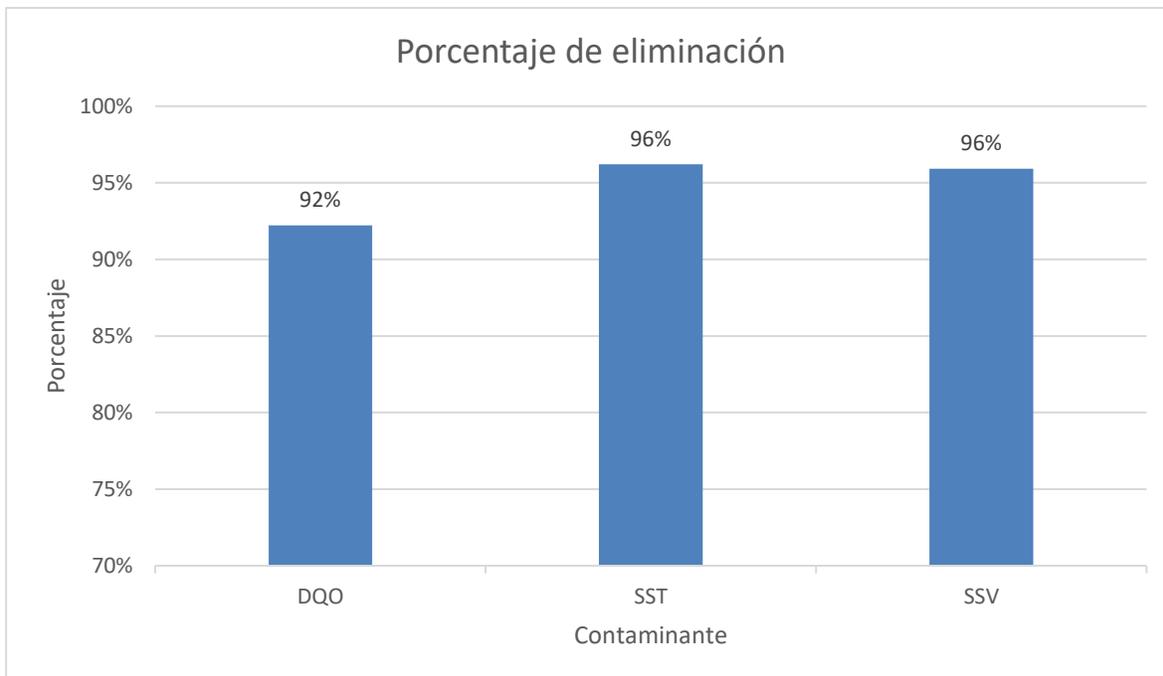


Figura 40. Porcentajes promedio de eliminación de SST, SSV y DQO

Los porcentajes de eliminación de DQO y SST, 92% y 96% respectivamente, se encontraron entre los mejores resultados encontrados la variedad de bibliografías de procesos MBBR analizadas por Barwal y Chaudhary (2014) (DQO de 60-90% y SST de 75-97%)

10.4 Consumo energético

Se evaluaron 3 valores de consumo eléctrico, el consumo calculado para el fraccionamiento “Latërsi”, el consumo calculado del modelo y el consumo real del modelo, y se compararon con los valores típicos de consumo energético para PTAR y sus procesos biológicos. En una PTAR el consumo de energía eléctrica más alto se da por el uso de los aireadores dentro del biorreactor. Se estima que puede alcanzar hasta el 75% de los costos de operación de las PTAR (Mantilla, 2004). Llamas y Gaviria en 2020 mencionan que la el consumo energético de las PTAR aumenta para plantas de bajo caudal, esto quiere decir que la eficiencia energética es mayor a grande escala.

El consumo eléctrico se calculó multiplicando la cantidad de Kw que consumían las bombas por el tiempo de residencia hidráulica del proceso (TRH):

$$\text{Consumo eléctrico} = \text{Potencia (Kw)} \times \text{tiempo (h)}$$

El gasto del biorreactor se calculó dividiendo el consumo eléctrico entre el volumen tratado durante el TRH en m³:

$$\text{Gasto} = \text{Consumo eléctrico} \div \text{volumen (m}^3\text{)}$$

La tabla 18 muestra los valores calculados del consumo eléctrico para cada caso y valores de consumo eléctrico comunes en PTAR en México y el mundo según distintas fuentes.

Cuadro 18. Valores de gastos del modelo, del diseño y típicos para PTAR

Fuente	ICE en Kwh/m ³
Diseño para fraccionamiento “Latërsi”	0.69
Diseño para modelo a escala	1.2
Modelo real (2 bombas de 2 w)	8
PTAR promedio según Molina, C. (2011)	2.46
PTAR Cd México según Ramírez O. et al., 2011	0.8
Modelo PTAR comercial de Llamas, N. y Gaviria, L. 2020	8.42

10.5 Crecimiento de biofilm en acarreador

El crecimiento del biofilm dentro de los acarreadores fue medido en gramos, por medio de una diferencia entre el peso del acarreador y el peso del acarreador con el biofilm, por desgracia los valores calculados se extraviaron antes de poder registrarlos. Sin embargo, la imagen 41 nos muestra que los acarreadores dentro del tanque MBBR presentaban un crecimiento pequeño del biofilm en su interior, mínimo comparado con imágenes de acarreadores ya maduros presentados por Boltz et al., en 2009 (figura 42).

La imagen 43 nos muestra que el diseño secuencial, permite que el lodo en biomasa suspendida, sedimente dentro del reactor, antes de esta ser descargada al clarificador, lo cual indica, que el proceso funciona en una combinación de biomasa adherida y biomasa suspendida, lo que pudo haber ayudado a los efectos positivos en los porcentajes de eliminación de los contaminantes orgánicos. Este efecto, también permitió que el lodo que

se filtraba al sedimentador era mínimo, lo cual era benéfico para el proceso y para el manejo de los residuos que tuvo el sistema.



Figura 41. soportes "K1" con crecimiento de biofilm

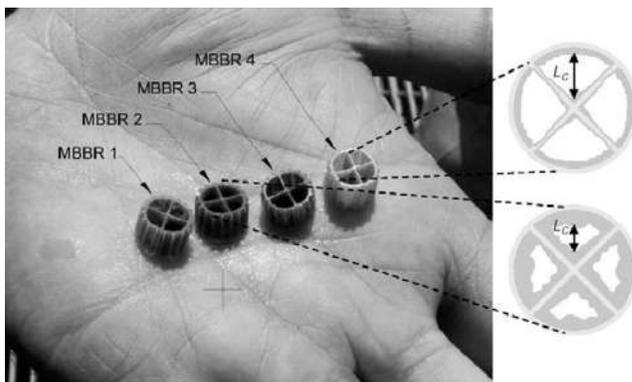


Figura 42. Distintos crecimientos de biopelícula en soportes "K1"



Figura 43. Comportamiento del lodo dentro del reactor en reposo

11. Conclusiones

El agua residual no pudo ser caracterizada de manera correcta debido a los puntos de muestreo, principalmente al punto de muestreo 2 (cárcamo) donde los valores de DQO, SST y SSV fueron muy altos debido a que había una acumulación de sólidos en el lugar. Sin embargo, se observaron variaciones altas de estos parámetros, sin importar el día de la semana, y se observó una mayor carga de contaminantes en las recolecciones que se hicieron por la mañana.

Se realizó con éxito un sistema de automatización para el funcionamiento del biorreactor, pero la calidad de los componentes no era la más óptima por lo que se tuvieron fallas en los componentes electrónicos, por lo que es imprescindible utilizar piezas de mejor calidad.

El programa realizado en Excel con el fin de diseñar en base a las características deseadas y los parámetros analizados parece tener buenos resultados y podría ayudar a diseñar reactores de manera más sencilla.

La temperatura del agua residual antes, durante y después del tratamiento biológico, varía en función de la temperatura ambiental de la ciudad de Morelia, Michoacán.

El pH dentro del reactor y en el agua residual tratada conservó una estabilidad que aumentaba conforme avanzaba el tiempo de residencia celular, hacia un valor de 7, fomentando condiciones favorables para el desarrollo de los microorganismos, la eficiencia del proceso y los valores aceptados por la norma NOM-001-SEMARNAT-2021.

Las grasas y aceites presentes en el agua residual doméstica tuvieron valores por debajo del establecido NOM-001-SEMARNAT-2021 y no presentan un riesgo para el proceso de clarificación, por lo mismo podría eliminarse la etapa de separación de grasas y aceites con el fin de ahorrar tiempo.

Las lecturas de OD indicaron que los aireadores pueden estar apagados 2 horas después del proceso en el biorreactor sin que haya una disminución en sus niveles de oxigenación que pudiera afectar el proceso de los microorganismos aerobios.

Las características del agua tratada presentaron cierta estabilidad, sin importar las características de agua residual a la entrada, esto sugiere que este proceso es apto para el tratamiento de aguas residuales que presenten altas variaciones en sus contaminantes.

El modelo presento resultados óptimos en sus porcentajes de eliminación de DQO, SST y SSV (92%, 96% y 96% respectivamente), cumpliendo con las características necesarias para el reúso del agua, a excepción, de la DQO que esta ligeramente por encima de los limites permisibles según la norma NOM-001-SEMARNAT-2021, esto quizá, debido a los altos valores de contaminantes del agua residual a la entrada del reactor y al poco tiempo de residencia celular (2 meses y 1 semana) en el reactor.

El consumo eléctrico del modelo fue de 8 Kwh/m³, un valor alto para el promedio en gasto de las PTAR, debido a la necesidad de mantener en movimiento a los acarreadores alrededor de todo el tanque. La lectura sugiere que el gasto energético aumenta con la disminución del volumen a trata, por ello, se tendrían que hacer pruebas con reactores a escala real para poder verificar si el valor calculado en el programa para gasto energético (0.69 Kwh/m³) cumple con las necesidades de los reactores MBBR.

El reactor trabajo con biomasa adherida a los acarreadores, pero también con biomasa suspendida que se mantenía dentro del reactor, por lo tanto se puede decir que fue un proceso hibrido entre MBBR y lodos activados.

El biorreactor secuencial MBBR parece ser una alternativa viable para el tratamiento de agua residual domestica para casa, edificios y fraccionamientos entregando buenos resultados incluso con las características variables del efluente, evitando el consumo eléctrico en casi todo el tren de tratamiento a excepción de la aireación y el consumo de los circuitos electrónicos.

Referencias bibliográficas

- Arcos, Y. 2013. Microbiología de lodos activados. *Hechos Microbiológicos*, 4(2): 117-122.
- Barwal, A., and R. Chaudhary, 2014. To study the performance of biocarriers in moving bed biofilm reactor (MBBR) technology and kinetics of biofilm for retrofitting the existing aerobic treatment systems: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 13: 285- 289.
- Bioconstrucción y energía alternativa. Certificación LEED. <https://bioconstruccion.com.mx/certificacion-leed/> fecha de consulta: 10/11/2020
- Bjornberg C., L. Wei, R. Zimmerman. 2009. Effect of Temperature on Biofilm Growth Dynamics and Nitrification Kinetics in a Full-Scale MBBR System. *Proceedings of the Water Environment Federation*. 12: 4407–4426. doi:10.2175/193864709793954051
- Boltz J., B. Johnson, G. Daigger, J. Sandino and D. Elenter. 2009. Modeling Integrated Fixed-Film Activated Sludge and Moving-Bed Biofilm Reactor Systems II: Evaluation. *Water environment research: a research publication of the Water Environment Federation*. 576 pp. doi - 10.2175/106143008X357057
- Merz C., R. Scheumann, E. Hamouri and M. Kraume. 2007. Membrane bioreactor technology for the treatment of greywater from a sports and leisure club. *Desalination*. 215: 37–43. doi:10.1016/j.desal.2006.10.026
- CONAGUA. 2020a. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Libro 4. Obtenido de <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro4.pdf> fecha de consulta: 20/10/2020
- CONAGUA. 2020b. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Libro 23. Obtenido de <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro23.pdf> fecha de consulta: 22/10/2020
- CONAGUA. 2020c. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Libro 33. Obtenido de <http://cmx.org.mx/wp-content/uploads/MAPAS%202015/libros/SGAPDS-1-15-Libro33.pdf> fecha de consulta: 22/10/2020

- CONAGUA. 2020d. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Libro 46. Obtenido de <http://cmx.org.mx/wp-content/uploads/MAPAS%202015/libros/SGAPDS-1-15-Libro46.pdf> fecha de consulta: 20/10/2020
- García N. y Gutiérrez D. 2018. *Diseño y operación de un reactor de lecho móvil aerobio para tratamiento de agua residual doméstica*. Tesis de grado (inédita). Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. 60 pp.
- Hesse-Zepeda, H. R., R. A. Gómez-Ortíz y J. Bonales-Valencia. 2010. Clima organizacional de una institución pública de educación superior en Morelia, Michoacán, México. *Escenarios* Vol. 8, No. 2: 41-50
- Humeau P., F. Hourlier, G. Bulteau, A. Massé, P. Jaouen, C. Gérente, C. Faur and P. Le Cloirec. 2011. Estimated costs of implementation of membrane processes for on-site greywater recycling. *Water Science and Technology*. 63(12): 2949–2956. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.617>
- Jabornig, S. and E. Favero. 2013. Single household greywater treatment with a moving bed biofilm membrane reactor (MBBMR). *Journal of Membrane Science*. 446: 277–285. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.06.049>
- Jaramillo, A. 2005. *Bioingeniería de Aguas Residuales: Teoría y Diseño*. Bogotá, D.C. 410 pp.
- Liu, Y. and J.H. Tay. 2001. Detachment forces and their influence on the structure and metabolic behaviour of biofilms. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*. 17(2): 111-117.
- Lesjean, B., and E. H. Huisjes. 2008. Survey of the European MBR market: trends and perspectives. *Desalination*. 231(1-3): 71–81. doi:10.1016/j.desal.2007.10.022
- Llamas, A., y M. Gaviria. 2020. *Estudio de la eficiencia energética en una planta de tratamiento de aguas residuales comercial, en Mérida Yucatán*. Tesis de Maestría (inédita). Centro de Investigación Científica A.C. 62 pp.
- Kraume M., R. Scheumann, A. Baban and B. Hamouri. 2010. Performance of a compact submerged membrane sequencing batch reactor (SM-SBR) for greywater treatment. *Desalination*. 250: 1011–1013. DOI: 10.1016/j.desal.2009.09.093

- Metcalf y Eddy Inc. 2000. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Editorial McGraw-Hill: España. 505 pp.
- Mantilla-Morales, G. 2004. Costos índices de sistemas de tratamiento de aguas residuales en México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- McQuarrie, J., P., Boltz and P. Joshua. 2011. Moving Bed Biofilm Reactor Technology: Process Applications, Design, and Performance. *Water Environment Research*, 83(6): 560–575. doi:10.2175/106143010x12851009156286
- Moeller G. y A. Tomasini. 2003. Tratamiento de aguas residuales. *Microbiología de lodos activados*. 5: 148-197.
- Molina, C. M. 2011. Evaluación energética de los actuales sistemas de aguas urbanas y propuestas de manejo de los recursos hídricos en la ciudad de México. 3 pp.
- Nava, L., R. Gasperín, y A. Durán. 2014. Comparación de un reactor de biomasa suspendida y un reactor de biomasa adherida para la biodegradación de compuestos tóxicos presentes en aguas residuales de refinerías de petróleo. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30(1): 101-112.
- Ødegaard, H., B. Rusten, and T. Westrum. 1994. A new moving bed biofilm reactor: applications and results. *Water Science and Technology*. 29(10-11): 157–165. <https://doi.org/10.2166/wst.1994.0757>
- Ødegaard, H. and H. Helness. 1999. Floating Filters for Particle Removal in Sewage Treatment. *water and environment journal*. 13 (5): 338-342. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.1999.tb01058.x>
- Ødegaard, H., B. Rusten, and F. Wessman. 2004. State of the art in Europe of the moving bed biofilm reactor (MBBR). *Proceedings of the Water Environment Federation*. (16): 48-354. Doi: 10.2175/193864704784147610
- Ramalho R.S. 1996. *Tratamiento de aguas residuales*. Editorial Reverte S. A: Barcelona-Bogota-Buenos Aires-Caracas-México. 705 pp
- Ramírez, O., R. Leyte y H. Lugo Méndez. 2011. *Análisis energético a una planta de tratamiento de aguas residuales por lodos activados de la ciudad de México*. XXXII Encuentro

Nacional y 1er Congreso Internacional AMIDIQ. Universidad Autónoma metropolitana Iztapalapa. 4825-4832.

Revistaferrepat. Construcción de casas ecológicas y autosustentables. Obtenido de <https://www.revista.ferrepat.com/construccion/construccion-de-casas-ecologicas-y-autosustentables/> fecha de consulta 7/11/2020

Rusten, B., B. Eikebrokk, Ulgenes, and E. Lygren. 2006. Design and operations of the Kaldnes moving bed biofilm reactors. *Aquacultural Engineering*. 34(3): 322–331. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.04.002>

Rusten, B., H. Ødegaard, and A. Lundar. 1992. Treatment of Dairy Wastewater in a Novel Moving Bed Biofilm Reactor. *Water Science and Technology*. 26(3-4): 703–711. <https://doi.org/10.2166/wst.1992.0451>

Standard Methods Committee of the American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Environment Federation. 5220 chemical oxygen demand (cod) In: Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater. Lipps WC, Baxter TE, Braun-Howland E, editors. Washington DC: APHA Press. DOI: 10.2105/SMWW.2882.103

Torrescano, J. 2009. Parámetros de operación en el proceso de tratamiento de agua residual por lodos activados. *Aquaforum*. 13 (52): 14-9.

Zhou L., L. Guiying, A. Taicheng, F. Jiamo and S. Guoying .2008. Recent patents on immobilized microorganism technology and its engineering application in wastewater treatment. *Recent Patents on Engineering*, 2(1): 28-35.

Anexo 1

Corrección de coeficientes cinéticos por la temperatura

Para una correcta selección de los coeficientes cinéticos y biocinéticos se debe hacer una corrección en base a la temperatura del agua y su valor θ . Considerando la tabla II que nos proporciona CONAGUA 2020c, de los valores típicos de aguas residuales.

Cuadro I. Coeficientes cinéticos típicos de aguas residuales.

Coeficiente	Unidades	Valor		Valor de θ
		Rango	Típico	
K	1/d	2 a 10	5	$1.0 < \theta < 1.135$
Ks	mg/l _t DBO	25 a 100	60	
Y	mg SSV/mg DBO	0,4 a 0,8	0,6	
Kd	1/d	0,06 a 0,15	0,1	$1.03 < \theta < 1.06$

Donde:

k_T = Coeficiente de utilización de sustrato específico a la temperatura T (°C)

k = Coeficiente de utilización de sustrato específico a la 20°C

Θ = Coeficiente de actividad temperatura

T = Temperatura (°C)

La corrección para cada tipo de K se basa en la siguiente formula: (Rhamalo, 1996):

$$K_T W = k^{20} * \theta^{T-20}$$

Estequiometria.

Producción específica observada (Y_{obs}):

$$Y_{obs} = \frac{Y}{1 + K_d \theta_c f_b}$$

Donde

$\theta_c = \text{edad de lodos en dias}$

$Y = \text{producción específica}$

$f_b = \text{fracción biodegradable}$

$f'_b = 0.8 \text{ (para aguas residuales domésticas)}$

$$f_b = \frac{f'_b}{1 + (1 - f'_b)Kd\theta_c}$$

Concentración del sustrato en el sistema es:

$$S = \frac{Ks(1 + \theta_c Kd)}{\theta_c(YK - Kd) - 1}$$

Finalmente encontramos la concentración de microorganismos en el reactor:

$$X = \frac{\mu_m(S_0 - S)}{K(1 + \theta_c Kd)}$$

Producción de lodos y requerimiento de oxígeno.

Se calcula la producción de lodos (P_{vx}) teórica del sistema para poder conocer el requerimiento de oxígeno en el mismo.

$$P_{vx} = Y_{obs} * Q(S_0 - S)$$

Y el requerimiento de oxígeno (R_o) del sistema, concentración de oxígeno y la potencia del equipo que satisface dicho requerimiento se lleva a cabo la metodología de (Jaramillo, 2005) usada por la IWA (International wáter Association):

$$R_o = 1.46 * Q * (S_0 - S) - 1.42P_{vx}$$

La concentración de saturación de oxígeno (DO_{sT}) se calcula en base a la temperatura de operación, que cambiara conforme a las condiciones climatológicas donde se desarrolle el reactor:

$$DO_{ST} = \frac{51.6}{(31.6 * T)} * DO_{20}$$

Donde:

DO_{20} = Concentración de saturación de oxígeno a 20°C = 9.1mg^{O₂}/litro

T= Temperatura de operación

1.1. Eficiencia de transferencia de oxígeno y potencia requerida

Para este cálculo es necesario conocer los valores de la presión de vapor de agua (Pw) y la presión (P), donde se encontrará el difusor en el agua que por medio de una interpolación de la tabla III, que muestra la relación de la presión y temperatura a diferentes alturas. Se pueden calcular

Cuadro II. Relación entre presión atmosférica y altitud, temperatura y presión de vapor de agua

Altitud (m)	Presión(p) (mm Hg)	Temperatura (°C)	Presión de vapor- Pw(mmHg)
0	760	0	4.6
500	715	5	6.5
1000	673	10	9.2
1500	633	15	12.8
2000	595	20	17.5
2500	560	25	23.7
3000	525	30	31.7
4000	490	35	42

La eficiencia de transferencia de oxígeno (OT_a) se calcula con la fórmula:

$$OT_a = OT_s * \alpha * \theta^{T-20} = \frac{\left(\frac{(p - pw) * 51.6 * \beta * DO_{ss}}{(ps - pw) * (31.6 + T)} - 1 \right)}{DO_{ss}}$$

$$P_{aer} = \frac{R_o}{OT_a}$$

Finalmente, se selección el número de difusores en base a lo establecido por Ramalho, (1996) que nos brinda la Figura 5, para conocer el oxígeno que entrega cada difusor de burbuja fina o media en base a su caudal de salida:

$$\text{Numero de difusores} = R_o/N$$

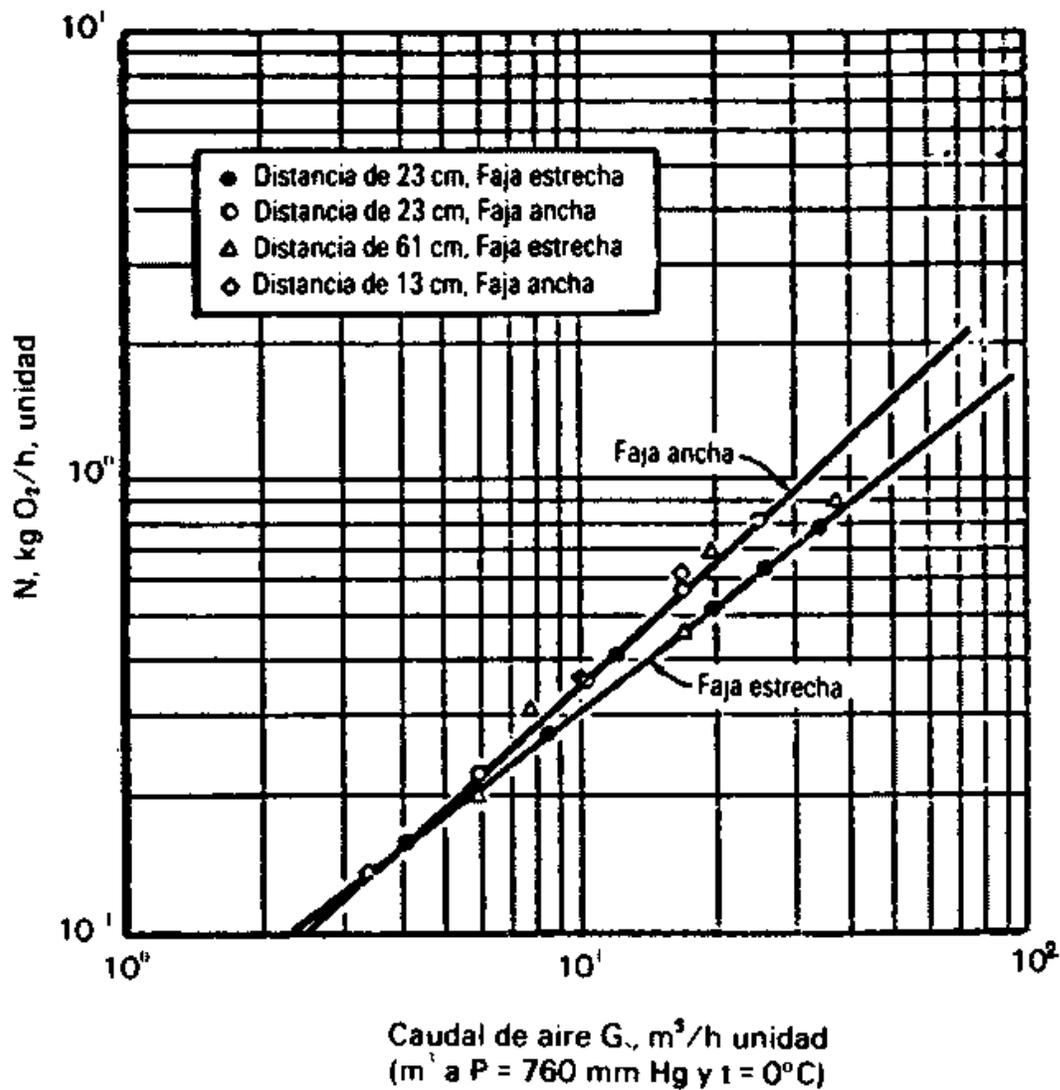


Figura I. Datos de transferencia de oxígeno para tubos de burbuja fina

Anexo 2

1.- Dimensiones del tanque de aireacion		
Superficie requerida por el carrier		
QF =	159.00 l/hab*d	→ 2.544 m ³ /dia
hab =	16.00 hab	
SALR se obtiene de la tabla típica con un objetivo de remocion 90% €		
Valores típicos de diseño para reactores MBBR a 15°C		
Proposito	Objetivo de tratamiento % de remocion	SALR de diseño ((g/m ²)*d)
Remocion de DBO		
Tasa alto	75-80 (DBO5)	25 (DBO5)
Tasa normal	85-90 (DBO5)	15 (DBO5)
Tasa Baja	90-95 (DBO5)	7.5 (DBO5)
SALR =	7.50 ((g/m ²)*d)	
E =	90.00 %	
Se =	300.00 (g/m ³)	valor estimado para agua medianamente contaminada
Am =	91.58 m ²	
Posteriormente se calcula el volumen de bioportadores necesarios en el reactor		
Am =	91.58 m ²	
Aec =	500.00 m ² /m ³	Para carriers K1 en este caso, según los datos del proveedor

Figura II. Hoja de cálculo para dimensionamiento del reactor

Correccion de los coeficientes cineticos por temperatura	
Para realizar las correcciones es necesario considerar las menores temperaturas del ambiente registradas, por lo que se tomara una temperatura de 18 °C, así mismo se toma un θ de 1,03 (RAMALHO, 1996)	
Correccion de K	
K20 =	5 1/d
θ =	1.03
TW =	18 °C
KTW =	5 1/d
Correccion de Kd	
K20 =	0.1 1/d
θ =	1.03
TW =	18 °C
KdTW =	0.094 1/d
Estioquiometria	
Fraccion biodegradable	

Figura III. Hoja de cálculo de potencia y requerimiento de oxígeno

Anexo 3

Lenguaje de programación Arduino

La placa Arduino 1 y la placa Arduino 2, se programaron con el software libre “Aduino” con el fin de reducir los costos que podría tener un programa de programación, en la figura IV y V se muestra el lenguaje utilizado para la PTAR MBBR.

```
const int sensorPin2 = 8;
const int rele2 = 9; //válvula
void setup() {
  Serial.begin(9600); //iniciar puerto serie
  pinMode(sensorPin2, INPUT); //definir pin como entrada
  pinMode (rele2, OUTPUT);
}

void loop(){
  int value = 0;
  value = digitalRead(sensorPin2); //lectura digital de pin

  if (value == LOW) {
    Serial.println("Nivel Alto"); //monitor serie
    pinMode(rele2, LOW); //orden de condición
    delay(30000); // tiempo que dura la valvula abierta
  }
  else (value == HIGH); {
    pinMode(rele2, HIGH);
    delay(10000); //tiempo de retencion (de espera en que se abra la valvula
  }
}
```

Figura IV. Lenguaje placa Arduino 1



```
planta_buena Arduino 1.8.15
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
planta_buena
const int sensorPin = 9;
const int rele = 8;
void setup() {
  Serial.begin(9600); //iniciar puerto serie
  pinMode(sensorPin, INPUT); //definir pin como entrada
  pinMode (rele, OUTPUT);
}

void loop(){
  int value = 0;
  value = digitalRead(sensorPin ); //lectura digital de pin

  if (value == LOW) {
    Serial.println("Nivel Alto"); //monitor serie
    pinMode(rele, LOW); //orden de condición
    delay(270000); // tiempo de espera en nivel alto tiempo de retencion
  }
  else (value == HIGH); {
    pinMode(rele, HIGH);
    delay(5000);
  }
}
```

Figura V. Lenguaje placa Arduino 2