



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**Estrategia de arranque de una Planta de Tratamiento de
Agua Residual utilizando la tecnología del Reactor
Biológico Tubular (RBT).**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA:

LUCERO IRIDIAN ESCAMILLA HERNÁNDEZ

ASESOR DEL TEMA:

DR. GARCÍA GONZÁLEZ SERGIO ADRIÁN

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX 2023





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

- Presidente:** Dra. María Rafaela Gutiérrez Lara
Vocal: Dr. Sergio Adrián García González
Secretario: Dr. José Agustín García Reynoso
Suplente 1: Dr. Alfonso Durán Moreno
Suplente 2: M en I. Alejandra Mendoza Campos.

Lugar donde se realizó la tesis:

UNIDAD DE PROYECTOS Y DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL (UPIIA), Laboratorios 301 a 303, Conjunto E, Facultad de Química, Ciudad Universitaria, UNAM, Ciudad de México, México.

TUTOR DE TESIS

Dr. Sergio Adrián García González

SUSTENTANTE

Lucero Iridian Escamilla Hernández

Agradecimientos.

A Dios, a mi familia, a mis amigos, a mi asesor Dr. Sergio Adrián García González y a la alcaldía de Xochimilco.

Al proyecto CM-SECTEI/033/2022 titulado “Tratamiento y reúso in situ de aguas residuales en espacios públicos de la CDMX mediante procesos biológicos y fisicoquímicos, en módulos tubulares compactos y de bajo costo” por el apoyo otorgado durante la realización de este trabajo

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica PAPIIT/ IT102322 “Desarrollo de aditivos y medios de soporte biológico para mejorar la producción de biogás en reactores de digestión anaerobia a partir de residuos orgánicos” por los materiales aportados para la realización de este trabajo.

A mis sinodales Dra. María Rafaela Gutiérrez Lara y Dr. José Agustín García Reynoso por sus valiosos comentarios y recomendaciones para mejorar la calidad de este escrito.

Dedicatoria.

Dedico esta tesis a Dios por colmarme de bendiciones e inspirarme en la elaboración de este trabajo que representa la culminación de una etapa en mi vida.

A mi familia, mi mamá María del Pilar Hernández por creer en mí incondicionalmente y apoyarme en todo momento sin restricción, a mi hermano I. en B. Diego Mariano Escamilla Hernández por ser mi ejemplo que seguir, y a mi papá Mariano Escamilla por su cariño y por darme la mejor herencia de todas; el amor al medio ambiente. A Florentina Hernández, Bibiana Ramírez, a los pequeños Isaías, Mateo y Andrea. Sin olvidar a los consentidos de la casa; Maniac y Coco. A mi abuela Antonia QEPD, Trinidad, Peche y a mis padrinos Freddy Lozano y Elodia Pérez.

A mi maestro Miguel Ángel Rendón Jasso, por nunca perder la esperanza en mí y enseñarme a dar mis primeros pasos en el camino del guerrero, a Carolyn Córdoba, Tania Tapia, Evelyn Contreras y Vale García por ser mis compañeras en este duro camino. A *XipeTótec* por enseñarme que la danza es mi fortaleza y al pequeño Esteban por los regaños cuando olvidaba alguna flor. A Tactical Fight Academy por ser mi lugar de poder. *“Un guerrero acepta su suerte, sea cual sea, y la acepta con toda humildad. Se acepta así mismo con humildad, tal como es; no como base de lamentarse, sino como un desafío vital”*

A todos los profesores que contribuyeron en mi formación académica a través de los años, en especial a la M.en.E Maritza López mi profesora de química de CCH, por ser el último empujón para decidirme a estudiar esta carrera.

A mis amigos con quienes pasé toda la carrera universitaria y nos apoyamos académica y emocionalmente durante cuatro años; mi mejor amigo y colega Víctor López, Cristian Verde y Ari Michael. A mis amigos del Lab-301 Pao, Abi, Jesús, Aza y Chava por los agradables momentos y aventuras en la PTAR.

A mis amigas de toda la vida, Leticia Noemi y Gabriela Mejía por su amistad y cariño desde hace 20 años.

A Luis Fernando Castillo López, que siempre ha estado al pendiente de mí como un ángel. A Héctor Andrés Pozos Villegas por su comprensión, apoyo y cariño. *“Con tiempo y un poco de suerte, ellos se hacen más débiles y nosotros más fuertes”*

INDICE

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	3
JUSTIFICACIÓN	4
OBJETIVOS	7
Objetivo general	7
Objetivos particulares	7
CAPITULO I	8
Marco teórico.....	8
1.1 Aguas Residuales	8
1.2 Aguas Residual Doméstica	9
1.3 Tratamiento de aguas residuales	11
1.4 Arranque del proceso	18
1.5 Actividades requeridas antes de iniciar el proceso de arranque.....	19
1.6 Problemas comunes en el arranque de las tecnologías de tratamiento de agua residual.....	20
1.7 Seguimiento del arranque	20
CAPÍTULO II	21
Metodología.....	21
2.1 Identificación del problema	22
2.2 Estudio del problema	22
2.3 Diseño conceptual.....	23
2.4 Planeación del Arranque de la PTAR San Lorenzo Xochimilco	24
CAPÍTULO III	28
Resultados y análisis de resultados.....	28
3.1 Construcción del Reactor Biológico Tubular (RBT)	28
3.2 Instalación de los equipos de tratamiento en el sitio.....	33
3.3 Análisis del afluente de agua residual.....	33
3.4 Revisión de los equipos electromecánicos.....	35
3.5 Revisión hidráulica de tuberías y tanques.....	35
3.6 Puesta en marcha.....	40
3.7 Evaluación del arranque.....	41
CAPÍTULO IV	50

Conclusiones.....	50
Recomendaciones	51
REFERENCIAS.....	52
ANEXOS.....	57
Anexo I. Diagrama de tubería e instrumentación de la PTAR San Lorenzo Xochimilco.	57
Anexo II. Memoria de cálculo de las condiciones de la tubería	58
Anexo III. Fichas técnicas de los equipos de proceso	60
Anexo IV. Técnicas analíticas para la medición de parámetros de calidad del agua	65
Determinación de sólidos suspendidos totales y sólidos suspendidos volátiles.....	65
Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	66
Nitrógeno amoniacal N-NH ₄	68
Turbidez	69
Color	69
Anexo V. Manual de arranque de los equipos de pretratamiento	70
Anexo VI. Manual de arranque del reactor biológico tubular	80

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Problemas en sistemas de tratamiento biológico.....	5
Tabla 2	Impactos ambientales de los principales contaminantes presentes en las aguas residuales. 9	
Tabla 3	Características físicas, químicas y biológicas del agua residual.	10
Tabla 4	Características típicas de aguas residuales municipales no tratadas.	10
Tabla 5	Aplicaciones y procesos de tratamiento primario.	12
Tabla 6	Procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales.	13
Tabla 7	Ventajas y desventajas de sistemas biológicos para el tratamiento de agua residual.....	14
Tabla 8	Tecnologías de biopelícula aplicadas en el tratamiento de aguas residuales.	17
Tabla 9	Periodo de arranque y estabilización de diferentes sistemas biológicos.	23
Tabla 10	Cronograma de actividades de muestreo de la PTAR San Lorenzo Xochimilco.....	26
Tabla 11	Parámetros de medición de calidad del agua.	26
Tabla 12	Técnicas analíticas de calidad del agua.....	27
Tabla 13	Resumen de los parámetros de calidad del agua del canal San Lorenzo Xochimilco.....	34
Tabla 14.	Pruebas de arranque del equipo electromecánico. Pretratamiento.	35
Tabla 15	Pruebas de arranque del equipo electromecánico. Tratamiento secundario y tratamiento de lodos. 35	
Tabla 16	Condiciones de flujo de las tuberías.....	36
Tabla 17	Revisión hidráulica de los equipos pretratamiento y tanques.	37
Tabla 18	Revisión hidráulica de la tubería y accesorios usados en el RBT.	38
Tabla 19	Programa de monitoreo.	40
Tabla 20	Condiciones de operación para el periodo de pruebas hidráulicas.....	41
Tabla 21	Condiciones de operación en continuo.	41
Tabla 22	Resumen de DQO durante la puesta en marcha del proceso.....	42
Tabla 23	Resumen de N-NH4 durante la puesta en marcha del proceso.	44
Tabla 24	Resumen de turbidez durante la puesta en marcha del proceso.	46
Tabla 25	Resumen de sólidos suspendidos totales durante la fase de operación continua.	47
Tabla 26	Resumen de sólidos suspendidos volátiles durante la fase de operación continua.	48
Tabla 27	Resumen del color durante la puesta en marcha del proceso.	48
Tabla 28	Alimentación de la planta. Tanque de recolección de agua cruda.	60
Tabla 29	Alimentación de la planta. Bomba sumergible de agua cruda.	60
Tabla 30	Equipos de pretratamiento. Hidrociclón.	61
Tabla 31	Equipos de pretratamiento. Criba estática.....	61

Tabla 32	Equipos del tratamiento secundario. Reactor Biológico Tubular.....	62
Tabla 33	Equipos del tratamiento secundario. Tanque de alimentación de agua pretratada.....	63
Tabla 34	Equipos de tratamiento secundario. Bomba de alimentación del reactor.....	63
Tabla 35	Equipos de tratamiento secundario. Soplador.....	64
Tabla 36	Tratamiento de lodos. Filtro de lodos.	64
Tabla 37	Tratamiento de lodos. Bomba centrífuga.	65

INDICE DE FIGURAS

Figura 1	Plano de localización de la PTAR San Lorenzo Xochimilco.....	21
Figura 2	Canal de San Lorenzo Xochimilco.	22
Figura 3	Internos del reactor y módulos construidos.	29
Figura 4	Unión entre dos módulos a través de un cople, pieza formada por cuatro internos, pieza completa en el interior de la tubería (de izquierda a derecha).....	30
Figura 5	Bridas y empaques para la hermeticidad del reactor.....	30
Figura 6.	Secuencia de instalación de las bridas.	31
Figura 7	Unión tipo U y conexión con la tubería de proceso.	31
Figura 8	Soplador y membrana difusora de oxígeno, respectivamente.....	32
Figura 9	Reactor biológico tubular terminado.....	32
Figura 10	Equipos instalados en la PTAR San Lorenzo Xochimilco y acondicionamiento de la planta. 33	
Figura 11	Derrame de agua residual pretratada proveniente de la criba (izquierda) sistema de recolección de agua (derecha).	37
Figura 12	Fugas en el RBT, tubería adherida con pegamento para PVC y cambio de los empaques (antes y después).	38
Figura 13	Configuración del sistema de aireación original (izquierda) y modificación final (derecha). 39	
Figura 14	Primera configuración para la alimentación del reactor (izquierda) y modificación final (derecha). 39	
Figura 15	Determinación de sólidos suspendidos totales.....	66
Figura 16	Muestras para la curva de calibración de DQO.....	67
Figura 17	Recolección del destilado.....	68
Figura 18	Medición de turbidez.	69

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1	DQO en el afluente y efluente durante las distintas fases.	42
Gráfico 2	Medición de la carga orgánica superficial de DQO en el afluente y efluente.	43
Gráfico 3	Porcentaje de remoción de DQO en el periodo de arranque y operación.	43
Gráfico 4	Comportamiento del nitrógeno amoniacal en el afluente y efluente.	44
Gráfico 5	Medición de la carga orgánica superficial de N-NH ₄ en el afluente y efluente.	45
Gráfico 6	Porcentaje de remoción de N-NH ₄ en el periodo de arranque y operación.	45
Gráfico 7	Comportamiento de la turbidez en el afluente y efluente.	46
Gráfico 8	Porcentaje de remoción de turbidez en el periodo de arranque y operación.	47
Gráfico 9	Comportamiento del color en el afluente y efluente.	49
Gráfico 10	Porcentaje de remoción de color en el periodo de arranque y operación.	49
Gráfico 11	Curva de calibración de DQO.	67

Resumen

Esta investigación se centra en la preparación del arranque de la Planta de Tratamiento de Agua Residual a escala piloto ubicada en San Lorenzo Xochimilco, 16040 Ciudad de México: CDMX con una superficie total de 146.25 m², en el proyecto titulado como “Tratamiento y reúso in situ de aguas residuales en espacios públicos de la CDMX mediante procesos biológicos y fisicoquímicos, en módulos tubulares compactos y de bajo costo” de la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación SECTEI.

La PTAR San Lorenzo Xochimilco opera con un gasto piloto máximo de 11 m³ /día y está constituida por las siguientes etapas de tratamiento:

Recolección del agua residual: El agua proveniente del canal se recolecta en una cisterna de 11 m³ y entra al proceso de tratamiento mediante un cárcamo de bombeo.

Etapas de pretratamiento: consiste en un hidrociclón encargado de separar las arenas del afluente y una criba estática para eliminar físicamente las partículas orgánicas e inorgánicas de gran tamaño.

Tratamiento biológico: En esta parte del tratamiento es donde se elimina la mayor cantidad de contaminantes del agua, particularmente, el sistema biológico a utilizar es el Reactor Biológico Tubular (RBT) tecnología desarrollada por el Dr. Sergio Adrián García González y el Dr. Alfonso Durán Moreno que consiste en un novedoso sistema tubular de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales, con biopelículas soportadas en cartuchos de fibras poliméricas no tejidas.

El arranque de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales representa un gran desafío operacional para los implicados en el proceso, la puesta en marcha se considera como la fase final del proyecto.

El arranque de la PTAR Xochimilco consistió en alcanzar el máximo control en las siguientes actividades:

- Organización.
- Planeación.
- Comunicación.
- Tiempo
- Coordinación.

En este trabajo se planeó, ejecutó y monitoreo la puesta en marcha de la planta adecuadamente, procurando evitar problemas operacionales y accidentes. Así mismo, se realizó una investigación sobre todos los equipos que constituyen a la PTAR considerando sus documentos de arranque y operación que abarcan instrucciones y recomendaciones para asegurar el éxito del proceso.

Posterior a la parte operacional, se verificó que la puesta en marcha sea satisfactoria por medio de técnicas analíticas siguiendo la Normas Mexicanas (NMX) recomendadas para diferentes parámetros de control del proceso como lo son: Turbidez, Color, Nitrógeno Amoniacal, Sólidos Suspendidos Totales, Sólidos Suspendidos Volátiles y Demanda Química de Oxígeno.

Introducción

El agua es considerada un recurso muy importante para la humanidad, puesto que es vital para el desarrollo y subsistencia de la vida en general. Este elemento no solo es la base alimenticia de todas las especies en el planeta, sino también es nuestro medio de limpieza para prevenir enfermedades y pilar fundamental de las actividades económicas que tiene el ser humano. Desafortunadamente, este recurso hídrico se ve significativamente amenazado por el deterioro de mantos acuíferos, contaminación de cuerpos acuáticos a causa del hombre y escaso reusó de aguas residuales.

El mal manejo del consumo del agua solamente muestra la inconciencia de la cantidad de este recurso disponible en el mundo, por el hecho mismo, este recurso se consideró por mucho tiempo inagotable, favoreciendo así su desperdicio o uso desmedido. Pese a esto, actualmente los gobiernos se han encargado de difundir el cuidado del agua entre los ciudadanos e incluso se han elaborado normas para el uso y conservación de este recurso.

En México y en todo el mundo, los recursos hídricos escasean cada vez más debido a diversos factores como contaminación, crecimiento demográfico, el aumento de su uso en los hogares, la industrialización y la agricultura. Esta situación compromete el cumplimiento de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de la Organización de las Naciones Unidas que entre sus objetivos se encuentra el número seis correspondiente a “agua limpia y saneamiento” (ONU, 2015). A pesar de esto, los consumidores continúan satisfaciendo sus necesidades hídricas ignorando el concepto de “sustentabilidad”, es decir, no se reconoce el impacto que tiene un consumo desmedido de agua en las generaciones futuras. Por otro lado, las diferentes actividades industriales generan desechos contaminantes que son considerados una de las fuentes más importantes de polución en los cuerpos acuáticos provocando una serie de problemas adversos como la desaparición de los ecosistemas.

Dada esta situación, el tratamiento de aguas residuales adquiere una creciente importancia para aprovechar al máximo este recurso hídrico.

Las plantas de tratamiento de agua son diseñadas por un grupo interdisciplinario de ingenieros químicos, civiles, eléctricos, mecánicos, entre otros. Los procesos de tratamiento son elegidos de acuerdo con las características del afluente de agua cruda a tratar. De manera general las plantas de tratamiento están constituidas por:

- Tratamiento primario
- Tratamiento biológico.
- Desinfección.

En el tratamiento biológico, existen diversas tecnologías encargadas para el tratamiento de aguas residuales, entre ellas destacan los lodos activados, lagunas

de aireación, filtros rociadores, discos biológicos, etcétera, cada uno categorizado por su configuración, es decir, si la biomasa del sistema se encuentra suspendida o fija y por su ambiente bioquímico (si el sistema es anaerobio o aerobio).

Al cierre de 2020 el registro de plantas en operación aumentó a 2786 instalaciones en relación con el año anterior con una capacidad instalada de 196 749.51 l/s y un caudal tratado de 144 710.0 l/s, estos incrementos permitieron alcanzar una cobertura nacional de tratamiento de aguas residuales municipales del 67.2% en el ejercicio. (CONAGUA, 2020).

Dada la demanda de tratamiento de aguas residuales en México y considerando las necesidades del desarrollo de nuevas tecnologías de tratamiento (plantas de menor tamaño pero con un alto índice de tratamiento, gastos de operación mínimos y adaptabilidad a cualquier lugar), los investigadores Dr. Sergio Adrián García González y el Dr. Alfonso Durán Moreno han desarrollado un sistema de tratamiento biológico denominado “Reactor Biológico Tubular”, el cual utiliza una novedosa tecnología de fijación de biomasa que le permite ser compacto dándole la capacidad de ser instalado en sitios donde se requiera un tratamiento de agua a escala piloto, el tratamiento in situ reduce gastos, logística de alcantarillado y conducción del agua (García & Durán, 2017).

Justificación

En el país, se generan 250.48 m³/s de aguas residuales, de las cuales 215.33 m³/s son colectadas gracias al sistema de alcantarillado. Sin embargo, únicamente son tratadas en plantas 141.48 m³/s.(CONAGUA, 2019). El Lago de Xochimilco se encuentra gravemente contaminado, aquí los campesinos cultivan romero, maíz y acelgas en chinampas, islas formadas con una técnica que data de la época de los aztecas, a partir de sauces, lirios y lodo. La contaminación del agua tiene un severo impacto en estos ecosistemas y principalmente en la salud de los habitantes. Debido al incremento de la mancha urbana en Xochimilco, los pobladores han optado por edificar sus casas a orilla de los canales, dada la carencia de drenaje público y conciencia ecológica, desechan los residuos generados en los domicilios al canal. Estas descargas provocan un olor insoportable debido a la materia orgánica fecal que se encuentra flotando en el canal. Xochimilco tiene 116 kilómetros de canales en la zona nororiente divididos en 253 tramos, se detectó que en sus márgenes hay un total de mil 374 descargas, de las cuales 603 son de aguas negras y 771 de grises, según informa el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (González, 2019).

La contaminación del agua es peligrosa para el cuerpo humano y el medio ambiente, por lo que debe ser tratada para evitar que produzca daños. El proceso que purifica las aguas residuales para su reuso se conoce como tratamiento de aguas residuales, este ocurre en infraestructuras que se denominan plantas de tratamiento de aguas residuales. Generalmente, una planta de tratamiento de aguas residuales

consta de secciones de tratamiento preliminar, tratamiento biológico y tratamiento de lodos. Hay procesos y operaciones unitarias en el tratamiento de aguas residuales que son químicos, físicos o biológicos, estos son diseñados para situaciones en particular. El diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales depende de las características de las aguas residuales a tratar, por lo que el proceso de diseño debe analizarse cuidadosamente al igual que su posterior arranque, operación y mantenimiento (Kordrostami, 2015).

En cada etapa del desarrollo de un proyecto se requiere la atención necesaria para evitar cualquier inconveniente y, por experiencias de diversas plantas de tratamiento de agua construidas, se sabe que cualquiera de estas debe tener un estricto control y planeación para la puesta en marcha y su óptimo funcionamiento. Adicionalmente, es necesario considerar que el arranque lleva tiempo y deben tenerse ciertos cuidados para lograr la estabilización de las etapas de tratamiento.

Algunas situaciones que provocan problemas durante el arranque son deficiencias en los equipos, defectos de construcción, fallas en la operación (error humano), o fallas del proceso. La planeación del arranque es un paso imprescindible para realizar de manera adecuada las labores correspondientes en las etapas del tratamiento. Cometer errores puede llegar a ser peligroso, no solamente se ven comprometidos los equipos de proceso o infraestructura, sino también la seguridad de las personas involucradas en el proyecto.

En el arranque puede presentarse cualquier número de contratiempos, por este motivo los preparativos previos al arranque son importantes. Aun así, es muy probable que surja algún inconveniente. En la Tabla 1 se presentan algunos problemas típicos durante el proceso de arranque de plantas de tratamiento.

Tabla 1 Problemas en sistemas de tratamiento biológico.

Sistema biológico	Problema	Causa posible	Respuesta del operador
Lagunas aireadas (CONAGUA, 2019d)	El aireador falla al arrancar	Alambrado incorrecto o falso contacto en la caja de conexión del motor o panel de control	<ul style="list-style-type: none"> •Verificar el alambrado en el panel de control •Verificar que los fusibles y elementos térmicos cumplan las especificaciones
	El motor arranca, pero el aireador tiene una descarga muy pobre	Alambrado incorrecto, ya sea en el panel de control o más probablemente en el motor	<ul style="list-style-type: none"> •Verificar el alambrado en el panel de control y en el motor. •Invertir dos de las tres fases (no cambie la conexión a tierra)

Filtros rociadores (CONAGUA, 2019c)	Incremento de sólidos suspendidos en el efluente del clarificador secundario	Sobrecarga hidráulica en el clarificador	Comprobar que el clarificador no se desborde por la superficie. Si es posible, reducir la carga superficial.
Lodos activados (CONAGUA, 2019f)	Flóculo pequeño y pesado, efluente turbio, flóculo de rápida sedimentación	Edad de lodos alta	Disminuir la recirculación de lodos. Aumentar la purga de lodos.

En la presente tesis se muestra el procedimiento para lograr el arranque exitoso de la planta de tratamiento de agua, desde elaborar instrucciones, recomendaciones, y documentos de seguimiento hasta la medición de parámetros analíticos para determinar la calidad del agua y así evaluar la remoción de contaminantes asegurando un arranque de proceso exitoso.

Objetivos

Objetivo general

- ❖ Arranque de un sistema de tratamiento usando la tecnología RBT mediante una estrategia metodológica basada en la puesta en marcha de plantas de tratamiento de agua para determinar el tiempo de arranque de la tecnología.

Objetivos particulares

- ❖ Instalar y examinar los equipos principales que conforman el sistema de tratamiento mediante la integración de los equipos periféricos y el RBT para el acondicionamiento previo de la planta.
- ❖ Evaluar el desempeño de la tecnología bajo condiciones de recirculación total y operación continua a un flujo de 11 m³/d mediante la medición de parámetros de calidad del agua para evaluar la remoción de contaminantes en estas condiciones
- ❖ Elaborar el manual de arranque del sistema de tratamiento usando la tecnología RBT, a partir de tecnologías de tratamiento de agua residual establecidas, el manual servirá como guía para el arranque de la tecnología.

CAPITULO I

Marco teórico

1.1 Aguas Residuales

Todas las ciudades generan residuos sólidos, líquidos y gaseosos, a los residuos líquidos se les conoce como aguas residuales. De acuerdo con Metcalf & Eddy, el agua residual es esencialmente el agua que desprende la comunidad una vez que ha sido contaminada debido a los diferentes usos para los cuales se empleó. Desde el punto de vista de las fuentes de generación, es posible definir al agua residual como una combinación de los residuos líquidos, o aguas portadoras de residuos, procedentes tanto de residencias como de instituciones públicas y establecimientos industriales y comerciales, a los que pueden agregarse, eventualmente, aguas subterráneas, superficiales y pluviales (Metcalf & Eddy, 2003).

La composición del caudal de agua residual varía con respecto a la fuente que provenga, por el hecho mismo, debe idearse un tren de tratamiento que sea capaz de tratar el afluente en cuestión. A continuación, se muestra la clasificación de las diferentes fuentes de aguas residuales (Riffat, 2013) :

- Aguas residuales domésticas o municipales: se incluyen aguas residuales descargadas de residencias, instituciones como escuelas y hospitales, e instalaciones comerciales como restaurantes, centros comerciales, etc.
- Aguas residuales industriales: aguas residuales descargadas de procesos industriales, por ejemplo, la industria farmacéutica, alimentaria y el procesamiento de aves de corral.
- Infiltración y afluencia: esto incluye el agua que eventualmente ingresa al alcantarillado desde las tuberías con fugas, pozos de acceso sumergidos e infiltración de aguas subterráneas, entre otros.
- Aguas pluviales: escorrentía de lluvia y deshielo.

Diariamente, los efluentes generados constituyen una de las principales causas de contaminación de los cuerpos de agua receptores. Algunos de estos contaminantes son microorganismos patógenos, fósforo, nitrógeno, hidrocarburos, metales pesados y materia orgánica. Las enfermedades causadas por bacterias, virus y protozoos son los riesgos para la salud más comunes asociados con las aguas no tratadas. Además, la presencia de fósforo y nitrógeno en cantidades excesivas conduce hacia la eutrofización de las fuentes de agua, lo que también puede crear condiciones ambientales que favorezcan el crecimiento de cianobacterias productoras de toxinas. La exposición crónica a algunas de esas toxinas podría causar muchas otras enfermedades (Akpor et al., 2014).

En la Tabla 2, se muestran los impactos ambientales de los principales contaminantes presentes en las aguas residuales.

Tabla 2 Impactos ambientales de los principales contaminantes presentes en las aguas residuales.

Contaminante	Fuente	Impacto ambiental en las aguas receptoras
Sólidos suspendidos	Aguas residuales municipales, aguas pluviales.	Capa de escoria en la superficie del agua, depósitos de lodo
Materia orgánica	Aguas residuales municipales, posibles aguas residuales industriales	Agotamiento de oxígeno disuelto en función de la DBO y DQO, condiciones anaeróbicas, muerte de peces
Nutrientes	Aguas residuales municipales, aguas residuales industriales	Eutrofización y deterioro de la calidad del agua
Patógenos	Aguas residuales municipales	Transmisión de enfermedades
Metales pesados	Aguas residuales industriales.	Toxico para la vida acuática

Nota: Adaptado de Fundamentals of wastewater treatment and engineering, (Riffat, 2013)p.77. Copyright por Taylor & Francis Group

1.2 Aguas Residual Doméstica

Las aguas residuales domésticas suelen ser el principal componente de las aguas residuales y a menudo se utilizan como sinónimo. El caudal y la composición de las aguas residuales varían considerablemente de un lugar a otro, básicamente dependiendo de los aspectos económicos, el comportamiento social, las condiciones climáticas, el consumo de agua, el tipo y las condiciones de los sistemas de alcantarillado, etcétera. No es raro que el agua contaminada por sustancias orgánicas asociadas con residuos animales o alimentos o aguas residuales tenga una demanda de oxígeno que exceda la solubilidad máxima de equilibrio del oxígeno disuelto. En tales circunstancias, a menos que el agua se airee continuamente, pronto se agotará de su oxígeno, y los peces que viven en el agua morirán (Doble & Kumar, 2005).

Las aguas residuales municipales contienen aproximadamente 99,9% de agua. Los constituyentes restantes incluyen sólidos suspendidos (sedimentables y no sedimentables) y sólidos disueltos que tienen componentes orgánicos e inorgánicos, así como microorganismos (Qasim & Zhu, 2018). Estos constituyentes otorgan cualidades físicas, químicas y biológicas que son características de las aguas residuales residenciales, las cuales se enlistan a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3 Características físicas, químicas y biológicas del agua residual.

Propiedad	Características.
Físicas	<ul style="list-style-type: none"> •Color, olor •Sólidos, temperatura
Constituyentes químicos orgánicos	<ul style="list-style-type: none"> •Carbohidratos •Grasas animales, aceites y grasas. •Pesticidas, fenoles •Proteínas •Agentes tensoactivos •Compuestos orgánicos volátiles
Constituyentes químicos inorgánicos	<ul style="list-style-type: none"> •Alcalinidad •Cloruros •Metales pesados •Nitrógeno y fósforo •pH
Gases	<ul style="list-style-type: none"> •Sulfuro de hidrógeno •Metano •Oxígeno
Constituyentes biológicos	<ul style="list-style-type: none"> •Eubacterias •Arqueobacterias •Virus

Nota: Adaptado Ingeniería de Aguas Residuales, (Metcalf & Eddy, 1995) p.54 Copyright por McGraw Hill

Por lo tanto, es preferible utilizar parámetros indirectos que representen el carácter o el potencial del contaminante de las aguas residuales en cuestión. Los siguientes parámetros mostrados en la Tabla 4 se definen los parámetros de calidad de las aguas residuales municipales y sus rangos de concentración comunes.

Tabla 4 Características típicas de aguas residuales municipales no tratadas.

Componente	Rango de concentración
Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO ₅ a 20°C	100-360 mg/L
Demanda Química de Oxígeno, DQO	250-1000 mg/L
Carbono Orgánico Total, COT	80-300 mg/L
Nitrógeno Total Kjeldahl, NTK	20-85 mg/L
Fósforo total	5-15 mg/L
Grasas y aceites	50-120 mg/L
Sólidos totales, ST	400-1200 mg/L
Sólidos disueltos totales, SDT	250-850 mg/L
Sólidos suspendidos totales, SST	110-400 mg/L
Sólidos suspendidos volátiles, SSV	90-320 mg/L
Sólidos suspendidos fijos, SSF	20-80 mg/L
Sólidos sedimentables	5-20 mg/L
Coliformes totales	10 ⁶ -10 ¹⁰ No. /100 ml
Coliformes fecales	10 ³ -10 ⁸ No. /100 ml

Nota: Adaptado de Fundamentals of wastewater treatment and engineering, (Riffat, 2013)p.77. Copyright por Taylor & Francis Group

1.3 Tratamiento de aguas residuales

Las aguas residuales se pueden tratar usando cualquier o una combinación de los siguientes tipos de métodos de tratamiento, según la naturaleza de los contaminantes y el nivel de remoción deseado, es decir, los estándares de calidad de efluentes establecidos por las autoridades reguladoras federales, estatales y regionales para prevenir muchas condiciones ambientales adversas que pueden desarrollarse debido al vertido inadecuado de las aguas residuales.(Qasim & Zhu, 2018).

1.3.1 Pretratamiento

El agua residual frecuentemente es llevada a la planta de tratamiento por gravedad para iniciar con el pretratamiento. Por lo tanto, se requiere una estación de bombeo para elevar las aguas residuales a un nivel adecuado para facilitar el flujo por gravedad a través de la planta (Davis, 2020). El tratamiento preliminar generalmente cumple tres funciones importantes: eliminación de materiales sólidos intratables, protección de las unidades de tratamiento posteriores, y mejora del rendimiento de las unidades de tratamiento posteriores (Davis, 2010). Las operaciones de la unidad de tratamiento preliminar incluyen rejillas, trituradoras, remoción de arena y equalización de flujo.

1.3.1.1 Mamparas y cribas

Las mamparas y cribas se utilizan para eliminar los desechos de gran tamaño de las aguas residuales. Estos desechos pueden dañar las bombas o pueden asentarse en los canales o tuberías y obstruirlos. Los materiales eliminados en las pantallas y cribas son relativamente no biodegradables, estos se recogen y se desechan en un vertedero (Droste & Gehr, 2019).

Como alternativa al cribado, se puede utilizar la trituración para reducir los sólidos a un tamaño que permita su ingreso a la planta sin causar problemas mecánicos ni obstrucción. Los procesos de trituración incluyen dispositivos de conminución y barminución. El conminutor consta de una pantalla o canasta ranurada, un cortador giratorio u oscilante y un cortador estacionario. Los sólidos pasan a través de la pantalla y se cortan o Trituran entre los dos cortadores. Por otro lado, el barminutor utiliza una criba de barras que recoge los sólidos para eliminarlos en un proceso posterior (Spellman, 2009).

1.3.1.2 Remoción de arena

La arena, la grava, los vidrios rotos y otros materiales que tienen una velocidad de sedimentación sustancialmente mayor que la del material orgánico en las aguas residuales se denominan gravilla. Es necesario implementar un sistema de eliminación de arena para proteger el equipo mecánico de la abrasión y el desgaste, reducir la formación de depósitos en tuberías así como canales, y reducir la

frecuencia de la limpieza de los equipos posteriores debido a la arena acumulada. Hay cuatro tipos generales de sistemas de eliminación de arena: desarenadores de flujo horizontal, tanques de detritos, desarenadores aireados y desarenadores de flujo vortex (Davis, 2020).

1.3.1.3 Ecuilización

Cuando las variaciones en la cantidad y la calidad del flujo son significativas, se incorporan depósitos de retención cerca del tren de tratamiento para permitir que las aguas residuales ingresen a la planta a una tasa y calidad más uniformes. Los flujos y concentraciones más uniformes reducen la variabilidad del tratamiento y permiten diseñar una planta de tratamiento de aguas residuales más compacta con una mayor eficiencia de todas las unidades (Droste & Gehr, 2019).

1.3.2 Tratamiento primario

En los tratamientos primarios se elimina una fracción de los sólidos en suspensión, ya sean orgánicos o minerales. En el caso de algunas aguas residuales municipales los tratamientos primarios pueden reducir del 50% al 65% de los sólidos suspendidos y entre el 25 y 50% de la DBO y DQO en afluentes de una planta de tratamiento. Algunos sistemas de tratamiento primario pueden ser utilizados dentro de los procesos de tratamientos secundarios, y no necesariamente como tratamiento primario aislado (Quiroz et al., 2019). En la Tabla 5 se muestran algunos de los procesos más comunes en el tratamiento primario.

Tabla 5 Aplicaciones y procesos de tratamiento primario.

Operación	Aplicación
Mezclas	Mezcla de productos químicos y gases con aguas residuales y mantenimiento de sólidos en suspensión
Floculación	Promueve la agregación de partículas pequeñas en partículas más grandes para mejorar su eliminación mediante sedimentación por gravedad
Sedimentación	Eliminación de sólidos sedimentables y espesamiento de lodos
Flotación	Eliminación de partículas y sólidos suspendidos finamente divididos con densidades cercanas a la del agua, también espesa los lodos biológicos

Nota: Adaptado de Handbook of Treatment Wastewater Water and Technology, (Cheremisinoff, 1995) p.100 . Copyright por Taylor & Francis Group.

1.3.3 Tratamiento secundario

El propósito principal del tratamiento secundario convencional es oxidar fácilmente la DBO que escapa al tratamiento primario y proporcionar una mayor eliminación de sólidos en suspensión. Debido al creciente reconocimiento de los efectos nocivos

de los nutrientes, el tratamiento secundario a menudo incluye tratamiento de nitrógeno y fósforo (Davis, 2010).

1.3.3.1 Tipos de tratamiento secundario

Los procesos bioquímicos de tratamiento se clasifican desde tres perspectivas. La **primera**: transformación bioquímica (remoción de materia orgánica soluble; estabilización de materia orgánica insoluble y conversión de materia inorgánica insoluble); la **segunda**: ambiente bioquímico, relacionado con los aceptores de electrones (aerobio y anaerobio), el proceso anaerobio se caracteriza por tener una baja tasa de síntesis bacteriana, es decir, una baja producción de lodos de desecho, por lo contrario, en el tratamiento aerobio, una mayor cantidad de energía del sustrato es utilizada para la síntesis celular, por lo que hay una mayor generación de biomasa como lodo no estabilizado (Noyola et al., 2013); y la **tercera**: configuración del reactor, concerniente a la forma en que los microorganismos crecen en el sistema (suspendidos en el líquido sometido a tratamiento o adheridos a un soporte sólido). En los reactores de crecimiento adherido o biomasa fija, los microorganismos crecen formando una biopelícula sobre un soporte sólido ya sea natural o sintético. Esto significa que los donadores y aceptores de electrones, así como todos los nutrientes, llegan hasta los microorganismos contenidos en la biopelícula por difusión u otros procesos de transporte de masa (CONAGUA, 2019b).

De este modo, en la Tabla 6 se muestran los sistemas de tratamiento biológico usados comúnmente en la industria con una breve descripción de cada uno.

Tabla 6 Procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales.

Ambiente bioquímico y configuración	Proceso de tratamiento	Descripción
Aerobio. Biomasa fija	Filtro rociador (CONAGUA, 2019b)	El agua residual se deja escurrir sobre un filtro empacado con piedra o con algún medio sintético.
Aerobio. Biomasa fija	Discos biológicos. (CONAGUA, 2019b)	Están formados por discos de plástico o de algún otro material en donde se adhiere la biopelícula, sujetos y soportados por una flecha horizontal rotatoria
Anaerobio. Biomasa fija	Filtro anaerobio de flujo ascendente. (CONAGUA, 2019b)	Se compone por una columna rellena con un medio sólido para soporte del crecimiento biológico anaerobio
Aerobio/ Anaerobio. Biomasa fija	Reactor Biológico de Membranas. MBR (Judd, 2011)	Integra una membrana permeable selectiva con un proceso biológico. La membrana se emplea aparentemente como un filtro

Tabla 6 Procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales.

Ambiente bioquímico y configuración	Proceso de tratamiento	Descripción
Aerobio. Biomasa fija	Reactor de biofilm de lecho móvil. (Canut et al., 2016)	Reactor biológico lleno de soportes flotantes con biomasa adherida o carriers.
Aerobio. Biomasa suspendida	Lodos activados (Barbera & Gurnari, 2018)	Se compone de un contenedor, agua residual, microorganismos en suspensión y un suministro continuo de oxígeno gaseoso
Aerobio. Biomasa suspendida	Zanjas de oxidación (Wang et al., 2009)	Está equipada con rotores de aireación o cepillos que proporcionan aireación y circulación

El grupo encargado de la selección de una tecnología o sistema de tratamiento de aguas residuales debe considerar aspectos técnicos, económicos, ambientales y hasta sociales. Esto hace que el responsable de la toma de decisiones y su equipo de apoyo deban evaluar varios aspectos. Una tecnología tenderá a ser sustentable cuando en su concepción y características considere el menor uso de insumos y energía posible, se adapte adecuadamente a las condiciones del medio social y económico que le rodea. De manera general, en la Tabla 7 se muestra una serie de ventajas y desventajas de los distintos sistemas de tratamiento de agua residual existentes en el mercado.

Tabla 7 Ventajas y desventajas de sistemas biológicos para el tratamiento de agua residual.

Sistema biológico	Ventajas	Desventajas
Filtro percolador. (Hazen & Sawyer, 2011)	<ul style="list-style-type: none"> •Proceso biológico sencillo y confiable. •Eficaz en el tratamiento de altas concentraciones de material orgánico •Reduce rápidamente la DBO soluble •Bajos requerimientos de energía •Se necesitan niveles moderados de habilidad y experiencia para manejar y operar el sistema 	<ul style="list-style-type: none"> •Puede ser necesaria la utilización de tratamientos adicionales para cumplir con normas estrictas •Requiere atención regular por parte del operador •Necesita de bajas cargas dependiendo del medio filtrante •Problemas de olores, crecimiento de bacterias filamentosas y vectores

Tabla 7 Ventajas y desventajas de sistemas biológicos para el tratamiento de agua residual.

Sistema biológico	Ventajas	Desventajas
Discos biológicos. (Cortez et al., 2013)	<ul style="list-style-type: none"> •Mecánicamente simple, fácil de operar y supervisar, silencioso •La configuración modular permite una fácil construcción y expansión •Bajo costo de operación, mantenimiento y requerimiento de tierra •Tiempos de retención hidráulica cortos y alta eficiencia de transferencia de oxígeno •Alta concentración de biomasa por reactor de volumen y baja generación de sólidos 	<ul style="list-style-type: none"> •Rendimiento susceptible a las características de las aguas residuales •Capacidad limitada para escalar •Arranque lento del proceso •Debe estar protegido contra la luz solar, la lluvia y la nieve. •Requiere mano de obra técnica calificada permanente para operación y mantenimiento.
Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB) (Daud et al., 2018)	<ul style="list-style-type: none"> •Construcción simple, bajo costo de operación y mantenimiento debido al material de construcción. •Robustez en la eficiencia del tratamiento y amplia aplicabilidad de pequeña a gran escala •Menos emisiones de CO₂ debido a un menor requerimiento de energía y producción de energía adicional en forma de biogás que se puede utilizar para hacer funcionar el sistema 	<ul style="list-style-type: none"> •Problema de olor, toxicidad y corrosión. El biogás necesita un manejo adecuado adicional para evitar malos olores. •En las regiones frías, la temperatura debe mantenerse entre (15 y 35 °C) para lograr un rendimiento constante. •Una parte considerable del biogás producido puede disolverse en el efluente cuya recuperación es necesaria
Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (Tilley et al., 2020)	<ul style="list-style-type: none"> •Bajos costos de operación •Larga vida útil •Alta reducción de DBO y sólidos, y baja producción de lodo •Necesita un terreno de tamaño moderado (se puede construir bajo tierra) 	<ul style="list-style-type: none"> •Requiere diseño y construcción por parte de expertos •Baja reducción de patógenos y nutrientes •Alto riesgo de obstrucción, dependiendo del tratamiento primario •Remover y limpiar el material del filtro es desagradable
Lodos Activados. (Ghodeif, 2013)	<ul style="list-style-type: none"> •Altas eficiencias de tratamiento posibles para DBO, DQO, SST, N, P. •Alta flexibilidad en las condiciones de funcionamiento. •Alta calidad de efluentes 	<ul style="list-style-type: none"> •Baja eliminación de patógenos. •Requiere personal especializado y automatización •Dependencia de suministro eléctrico ininterrumpido •Altos requisitos de mantenimiento •Dependencia de algunos repuestos extranjeros casi inevitable

Tabla 7 Ventajas y desventajas de sistemas biológicos para el tratamiento de agua residual.

Sistema biológico	Ventajas	Desventajas
Zanjas de Oxidación. (EPA, 2000)	<ul style="list-style-type: none"> •La eficiencia de operación en cuanto al uso de energía da como resultado la reducción de consumo de electricidad en relación con otros procesos biológicos de tratamiento 	<ul style="list-style-type: none"> •Las concentraciones de sólidos suspendidos en el efluente son relativamente altas en comparación con otras modificaciones del proceso de lodos activados. •Requiere una superficie de terreno más grande que otras opciones de tratamiento con lodos activados. Esto puede ser muy costoso
Reactor Biológico de Membranas. (Al-Asheh et al., 2021)	<ul style="list-style-type: none"> •Tamaño del biorreactor se reduce considerablemente dado que no es necesario el tanque de sedimentación. •Reduce la generación de lodos activados como residuos. •Generación de efluente tratado de alta calidad debido a la existencia de una membrana con un tamaño de poro menor que los sólidos en suspensión. Por lo tanto, excluyendo el requisito de realizar un tratamiento terciario. 	<ul style="list-style-type: none"> •Los fenómenos de ensuciamiento son un problema común de MBR que requiere varias estrategias operativas para reducir la propensión al ensuciamiento de la membrana. •Mayores costos operativos y de capital están involucrados con el proceso MBR debido al costo de membrana y antiincrustantes •Complejidad del proceso debido principalmente al mantenimiento de membranas y métodos de limpieza.
Reactor Biológico de Lecho Móvil. (Genesis Water Tech, 2019)	<ul style="list-style-type: none"> •Baja producción de lodos •Menor área requerida •Rendimiento del proceso independiente del clarificador secundario 	<ul style="list-style-type: none"> •Se necesita un operador experto •Se requiere monitoreo bacteriano manual

1.3.3.2 Reactores de biopelícula

En los reactores de biopelícula, los microorganismos se encuentran inmovilizados formando una capa densa, la cual crece adherida a una superficie sólida. Para mantener la biomasa activa en el reactor de biopelícula no se requiere de un proceso de sedimentación. Las bacterias en suspensión pueden ser eliminadas por el flujo de agua; sin embargo, las bacterias que se encuentran en la biopelícula no son afectadas por este flujo de agua y pueden crecer en zonas en donde la fuente de alimento se encuentre de manera abundante. La formación de una biopelícula en el sistema, por lo tanto, dependerá del arrastre de la biomasa suspendida o el tiempo de retención de sólidos (López et al., 2008).

La naturaleza de las biopelículas y su alta gama de aplicaciones han dado lugar al desarrollo de distintas configuraciones de reactores, estos diseños se basan principalmente, en la naturaleza de la reacción catalítica, productividad del reactor, acumulación de microorganismos, estabilidad del proceso y los requerimientos de aireación (García, 2018) Las principales tecnologías de biopelícula para el tratamiento de aguas residuales se pueden resumir en la Tabla 8.

Tabla 8 Tecnologías de biopelícula aplicadas en el tratamiento de aguas residuales.

Categoría	Tecnología	Observaciones
Soportes fijos	Filtro percolador	Las modificaciones que esta tecnología ha sufrido a lo largo del tiempo han sido principalmente en el material de soporte para fijar los microorganismos que van desde piezas de madera hasta soportes plásticos con diferentes áreas superficiales
	Filtros biológicos aireados	Se ha trabajado con la configuración de flujo ascendente y descendente. El flujo ascendente no provoca una colmatación del lecho y el crecimiento de la biomasa es controlado con retro lavados en el soporte
Soportes móviles	Biodiscos.	El primer material de soporte fueron discos de madera, la evolución en esta tecnología ha sido hacia usar materiales plásticos y aumentar el volumen inundado del disco. últimamente se han utilizado biodiscos con una gran fracción hueca que aumenta el área disponible para formar la biopelícula.
	MBBR	Combina la tecnología de biomasa en suspensión con la tecnología de biopelícula, se han utilizado desde soportes comerciales Kaldness hasta cubos de poliuretano. Es la tecnología más novedosa con la que se cuenta actualmente en el ámbito de sistemas de biopelícula.

Nota: Adaptado de Estudio de un reactor biológico de biopelícula fija a escala laboratorio como el uso de materiales no tejidos para la fijación de la biomasa. (García, 2018), p. 24-25.

1.3.3.3 Reactor Biológico Tubular (RBT)

Debido a la creciente necesidad del tratamiento de agua residual, se desarrolló el Reactor Biológico Tubular (RBT), este sistema es una tecnología novedosa, compacta y de bajo costo para tratar aguas residuales domésticas e industriales a pequeña escala in situ. Su funcionamiento se basa principalmente en la degradación biológica aerobia de los contaminantes disueltos en las aguas residuales por medio de los microorganismos acumulados dentro del reactor. Además, el sistema es modular y se puede utilizar en ciudades donde los requisitos de espacio son limitados o en áreas rurales donde no existe infraestructura. (García & Durán, 2017).

El Reactor Biológico Tubular está conformado por cuatro partes modulares; la primera corresponde a un soporte metálico que le proporciona estabilidad al sistema, la segunda parte se integra por 8 tubos de PVC de 6" cedula 80 (confiriéndole resistencia a altas presiones), la longitud de cada tubo es de 2 metros por lo que en total proporciona 16 metros de largo. En el interior del reactor se localiza la tercera parte del sistema; una fibra polimérica no tejida de poliéster con una configuración especial que sirve de soporte para los microorganismos que

degradan la materia orgánica del agua residual a tratar, ésta consiste en 5 círculos concéntricos con cierta separación para permitir el flujo del agua cruda con oxígeno disuelto. La alta porosidad de la fibra le permite tener un área superficial basta en un volumen pequeño y puesto que el área superficial de la fibra es proporcional al área de biopelícula se cuenta con una extensa zona de tratamiento (García, 2018).

En la parte inferior del reactor se encuentra la cuarta parte; un difusor de aire el cual tiene una membrana semipermeable que genera burbujas de milímetros de diámetro. Este difusor otorga el oxígeno disuelto necesario para la degradación aerobia en el reactor a partir del metabolismo de los microorganismos que utilizan el oxígeno y la materia orgánica presente para su crecimiento celular, por lo que disminuye la DBO del agua. Los esfuerzos cortantes mantienen una biopelícula óptima ya que el grosor se mantiene a pesar del crecimiento celular lo que evita la colmatación en los tubos. El reactor cuenta con recirculación al final del módulo para así mejorar la remoción de materia orgánica aumentando los tiempos de residencia hidráulicos.

1.3.4 Tratamiento terciario

La desinfección es un paso importante en la desactivación de organismos potencialmente dañinos para disminuir los riesgos de enfermedad asociados con la descarga de aguas residuales que contienen patógenos humanos (organismos causantes de enfermedades) en las aguas receptoras. Estos microorganismos están presentes en grandes cantidades en los efluentes de aguas residuales, y los brotes de enfermedades transmitidas por el agua a lo largo de la historia se han atribuido directamente al agua potable contaminada por el contacto con las aguas residuales. Los patógenos de mayor preocupación son las bacterias entéricas (intestinales), los virus y parásitos. Las enfermedades que se pueden propagar a través de la contaminación bacteriana incluyen cólera y gastroenteritis por *Escherichia coli* (WEF, 2008)

1.4 Arranque del proceso

La puesta en marcha es el proceso de poner en servicio nuevas instalaciones, idealmente después de que se complete la construcción. Sin embargo, de manera más realista, la puesta en marcha suele ser una serie de pasos que no son tan coordinados como se pretendían. La planificación de la puesta en marcha debe realizarse como parte de la fase de diseño para identificar los aspectos relacionados con la construcción que podrían convertirse en problemas tanto en esta etapa como durante la puesta en marcha (AWWA & ASCE, 2005). Desde un punto de vista operativo, idealmente la puesta en marcha debería proceder en la siguiente secuencia:

- ✓ Definir instalaciones a poner en marcha.

- ✓ Preparar y revisar un plan de puesta en marcha.
- ✓ Construcción completa de las instalaciones.
- ✓ Examinar, verificar y aceptar nuevas instalaciones.
- ✓ Adquirir los productos y herramientas necesarios.
- ✓ Establecer los requisitos de laboratorio o arreglos para servicios de laboratorio externos.
- ✓ Verificar procedimientos operativos.
- ✓ Definir los requisitos de muestreo y seguimiento del proceso.

El arranque de cualquier proceso lleva tiempo y deben tenerse ciertos cuidados para lograr su estabilización, así como un buen funcionamiento del proceso. Un arranque típico se compone de dos fases: arranque mecánico y arranque del proceso. Técnicamente, la estabilización del proceso ocurre cuando las concentraciones de los parámetros monitoreados, tales como DBO, DQO, SST, NT, PT, G y A, coliformes fecales, entre otros en el agua residual tratada; sea igual o menor a la calidad del agua establecida en los lineamientos de diseño o en la norma legislativa (CONAGUA, 2019f). Las actividades requeridas antes de arrancar son: análisis del agua residual, revisión del equipo electromecánico y revisión hidráulica de tuberías.

1.5 Actividades requeridas antes de iniciar el proceso de arranque

Para garantizar un procedimiento de puesta en marcha adecuado, es necesaria la revisión documental y de campo previo al arranque de una instalación nueva, esto con el objetivo de verificar que se hayan cumplido los aspectos de seguridad industrial, y operativa.

1.5.1 Análisis del agua residual

Las PTAR's son diseñadas bajo ciertos criterios o parámetros de calidad de agua residual, por lo que, si las concentraciones de los parámetros del agua a tratar están muy por arriba o por debajo de las propuestas en el diseño; se tendrá dificultad en el arranque y por tanto en la estabilización del proceso, lo que no permitirá alcanzar la calidad de agua residual tratada estipulada en la norma (CONAGUA, 2019f).

1.5.2 Revisión del equipo electromecánico

La revisión de los equipos electromecánicos describe medidas para determinar y evaluar el estado actual de los componentes técnicos de un sistema, este proceso se basa principalmente en la inspección. La inspección comprende instrucciones

dirigidas para determinar y evaluar el estado actual de los equipos electromecánicos mediante la vigilancia, la comparación y pruebas (CONAGUA, 2019g).

1.5.3 Revisión hidráulica de tuberías y tanques

Una vez concluida la revisión de equipos y la reparación de las fallas que se hayan presentado se procederá a realizar el llenado de las unidades para verificar que no existan fugas o grietas en las paredes. De esta manera se llevarán a cabo las pruebas hidráulicas correspondientes asegurando que las tuberías no permitan la salida del agua y no sufra alguna discontinuidad estructural (Konwitschny, 2016).

1.6 Problemas comunes en el arranque de las tecnologías de tratamiento de agua residual

La problemática del arranque de un sistema de tratamiento de agua residual consiste en mantener las condiciones adecuadas para el crecimiento de la biomasa, donde los factores más importantes son los nutrientes. Estos últimos pueden variar mucho dependiendo del origen del agua y en el caso de las aguas residuales domésticas, aunque los valores de los diferentes componentes se encuentran balanceados, normalmente la concentración de los nutrientes es muy baja (Pacheco & Magaña, 2003).

1.7 Seguimiento del arranque

Como parte de la operación de la PTAR, se contempla la toma de muestras para realizar el análisis al agua correspondiente, este proporcionará información de gran importancia para el óptimo control del proceso. Las muestras por colectar se clasifican en simples o compuestas, la primera es una muestra individual que consiste en una porción de agua tomada a cualquier hora del tratamiento. La segunda categoría consiste en porciones tomadas en intervalos de tiempo conocidos y luego combinados en volúmenes proporcionales al flujo. Esta muestra compuesta se considera representante de las características del agua residual de todo el periodo de muestreo. Dependiendo de los parámetros analíticos, las muestras deben preservarse de 3°C o 4°C para prevenir la alteración de resultados por microorganismos (CONAGUA, 2019d).

Asimismo, es necesario elaborar un diagrama de flujo de la PTAR para establecer los puntos de muestreo y con esto determinar el plan de muestreo que se llevará a cabo. En dicho plan se indica el número de muestras a entregar al laboratorio, así como los parámetros que se van a determinar, dependiendo del objetivo de muestreo. Este programa de muestreo debe contener objetivo, antecedentes, tipo de muestreo, control de calidad, ubicación y descripción de los puntos de muestreo (CONAGUA, 2019c).

CAPÍTULO II

Metodología

El presente trabajo se llevó a cabo en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales San Lorenzo Xochimilco, así como en el Laboratorio 301 del Conjunto E en la Facultad de Química. La PTAR está ubicada en la Calle de Adelaida 55, San Lorenzo, Xochimilco, 16040 Ciudad de México, CDMX, con coordenadas 19.27, -99.10. A poco más de un kilómetro del centro de Xochimilco y de la zona del embarcadero. En la Figura 1 se muestra la localización de la planta.

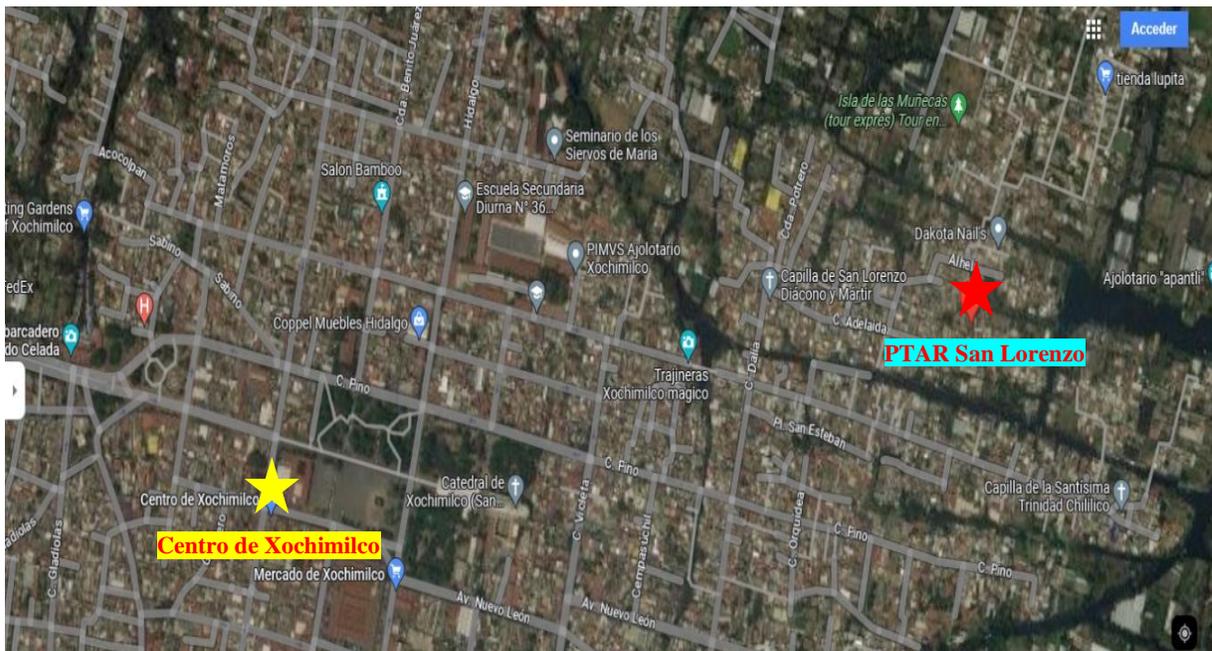


Figura 1 Plano de localización de la PTAR San Lorenzo Xochimilco.

El agua residual que recibe la PTAR proviene principalmente del canal de San Lorenzo, que tiene 1.9 m de profundidad y aproximadamente 3.8 m de ancho. Este proyecto se basa en una serie de actividades mostradas a continuación para su desarrollo:

1. Identificación del problema.
2. Estudio del problema.
3. Diseño conceptual de la PTAR San Lorenzo Xochimilco.
4. Planeación del arranque de la PTAR San Lorenzo Xochimilco.
5. Construcción de la tecnología del “Reactor Biológico Tubular”
6. Acondicionamiento de la PTAR e instalación de los equipos.

7. Arranque de la planta.
8. Análisis del proceso.

2.1 Identificación del problema

El daño al sistema lacustre de Xochimilco, que es el último remanente del conjunto de los lagos que albergaba la cuenca del Valle de México; es preocupante. La zona está inmersa entre asentamientos irregulares y descargas de desechos en sus canales que ponen en riesgo su calificación internacional de Patrimonio Cultural de la Humanidad. Las colonias con mayor número de predios con descargas de aguas grises y negras se sitúan en el centro de la demarcación, justo donde están los barrios colindantes con la zona chinampera y que a lo largo de los años han sido invadidos por venta ilegal o herencias entre las familias. Así destacan el barrio de Caltongo, Tlacoapa, San Lorenzo y la Asunción, estas cuatro colonias representan 60 por ciento de las descargas de agua residual (Fernández, 2015). En la Figura 2 se muestra el estado actual del canal de San Lorenzo.



Figura 2 Canal de San Lorenzo Xochimilco.

2.2 Estudio del problema

Se determinó el tren de tratamiento adecuado para las aguas residuales y se redactó la filosofía de operación de la planta. Posteriormente, se recabó información sobre los equipos de pretratamiento provenientes de las fichas técnicas y manuales de operación, obteniendo así características necesarias para la planeación del arranque. Asimismo, se buscó información especializada sobre la puesta en marcha de diferentes sistemas de tratamiento biológico para la elaboración de un manual de arranque. En la Tabla 9 se enlistan algunos sistemas de tratamiento secundario establecidos y puestos en operación que se reportan en la literatura.

Tabla 9 Periodo de arranque y estabilización de diferentes sistemas biológicos.

Sistema biológico	Escala	Periodo de arranque y estabilización	Comentarios	Autor
Reactor de manta de lodos granulares anaeróbicos (GSB)	Industrial 200 m ³ /día	52 días	Aguas residuales que contienen una alta concentración de ácido acrílico provenientes de una planta de polímeros súper absorbentes	(Show et al., 2020)
Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB) + Biofiltro anaerobio	Piloto. 1000 L/día	262 días	Aguas residuales provenientes de 12 unidades domésticas	(Dorji et al., 2022)
Biorreactor de membrana cerámica anaeróbica (AnCMBR)	Laboratorio. 15 L	60 días	Tratamiento de aguas residuales domésticas simuladas	(Nilusha et al., 2021)
Reactor de Biofilm de Lecho Móvil (MBBR)	Industrial 3.5 MLD	10 meses	Planta de tratamiento de aguas residuales de Srinagar, estado de Garhwal de la India	(Osmani et al., 2021)
Reactor de Biopelícula Aireada por Membrana (MABR)	500 L/día	2.5 meses	Reactor de biopelícula aireada por membrana a escala piloto que tratan las aguas residuales domésticas	(Anh-Vu et al., 2022)

La duración del arranque depende de parámetros biológicos, químicos y físicos. El arranque está influenciado por la concentración y composición de las aguas residuales, el volumen, la actividad y la adaptación del inóculo, condiciones ambientales, parámetros de operación y por último la configuración del reactor. (CONAGUA, 2019e).

2.3 Diseño conceptual

La PTAR San Lorenzo Xochimilco está constituida por los siguientes equipos:

- I. Tratamiento primario: dos estaciones de bombeo de 1 HP marca Truper, un Hidrociclón WIDE RAIN y una criba estática metálica de 5 mm.

- II. Tratamiento secundario: Reactor Biológico Tubular con un soplador Vortex Blower marca Hailea, un filtro de discos Azud para los lodos de purga y una bomba centrífuga marca SIEMENS.

El agua residual es recolectada del canal en el primer cárcamo de bombeo y es transportada a los equipos de pretratamiento donde se retira la materia en suspensión insoluble, el hidrociclón remueve las arenas y la criba se encarga de retirar la materia de mayor tamaño como hojas, ramas y residuos de lirio acuático, esto con el fin de evitar que estos componentes entren al reactor y dañen la configuración o la integridad de la biomasa. El agua pretratada se dirige al segundo cárcamo de bombeo donde se lleva a cabo la alimentación del reactor biológico tubular. El RBT cuenta con una corriente de tratamiento de lodos que se operará una vez al mes para prevenir la colmatación de biomasa en el interior del reactor, una corriente recirculación al cárcamo de bombeo para aumentar los tiempos de residencia hidráulicos y el efluente que es dirigido nuevamente al canal de San Lorenzo. En el **ANEXO I** se muestra el Diagrama de Tubería e Instrumentación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales San Lorenzo Xochimilco.

2.4 Planeación del Arranque de la PTAR San Lorenzo Xochimilco

De manera general, la metodología de arranque propuesta se muestra a continuación:



2.4.1 Inspección en el pre-arranque

Para el inicio exitoso de la operación de una planta se requiere de una fase de pre-acondicionamiento y acondicionamiento, que debe ser planificada de manera temprana puesto que es clave para preservar la integridad de la inversión, las instalaciones y el personal involucrado. Los factores ambientales que afectan al proceso son muchos como para iniciar el arranque sin preparación previa. Las actividades requeridas antes de arrancar son:

2.4.1.1 Análisis del agua residual

En el arranque de una planta es esencial contar con datos básicos sobre la composición del afluente de agua residual, por lo tanto, se midieron los siguientes parámetros fisicoquímicos para determinar la calidad del agua que alimentó la PTAR San Lorenzo: ST, SDT, SDF, SDV, SST, DQO, NT, N-NH₄, FT, pH, Turbidez, Alcalinidad y Acidez.

2.4.1.2 Revisión del equipo electromecánico

Como primera etapa de esta actividad se realizó un listado de todos los equipos electromecánicos utilizados en la planta y, posteriormente, se hizo una prueba de arranque y paro. Lo anterior con la finalidad de verificar que los motores no se encontraran obstruidos y los componentes estuvieran en óptimo estado.

2.4.1.3 Revisión hidráulica de tanques y tuberías

Se llevó a cabo el llenado de las unidades para verificar que no existieran fugas o grietas en las uniones de las tuberías y en las bridas del reactor. A causa de la disponibilidad de la planta y la ausencia de drenaje en el predio, se utilizó agua del canal para esta prueba. Sin embargo, se tomaron todas las medidas de salud e higiene pertinentes durante la revisión hidráulica.

2.4.2 Puesta en marcha

Se elaboró el “Manual de Arranque para los equipos de Pretratamiento” donde se recopila información de los manuales de instalación y operación que proporciona el proveedor de los equipos mecánicos y electromecánicos, y el “Manual de Arranque del Reactor Biológico Tubular” hecho a partir de bibliografía especializada en el arranque de sistemas de tratamiento de agua residual comunes reportados en la literatura. En estos manuales se muestran instrucciones, recomendaciones y formatos de llenado para asegurar el control del proceso y un arranque exitoso (**ANEXO V**).

2.4.3 Plan de muestreo

Posterior al arranque, se definieron los puntos y el tipo de muestreo para tener un control de los parámetros de medición de calidad del agua. Para la PTAR San Lorenzo se consideró realizar un muestreo simple en dos puntos determinados:

- ✓ El primer punto corresponde a la entrada de la planta. Puesto que en el pretratamiento se eliminan físicamente los materiales no solubles de gran tamaño; únicamente se consideró una inspección visual en el efluente de la criba estática.
- ✓ El segundo punto de muestreo es en el efluente del reactor, mediante el cual se determinó la eficiencia de este y al mismo tiempo sí cumple con el porcentaje de remoción de contaminantes esperados.

Con respecto al plan de muestreo, se elaboró un cronograma de actividades donde indica la frecuencia del muestreo en cada etapa del arranque. Dicho cronograma se exhibe en la Tabla 10.

Tabla 10 Cronograma de actividades de muestreo de la PTAR San Lorenzo Xochimilco.

Fase	Actividades	Mes 1			
		1	2	3	4
Arranque	Se midieron los parámetros de calidad del agua diariamente. En esta etapa se verificará la hermeticidad del sistema con un total de una semana .				
Arranque	Se midieron los parámetros de calidad del agua diariamente. Este periodo corresponde a la formación de la biomasa con un total de dos semanas .				
Operación en continuo	Se midieron los parámetros de calidad del agua diariamente. Esta etapa corresponde a la operación en continuo de la planta con un total de una semana				

Las pruebas para determinar la calidad del agua y el desempeño del proceso se presentan en la Tabla 11, estos parámetros se midieron en la Unidad de Proyectos y de Investigación en Ingeniería Ambiental (UPIIA), en los laboratorios 301 a 303 del Conjunto E de la Facultad de Química, Ciudad Universitaria, UNAM, en la Ciudad de México.

Tabla 11 Parámetros de medición de calidad del agua.

	Lugar de muestreo	Parámetro
Medición en laboratorio.	Afluente de la planta	DQO, SST, SSV, N-NH ₄ , Turbidez y Color
Medición en laboratorio	Efluente del reactor	DQO, SST, SSV, N-NH ₄ , Turbidez y Color

2.4.4 Seguimiento del arranque.

Para la medición de los parámetros en el laboratorio es primordial la toma adecuada de una muestra simple, el transporte y el almacenamiento de esta. Se tomaron las precauciones necesarias para identificar las muestras y su traslado al laboratorio de acuerdo con las recomendaciones de la NMX-AA-003-1980.

Se recolectó un volumen de 1 L por muestra, misma que se almacenó en recipientes plásticos y preservó en refrigeración a 3°C para asegurar su integridad hasta su análisis. Las pruebas de calidad del agua se realizaron siguiendo la metodología APHA y las Normas Mexicanas.

En la Tabla 12 se enlistan las normas mexicanas para el montaje de las técnicas, al igual que el principio del método y los equipos de medición correspondientes.

Tabla 12 Técnicas analíticas de calidad del agua.

Parámetro	Normas	Principio del método	Equipo de medición
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	NMX-AA-030/2-SCFI-2011	Tubo sellado a pequeña escala	Reactor HACH modelo 45600. Espectrofotómetro DIAB SP-UV1000
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	NMX-AA-034-SCFI-2015	Es el residuo que permanece en una cápsula después de evaporar y secar una muestra a una temperatura de $105\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$	Horno Quincy Lab inc. 30F lab oven
Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)	NMX-AA-034-SCFI-2015	Los sólidos suspendidos son retenidos por un filtro de fibra de vidrio con poro de $1.5\text{ }\mu\text{m}$ secados y llevados a masa constante a una temperatura de 105 °C	Mufla LabTech
Nitrógeno amoniacal (N-NH ₄)	APHA	La destilación de la muestra a tratar permite la separación del amoníaco de los compuestos de nitrógeno orgánico	Büchi Destillation Unit K-350
Turbidez	NMX-AA-038-SCFI-2001	La comparación entre la intensidad de la luz dispersada por la muestra bajo condiciones definidas; a mayor dispersión de luz corresponde una mayor turbiedad	Turbidímetro Hanna Instruments HI98703-01
Color	MX-AA-017-1980	Método de prueba espectrofotométrico	Colorímetro Hanna Instruments HI 93727

CAPÍTULO III

Resultados y análisis de resultados

3.1 Construcción del Reactor Biológico Tubular (RBT)

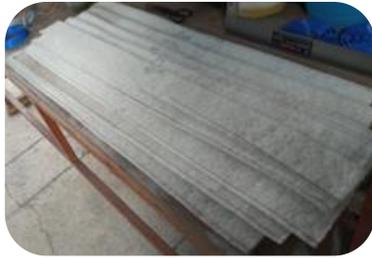
El RBT está compuesto por cuatro partes medulares, la primera parte corresponde a los internos del reactor en donde se lleva a cabo la adhesión de los microorganismos y la formación de la biomasa, la segunda parte pertenece al cuerpo del reactor encargado de proteger y contener los internos, la tercera parte se trata de un sistema de aireación que consta de soplador unido a una membrana de aireación que suministra oxígeno al sistema y, por último, un soporte metálico que le confiere estabilidad al reactor biológico. A continuación, se muestran los materiales utilizados para la construcción del sistema de tratamiento biológico.

- Internos del reactor: Fibra polimérica no tejida, pegamento de contacto adhesivo marca furia, anillos internos de cuatro diferentes tamaños, tubería hidráulica de 1" PVC, hilo nylon y niples.
- Cuerpo del reactor: Tubería hidráulica de PVC 2" cedula 80, abrazaderas con bridas, codos de 2" PVC cedula 80, reducciones de 6" a 2" de PVC y tubería de 2" PVC cedula 80.
- Difusor de tubo de membrana de poro fino de 2", soplador Hailea modelo VB-290G, manguera flexible de PVC 1".
- Soporte: Poste para rack de acero, abrazaderas tipo U y pintura.

3.1.1 Internos del reactor

El proceso de construcción consistió en el armado manual de los internos del reactor, uniendo tiras de 8.5 x 48 cm a un tubo de PVC de 1/2" con una longitud de 48 cm, insertando cuatro anillos de tamaño 1 previamente limados para asegurar adherencia, estos son fijados con pegamento adhesivo a una distancia aproximada de 12 cm cada uno. Más adelante, se pega la segunda capa de fibra polimérica de 17 x 48 cm sobre los anillos de tamaño 1, para dejar un mejor acabado y preservar la integridad de la fibra; se realiza una costura con hilo nylon y un poco más de pegamento. Este procedimiento se repite con los anillos de tamaño 2 con fibra de 26 x 48 cm, los anillos de tamaño 3 con fibra de 35.5 x 48 cm y por último con los anillos de tamaño 4 con fibra de tamaño 45 x 48 cm.

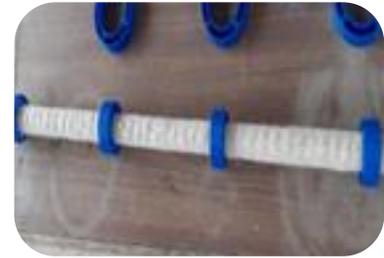
Enseguida, se muestra el procedimiento de armado para los diferentes niveles de los módulos internos del reactor.



Fibras poliméricas no tejidas cortadas de 8.5 x 48 cm, 17 x 48 cm, 26 x 48 cm, 35.5 x 48 cm y 45 x 48 cm.



El nivel cero fue cosido industrialmente con maquina de coser overlook. Adicionalmente, se muestran los cuatro tamaños de los anillos de soporte.



Primer nivel, los anillos tienen una separación de aproximadamente 12 cm entre sí.



Segundo nivel, la fibra fue cosida manualmente y sellada con una fina capa de pegamento adhesivo.



Tercer nivel, se retira el sobrante en los extremos de los módulos internos para un mejor acabado.



Cuarto nivel, módulo terminado. El espacio en el extremo del tubo es dejado para la unión con otros módulos a través de coples.

El reactor tiene una longitud de 2 m y se consideraron 8 tubos de tratamiento, por lo tanto, se requerirán 4 módulos internos de 48 cm de largo por cada tubería, lo que dará un total de 32 piezas por reactor. No obstante, en la PTAR San Lorenzo Xochimilco se utilizarán dos reactores en paralelo, necesitando así 64 módulos construidos que conforman los internos del sistema de tratamiento biológico, según la Figura 3.



Figura 3 Internos del reactor y módulos construidos.

Los internos del reactor son unidos por medio de coples de 1/2" e introducidos en una sola pieza dentro de la tubería de proceso. Los extremos son sellados con tapas hechas de plástico rígido para proteger la configuración, como se muestra en la Figura 4.



Figura 4 Unión entre dos módulos a través de un cople, pieza formada por cuatro internos, pieza completa en el interior de la tubería (de izquierda a derecha).

3.1.2 Cuerpo del reactor

La construcción del cuerpo del reactor se basó en un arreglo tubular de flujo ascendente en forma de serpentin, los tubos se colocaron uno sobre otro para aprovechar el flujo de aire que pasa a través del equipo y el espacio en la planta.

Se ha sellado cada extremo del reactor con bridas, que se utilizan para unir las partes del sistema (tubería de proceso-reducción-tubería de proceso) y, de esta manera, junto con los empaques de hule, aseguran la hermeticidad del equipo (Figura 5). Se usaron bridas tipo U por su facilidad de manipulación, en vista de que al unir la tubería de 6" con la reducción de 6" a 2" el diámetro de una brida circular podría diferir y dar lugar a posibles fugas.

Los empaques están hechos de hule elástico de 2.5 cm de ancho y 1 cm de grosor, el largo de la goma es de 54.5 cm, con un radio externo de 9.5 cm e interno de 8.5 cm. La unión de los empaques debe ser lo más estable y fuerte posible, que ya que este podría romperse en el momento de instalarlo entre la reducción y el tubo.



Figura 5 Bridas y empaques para la hermeticidad del reactor.

Se unen las dos bridas y el empaque con un tornillo de 5 cm, 2 tuercas y 2 rondanas, las cuales se recomienda apretar hasta el final para asegurar que el empaque

abrace completamente las ranuras de los tubos y la reducción. La secuencia de armado se muestra en la Figura 6.



Figura 6. Secuencia de instalación de las bridas.

Fue requerido disponer de segmentos de tubería de 2", codos de 90° y accesorios de tipo "t" para construir las conexiones del reactor. Así mismo, se lijaron y limpiaron con solución especial para tubería de PVC meticulosamente, esto con el fin retirar la mayor cantidad de polvo y así asegurar la adherencia entre los accesorios, como se ve en la Figura 7.

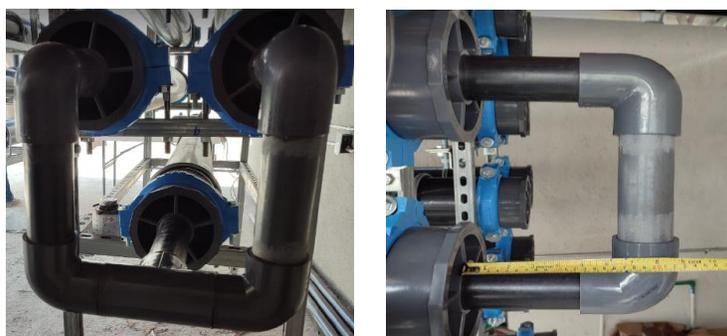


Figura 7 Unión tipo U y conexión con la tubería de proceso.

3.1.3 Sistema de aireación

La instalación del soplador se realizó sobre la estantería del reactor atornillado a una pequeña base hecha de metal que le proporciona soporte. Las conexiones con el reactor son de manguera elástica negra de 1" y boquillas de unión de plástico flexible. En la parte inferior del reactor se encuentra el difusor de tubo con membrana de poro fino (Figura 8). Los difusores tubulares están elaborados con materiales de membrana de avanzada tecnología que ofrecen una sobresaliente resistencia química y al taponamiento. Asimismo, ofrecen la más alta transferencia de oxígeno con pérdidas de presión aceptables (SSI Aeration, 2015).



Figura 8 Soplador y membrana difusora de oxígeno, respectivamente.

3.1.4 Soporte metálico

Por último, se elaboró un soporte de acero galvanizado de 2.20 m de largo y 1.60 m de ancho, con tres refuerzos verticales en la parte frontal y una división entre sí de 60 cm. El lateral está compuesto por cinco divisiones horizontales con una separación de 30 cm entre cada una, y aquí se encuentra la tubería de proceso del reactor, la cual será asegurada mediante abrazaderas de tipo U, rondanas y tuercas.

En la Figura 9 se muestra que cada soporte metálico dispone de 9 tubos de PVC cedula 80 de 6 pulgadas, divididos en 5 niveles. De forma descendente, los primeros cuatro niveles tendrán dos tuberías cada uno (correspondientes a la parte del tratamiento biológico del reactor) y en el último nivel se encontrará la membrana de difusión que proporciona oxígeno al sistema.



Figura 9 Reactor biológico tubular terminado.

3.2 Instalación de los equipos de tratamiento en el sitio

El proceso de instalación de los equipos se fundamentó en la instalación, arreglo y disposición de los aparatos de proceso; en el caso de los equipos de pretratamiento, se siguieron las recomendaciones del fabricante especificadas en los manuales de instalación, operación y mantenimiento. Por otro lado, el RBT se fijó en el piso convenientemente considerando la disposición de la planta.

Inicialmente, se instaló el reactor biológico con accesorios y equipos periféricos (soplador, bomba de alimentación y válvulas), seguido de los aparatos de pretratamiento y, por último, la instrumentación. Con el objetivo de facilitar la instalación, se realizó el acondicionamiento de la planta que se centró en una limpieza para remover los restos de materiales de construcción y otros residuos que pudieran interferir con la disposición de los equipos, véase la Figura 10.



Figura 10 Equipos instalados en la PTAR San Lorenzo Xochimilco y acondicionamiento de la planta.

3.3 Análisis del afluente de agua residual

La caracterización fisicoquímica de una muestra del afluente de la planta procedente del canal de San Lorenzo Xochimilco se detalla en esta sección. Los parámetros de calidad del agua evaluados son los siguientes:

- Sólidos totales (ST) sólidos disueltos totales (SDT), sólidos disueltos fijos (SDF), sólidos disueltos volátiles (SDV), sólidos suspendidos totales (SST)
- Demanda Química de Oxígeno (DQO)
- Nitrógeno amoniacal $N-NH_4$ y Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK)
- Fósforo Total (PT)
- Alcalinidad y acidez
- pH y turbidez

El propósito de este análisis es determinar el nivel de contaminación del agua residual en el canal de San Lorenzo para cuantificar el porcentaje de eliminación de contaminantes en el agua. En la Tabla 13 se presenta un resumen de los parámetros fisicoquímicos obtenidos de la muestra de agua residual y una comparación con las concentraciones reportadas en la literatura. La fila denominada como “reportada” se refiere a los resultados experimentales y los valores “débil, media y fuerte” son las concentraciones reportadas en la literatura para el agua residual doméstica.

Tabla 13 Resumen de los parámetros de calidad del agua del canal San Lorenzo Xochimilco.

Parámetros fisicoquímicos de la muestra agua residual Xochimilco					
Contaminante	Unidad	Concentración			
		Reportada	Débil	Media	Fuerte
Sólidos totales (ST)	mg/L	711	350	720	1200
Sólidos disueltos Totales (SDT)	mg/L	611	250	500	850
Sólidos disueltos fijos (SDF)	mg/L	260	145	300	525
Sólidos disueltos volátiles (SDV)	mg/L	351	105	200	325
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	100	100	220	350
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg O ₂ /L	268.44	250	500	1000
Nitrógeno total (NT)	mg NT/L	34.58	20	40	85
Nitrógeno amoniacal (N-NH ₄)	mg N-NH ₄ /L	19.23	12	25	50
Fósforo total (PT)	mg FT/L	1.10	4	8	15
pH	-----	7.93	8.05	8.44	8.77
Turbidez	NTU	68.37	24	146.68	357.65
Alcalinidad	mgCaCO ₃ /L	443.67	50	100	200

Nota: Adaptado Ingeniería de Aguas Residuales, (Metcalf & Eddy, 1995) p.125 Copyright por McGraw Hill

De acuerdo con los resultados del análisis del agua residual, los ST presentan una concentración de débil a media, así como también los SDF, SS, DQO, NTK, nitrógeno amoniacal, PT y turbidez. Esto se debe a que el afluente está compuesto por agua residual doméstica y agua natural del canal. Por otro lado, los parámetros que presentan una alta concentración son los SDT, SDV y la alcalinidad.

3.4 Revisión de los equipos electromecánicos

Se realizó este procedimiento para inspeccionar el funcionamiento adecuado de los equipos electromecánicos (equipos de pretratamiento y tratamiento secundario) e instalaciones fijas de los mismos, mediante pruebas funcionales de arranque y paro, conforme a las especificaciones técnicas del fabricante y respetando las normas de seguridad. Posteriormente se elaboró un registro de las instalaciones, con las observaciones por escrito de los equipos intervenidos de cada área asignada.

Tabla 14. Pruebas de arranque del equipo electromecánico. Pretratamiento.

Pretratamiento					
Equipo	Clave	Características	Arranca		Comentarios
			Si	No	
Bomba	B-001 A/B/C B-002 A/B/C	ANEXO III	X		Es necesario mantener el flotador a una altura considerable para evitar que la bomba se apague, además de preservar un nivel de agua adecuado para la succión.

Los equipos funcionaron bajo condiciones reales y a capacidad plena, en la Tabla 14 se muestra que la bomba que alimenta a la planta tuvo una prueba exitosa de arranque y paro, al igual que para los equipos de tratamiento secundario y tratamiento de lodos, como es posible apreciar en la Tabla 15.

Tabla 15 Pruebas de arranque del equipo electromecánico. Tratamiento secundario y tratamiento de lodos.

Tratamiento secundario y tratamiento de lodos					
Equipo	Clave	Características	Arranca		Comentarios
			Si	No	
Soplador	S-001	ANEXO III	X		El S-001 no presenta inconvenientes
Bomba	B-003	ANEXO III	X		El B-003 no presenta inconvenientes

3.5 Revisión hidráulica de tuberías y tanques

Una vez concluidos los procedimientos de revisión y funcionamiento de los aparatos electromecánicos, se procedió a llenar las unidades para verificar que no existieran fugas en las bridas del reactor o en las uniones de las tuberías hidráulicas. Para esta prueba se usó agua residual proveniente del canal de San Lorenzo Xochimilco y se siguieron las recomendaciones de la NOM-001-CONAGUA-2011 para Sistemas de agua potable, toma domiciliaria y alcantarillado sanitario. Así mismo, se propuso el siguiente protocolo para las pruebas de hermeticidad.

3.5.1 Preparación para la prueba de hermeticidad

- Se ancla la tubería de forma definitiva con abrazaderas tipo omegas de acero galvanizado al concreto para impedir su movimiento con el paso del agua.
- La tubería se llenó lentamente con agua, purgando el aire entrampado de manera que el aire acumulado en la parte superior pueda eliminarse. Para una tubería de PVC, el prellenado tuvo una duración de una hora.

3.5.2 Procedimiento de la prueba de presión hidrostática al sistema

- La presión de prueba de 0.5 bar se mantendrá durante dos horas como mínimo, sin presentar fugas o fallas en sus productos y juntas.
- Todos los daños en las tuberías, juntas, accesorios, válvulas o piezas especiales que se puedan detectar durante la prueba de presión, deben ser reparados o reemplazados, y la prueba debe repetirse hasta obtener resultados satisfactorios. La tubería deberá ser saturada (prellenada) nuevamente si el tiempo transcurrido entre la ejecución de una prueba y otra es superior a las 24 horas.

3.5.3 Aceptación de la prueba

- Si se ha realizado la prueba de presión hidrostática y en los tramos no se detecta ninguna fuga, el sistema se considera hermético.

Las condiciones a las que se sometió la tubería para las pruebas hidráulicas se encuentran en la Tabla 16.

Tabla 16 Condiciones de flujo de las tuberías.

	Tubería de PVC 2" cédula 80	Tubería de PVC 6" cédula 80
Longitud del tramo (m)	10	32
Flujo (L/min)	216	216
Presión (bar)	0.78	0.76 - 0.61
Velocidad (m/s)	1.94	0.22

Se detectó una gran cantidad de fugas de agua durante las pruebas hidráulicas, por lo que fue necesario limpiar inmediatamente el sitio para evitar la atracción de vectores y malos olores en la planta. En la Tabla 17 se presenta una lista de cada una de las unidades de proceso en la que se señalan y describen las fallas que se consideraron relevantes.

Tabla 17 Revisión hidráulica de los equipos pretratamiento y tanques.

Pretratamiento (equipos)					
Equipo	Clave	Características	Fugas		Comentarios
			Si	No	
Hidrociclón	H-001	ANEXO III	X		Se necesito fijar adecuadamente los empaques del equipo para evitar las fugas de agua, así como también sellar con pegamento industrial.
Criba estática	CR-001	ANEXO III	X		El equipo presenta fugas.
Pretratamiento (tanques)					
Equipo	Clave	Características	Fugas		Comentarios
			Si	No	
Tanque de alimentación	T-001	ANEXO III		X	Se retiró una cantidad excesiva de insectos.
Tanque de bombeo	T-002	ANEXO III		X	Se retiraron escombros de construcción y hojas secas.

La Tabla 17 está dividida en dos partes; la primera se refiere a la revisión hidráulica de los equipos de pretratamiento, donde se encontraron diversas fugas en el equipo CR-001. Por este motivo, fue necesario implementar un dispositivo para recolectar el agua tratada que se desborda a los costados del equipo, causado por la cantidad de presión en el sistema. Este mecanismo se compone de un recipiente de 20 litros con una malla de 0.5 mm en la parte superior para acumular los sólidos de gran tamaño, y una corriente de salida en la parte inferior para el desagüe del recipiente en el cárcamo de alimentación del tratamiento secundario, como se muestra en la Figura 11.



Figura 11 Derrame de agua residual pretratada proveniente de la criba (izquierda) sistema de recolección de agua (derecha).

Tabla 18 Revisión hidráulica de la tubería y accesorios usados en el RBT.

Tratamiento secundario				
Material	Características	Fugas		Solución
		Si	No	
Tuberías del RBT	PVC 6" cédula 80	X		Las fugas fueron arregladas con pegamento para PVC, silicón y masilla epóxica. Se cambiaron algunas piezas de tuberías.
Bridas	Bridas de plástico rígido con empaques de hule	X		Se cambiaron los empaques a unos de mayor área de contacto, ya que la brida no rodeaba adecuadamente el empaque y dejaba escapar el fluido.
Manguera de aireación	Manguera flexible de 1" PVC	X		Se modificó la configuración del soplador de manguera de plástico a tubería de PVC hidráulica debido a las fugas de aire.
Filtro de discos Azud	Anexo III		X	El sistema de tratamiento de lodos no presento inconvenientes.

A raíz de la revisión hidráulica de las tuberías y accesorios que conforman el tratamiento secundario (Tabla 18), se detectaron fugas que causaron problemas en la planta. Se utilizaron diferentes tipos de pegamentos y se cambiaron todos los empaques en el interior de las bridas para aumentar el área de contacto entre la tubería de proceso y la reducción, lo que aseguró la hermeticidad del sistema. Ver Figura 12.

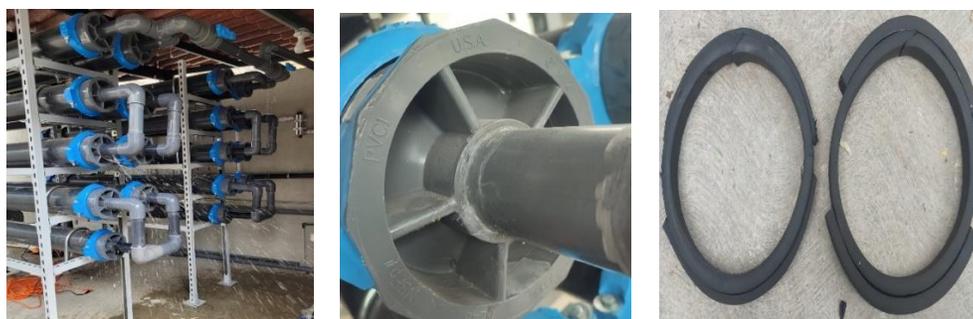


Figura 12 Fugas en el RBT, tubería adherida con pegamento para PVC y cambio de los empaques (antes y después).

Así mismo, se modificaron partes de la instalación hidráulica debido a que durante la prueba de llenado de tanques y tuberías a condiciones reales se observó la ineficacia de la configuración propuesta. En consecuencia, se cambió este arreglo para mejorar la efectividad el proceso y para no comprometer la infraestructura y seguridad de la planta. La Figura 13 muestra la primera configuración del suministro

de oxígeno al sistema de tratamiento, la boquilla que une la salida del soplador con la entrada al reactor se desprendía con facilidad a causa de la falta de un soporte fijo de las mangueras, provocando una inundación en el sistema de aireación. La modificación consistió en la instalación de tubería hidráulica de 1" de PVC y un pequeño soporte para la "T" que divide el flujo de aire para ambos reactores. Se comprobó que el difusor de membrana funciona correctamente a través de una inspección visual y mediante la medición de oxígeno disuelto en el efluente del reactor.



Figura 13 Configuración del sistema de aireación original (izquierda) y modificación final (derecha).

En la misma medida, las conexiones de la bomba que alimenta al RBT se instalaron originalmente de manguera flexible, no obstante, debido a que la potencia de la bomba es de 1 HP, existía un gran riesgo de presurización en la línea, lo que desataba un grave problema operacional. En consecuencia, se cambió toda la alimentación del reactor biológico por tubería hidráulica de 2" cédula 80 de PVC y se añadió una válvula de bola para regular el flujo y presión del sistema, como se muestra en la Figura 14.



Figura 14 Primera configuración para la alimentación del reactor (izquierda) y modificación final (derecha).

3.6 Puesta en marcha

Tras el diagnóstico del sistema que incluyó una descripción de los procesos presentes, formatos de evaluación y la reparación de los fallos de instalación en los equipos y tuberías; se inicia el proceso de arranque y puesta en marcha de la planta. El periodo de arranque se llevó a cabo del 28 de noviembre del 2022 al 22 de enero del 2023, durante estos días se recolectaron muestras para su posterior evaluación. El punto de muestreo “entrada” se refiere a la cisterna de alimentación de la PTAR que se encuentra en el patio trasero, mientras que el punto “salida” se localiza en el efluente del tratamiento secundario. El proceso de puesta en marcha se dividió en tres periodos: verificación de pruebas hidráulicas, formación de la biopelícula y operación continua. En la Tabla 19 se presenta el programa de monitoreo.

Tabla 19 Programa de monitoreo.

Muestra	Fecha	Hora	Punto de muestreo
1	28-nov-22	12:00 hrs	Entrada y Salida
2	29-nov-22	15:00 hrs	Salida
3	01-dic-22	13:00 hrs	Salida
4	02-dic-22	14:00 hrs	Salida
5	05-dic-22	13:00 hrs	Salida
6	06-dic-22	12:00 hrs	Entrada y salida
7	07-dic-22	12:00 hrs	Entrada y salida
8	08-dic-22	12:00 hrs	Entrada y salida
9	13-dic-22	12:00 hrs	Entrada y salida
10	15-dic-22	12:00 hrs	Entrada y salida
11	20-dic-22	12:00 hrs	Entrada y salida
12	02-ene-23	12:00 hrs	Salida
13	04-ene-23	12:00 hrs	Entrada y salida
14	05-ene-23	12:00 hrs	Entrada y salida
15	11-ene-23	12:00 hrs	Entrada
16	12-ene-23	12:00 hrs	Entrada y salida
17	13-ene-23	12:00 hrs	Entrada y salida
18	14-ene-23	12:00 hrs	Entrada y salida
19	16-ene-23	12:00 hrs	Entrada y salida
20	17-ene-23	12:00 hrs	Entrada
21	18-ene-23	12:00 hrs	Entrada y salida
22	19-ene-23	12:00 hrs	Entrada y salida
23	20-ene-23	12:00 hrs	Entrada y salida
24	21-ene-23	12:00 hrs	Entrada y salida
25	22-ene-23	12:00 hrs	Entrada y salida

3.6.1 Aceptación de las pruebas hidráulicas

Se determinó que las muestras del 28 de noviembre del 2022 al 05 de diciembre del 2022 pertenecen al período de pruebas hidráulicas, en el que las condiciones del reactor eran a recirculación total y cada 24 horas se llevaba a cabo una revisión del sistema, verificando la ausencia de fugas o goteos en las tuberías. En caso de existir

inconvenientes, el reactor era vaciado, reparado y nuevamente llenado para su revisión el día siguiente. En la Tabla 20 se presentan las condiciones de operación para este período de pruebas hidráulicas.

Tabla 20 Condiciones de operación para el periodo de pruebas hidráulicas.

Parámetro	Unidad	Valor
Flujo de agua	m ³ /día	5
Oxígeno disuelto	mg/L	5.6
Recirculación	%	100
Tiempo de retención hidráulica	día	0.11

3.6.2 Formación de la biopelícula

Cuando se aseguró completamente la ausencia de fugas en el sistema, entre el 6 de diciembre del 2022 al 17 de enero del 2023 se llevó a cabo la etapa de formación de la biopelícula en el interior del reactor, por lo cual, se realizó diariamente el llenado de la cisterna que alimenta la planta y la descarga de la cisterna que alimenta al Reactor Biológico Tubular para favorecer la formación de biomasa. Por esta razón, fue preciso tomar una muestra diaria de la alimentación de la planta y en la salida del reactor. Las condiciones de operación para este período de formación la biomasa fueron las mismas que se establecieron para las pruebas hidráulicas (Tabla 20).

3.6.3 Operación en continuo

En el último caso, se realizó un análisis del 18 de enero del 2023 al 22 de enero 2023 con la operación de la planta en continuo, con el fin de verificar la remoción de contaminantes en este periodo y evaluar la formación de la biopelícula en el interior del reactor. En la Tabla 21 se indican las condiciones de operación en continuo.

Tabla 21 Condiciones de operación en continuo.

Parámetro	Unidad	Valor
Flujo de agua	m ³ /día	11
Oxígeno disuelto	mg/L	5.6
Recirculación	%	50
Tiempo de retención hidráulica	día	0.048

3.7 Evaluación del arranque

El propósito de la medición de los parámetros fisicoquímicos medidos (DQO, SST, SSV, N-NH₄, turbidez y color) es evaluar el arranque de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR San Lorenzo Xochimilco, empleando la metodología descrita en el **ANEXO IV**.

3.7.1 Medición de materia orgánica

El contenido de la materia orgánica se midió en terminos de DQO y en carga orgánica superficial. El Gráfico 1 muestra el comportamiento de la DQO durante las diferentes fases del arranque, y en la Tabla 22 se presenta un resumen de los resultados.

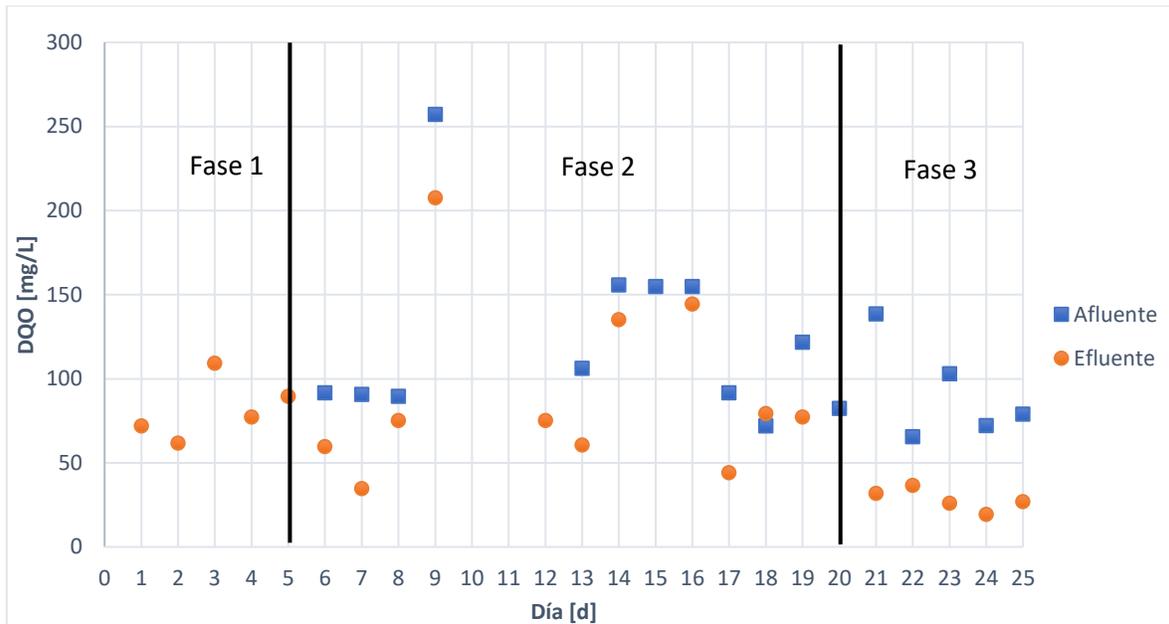


Gráfico 1 DQO en el afluente y efluente durante las distintas fases.

Tabla 22 Resumen de DQO durante la puesta en marcha del proceso.

	Aceptación hidráulica	Formación de biomasa	Operación continua
DQO afl (mg/L)		125.96 ± 18.23	91.55 ± 25.78
DQO efl (mg/L)	75.07 ± 17.38	90.22 ± 10.91	31.48 ± 13.51

Durante el período de aceptación de las pruebas hidráulicas, la carga orgánica superficial se mantuvo en un promedio de 5.6 gDQO/m²día. En el segundo periodo en el que diariamente se descargó y llenó la cisterna de alimentación del tratamiento secundario, se aprecia que el valor de la carga orgánica de entrada oscila entre los 12 y 7 gDQO/m²día, sin considerar el día 9 donde se presentó el valor más alto (19 gDQO/m²día). La ligera remoción en el efluente de este periodo es debido a que el proceso no ha llegado a la estabilización, lo que indica que los microorganismos en la biopelícula están adaptándose al agua residual cruda. No obstante, en la operación continua se observa un mayor porcentaje de remoción aún con el aumento de carga orgánica en el sistema como se observa en el Gráfico 2.

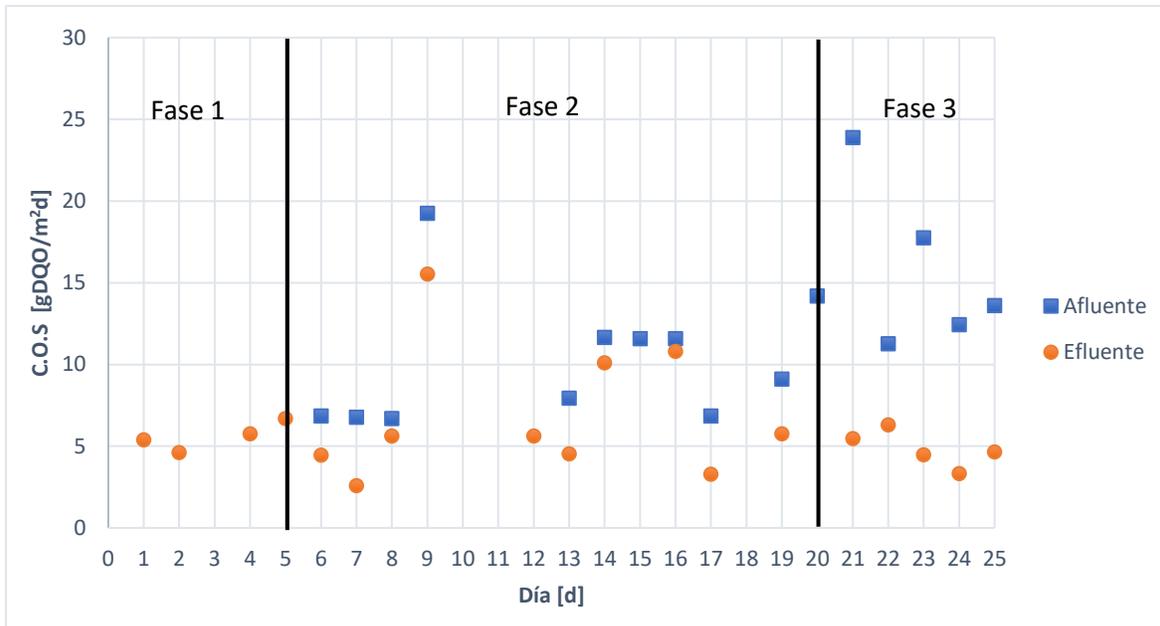


Gráfico 2 Medición de la carga orgánica superficial de DQO en el afluente y efluente.

En el Gráfico 3 se muestra el porcentaje de remoción de DQO de la planta durante la fase de formación de la biomasa (fase 2) y el período de operación en continuo (fase 3). Dado que en la primera fase sólo se llevó a cabo la recirculación del reactor y el ajuste de detalles de construcción, no se consideró analizar el porcentaje de remoción. Adicionalmente, se observa la adaptación de la biomasa al biosoporte y al agua residual durante la segunda fase debido a los datos dispersos (desde 16 al 62%), sin embargo, en la operación continua existe alta remoción de DQO que va desde el 44 al 77%.

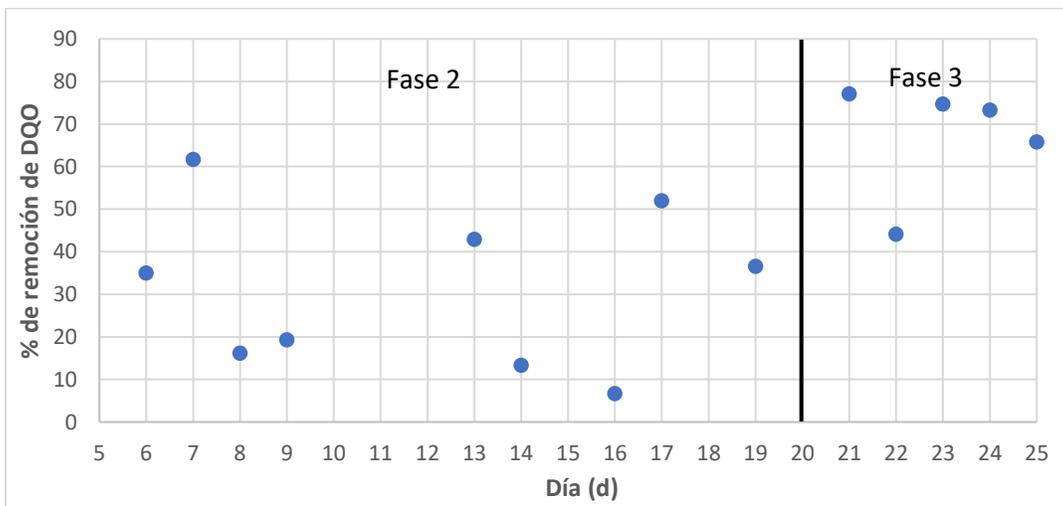


Gráfico 3 Porcentaje de remoción de DQO en el periodo de arranque y operación.

3.7.2 Medición de Nitrógeno Amoniacal N-NH₄

Las formas de nitrógeno de mayor interés en las aguas naturales y residuales son, por orden decreciente de su estado de oxidación, nitrato, nitrito, amoníaco y nitrógeno orgánico. El amoníaco es un constituyente común en las aguas residuales sanitarias, resultado directo de las descargas de efluentes domésticos e industriales (Kasalab, 2021) y se produce en gran parte por desaminación de los compuestos orgánicos nitrogenados y por hidrólisis de la urea. (APHA et al., 1992).

El Gráfico 4 muestra el comportamiento del nitrógeno amoniacal a lo largo del periodo de arranque y operación, de igual forma en la Tabla 23 se encuentra un resumen del nitrógeno amoniacal en las tres diferentes fases.

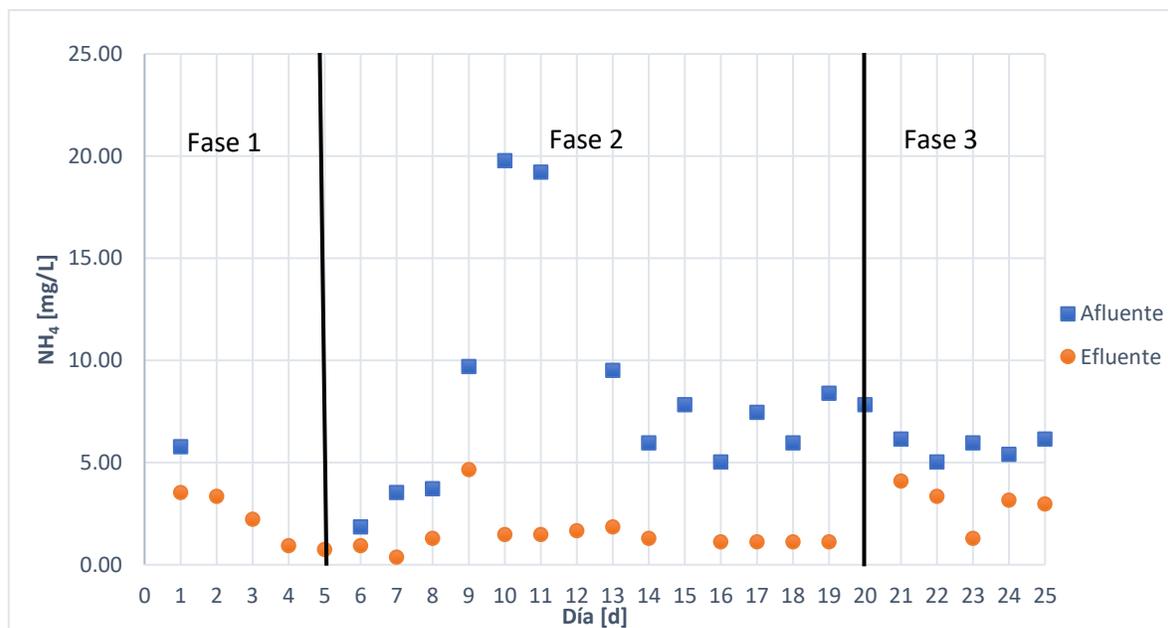


Gráfico 4 Comportamiento del nitrógeno amoniacal en el afluente y efluente.

Tabla 23 Resumen de N-NH₄ durante la puesta en marcha del proceso.

	Aceptación hidráulica	Formación de biomasa	Operación continua
N-NH₄ afl (mg/L)		8.31 ± 0.17	6.10 ± 0.09
N-NH₄ efl (mg/L)	2.17 ± 0.03	1.49 ± 0.04	2.99 ± 0.09

El nitrógeno amoniacal fue removido progresivamente en la primera fase de arranque del RBT, con el sistema bajo recirculación total y sin un aumento de carga orgánica. En la segunda etapa donde la cisterna de alimentación era vaciada una vez al día, el nitrógeno presentó una carga orgánica superficial de 1.5 a 0.14 gN-

$\text{NH}_4/\text{m}^2\text{día}$ para el afluente, y para el efluente del reactor los valores oscilaron de 0.35 a 0 $\text{gN-NH}_4/\text{m}^2\text{día}$, lo que indica que el grado de contaminación del agua descendió considerablemente en esta etapa. Por otro lado, con el aumento de la carga orgánica en la fase de operación continua la C.O.S mínima alcanzada en el efluente fue de 0.23 $\text{gN-NH}_4/\text{m}^2\text{día}$ como se ve en el Gráfico 5.

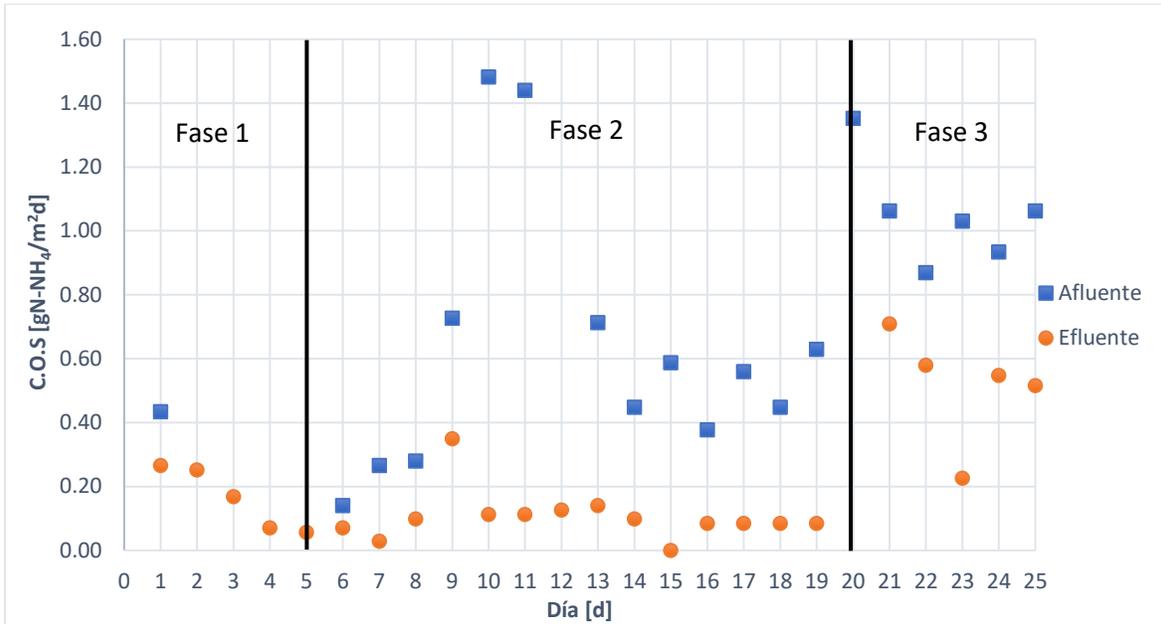


Gráfico 5 Medición de la carga orgánica superficial de N-NH₄ en el afluente y efluente.

En el Gráfico 6 se muestra como en el periodo de formación de la biomasa el porcentaje de remoción aumenta. No obstante, en la fase de operación continua este disminuye considerablemente debido al aumento en la C.O.S suministrada al sistema.

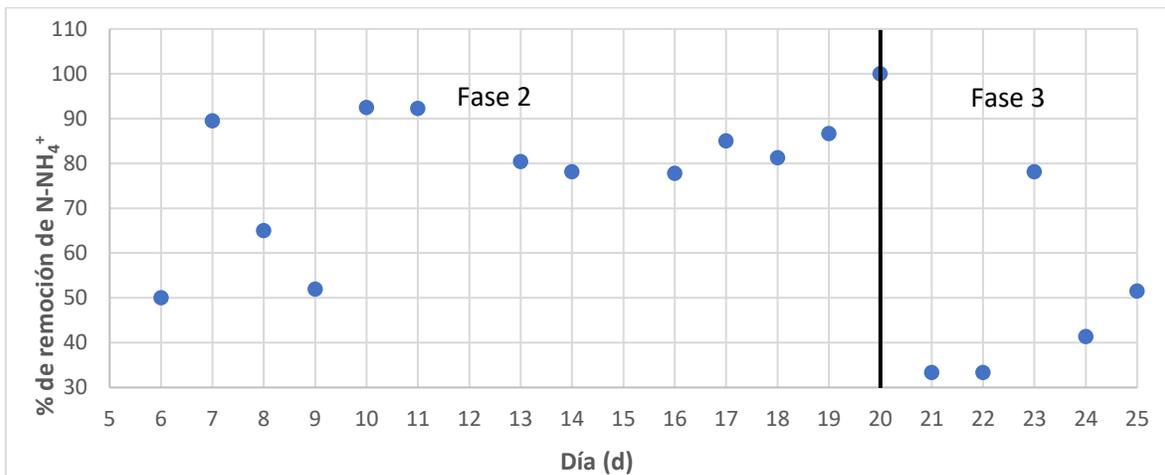


Gráfico 6 Porcentaje de remoción de N-NH₄ en el periodo de arranque y operación.

3.7.3 Medición de turbidez

La turbidez, causada por partículas químicas y biológicas en suspensión, puede tener implicaciones estéticas y de seguridad para los suministros de agua. Las fuentes de turbidez son diversas y muchas de las partículas constituyentes (por ejemplo, arcillas, materia orgánica natural, entre otras) pueden indicar la presencia de contaminantes químicos y microbianos peligrosos, teniendo así importantes implicaciones para la calidad del agua (WHO, 2017).

A manera de resumen, en la Tabla 24 se exhiben los resultados para la turbidez.

Tabla 24 Resumen de turbidez durante la puesta en marcha del proceso.

	Aceptación hidráulica	Formación de biomasa	Operación continua
Turbidez afl (NTU)		27.11 ± 3.90	43.94 ± 3.67
Turbidez efl (NTU)	1.09 ± 0.05	1.85 ± 0.42	2.50 ± 0.29

En cuerpos de agua como lagos, ríos y canales, los altos niveles de turbidez reducen la cantidad de luz que llega a las especies de plantas sumergidas y afectan la capacidad de los organismos acuáticos para absorber el oxígeno disuelto (Singh & Kishor, 2020). En la Fase 1 hay un casi nulo descenso de la turbidez, mientras que en la fase 2 los valores del efluente están por debajo de 5 NTU. Así mismo, en la Fase 3, aun con el aumento de la carga orgánica superficial, el efluente sigue siendo más claro debido a la baja turbidez (ver Gráfico 7).

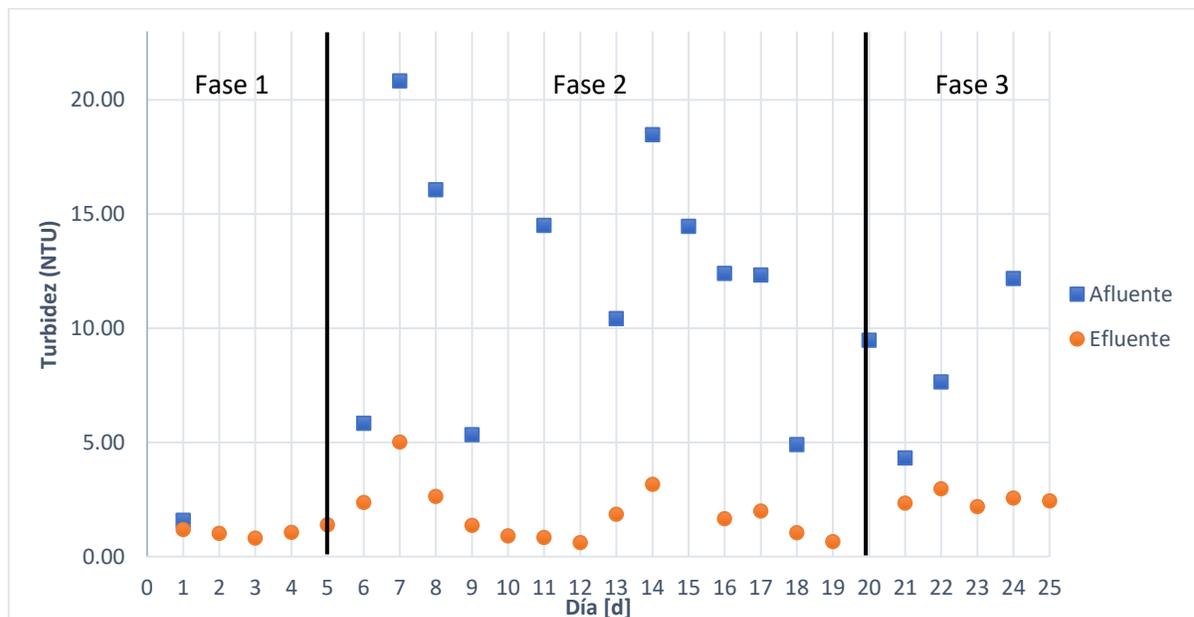


Gráfico 7 Comportamiento de la turbidez en el afluente y efluente.

El porcentaje de remoción va desde el 45% como mínimo hasta el 99% durante el periodo de arranque. En la segunda fase se presenta una eliminación gradual de la turbidez, mientras que en la tercera etapa, debido al aumento de la carga orgánica, este porcentaje es menor, aunque a lo largo de la operación este va aumentando hasta alcanzar el 98%, como se observa en el Gráfico 8.

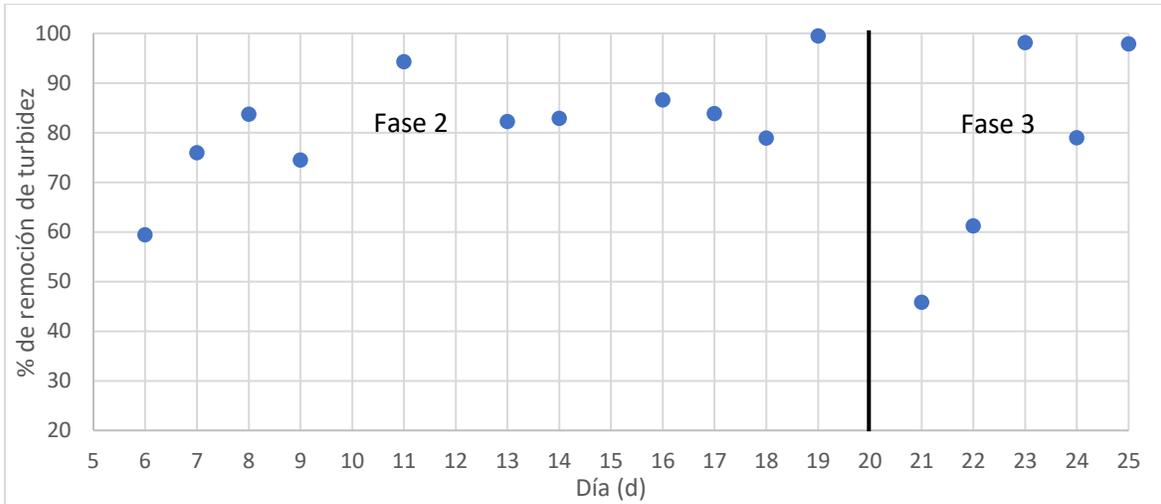


Gráfico 8 Porcentaje de remoción de turbidez en el periodo de arranque y operación.

3.7.4 Medición de sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos suspendidos volátiles (SSV).

La mayoría de los sólidos suspendidos totales están compuestos por materiales inorgánicos; sin embargo, las algas y las bacterias también pueden considerarse dentro de sus componentes. Los SST podrían ser cualquier cosa que flote o "suspenda" en el agua, incluyendo arena, sedimentos y plancton. Cuando ciertas fuentes de agua están contaminadas con plantas o animales en descomposición, las partículas orgánicas liberadas en el agua generalmente son sólidos suspendidos (Campbell, 2021). En la Fase 1 y 2 del arranque no se consideró medir los SST dado que es de esperarse una medición de sólidos dispersa debido a que estos periodos corresponden a la formación de la biomasa en el interior del reactor. En la Fase 3 con la operación continua, se observa una disminución considerable en los SST, de 88.67 mg/L hasta 16.67 mg/L como se muestra en la Tabla 25.

Tabla 25 Resumen de sólidos suspendidos totales durante la fase de operación continua.

	SST (mg/L)	Máximo	Mínimo
Afluente	88.67 ± 11.60	182.67 ± 27.15	20.67 ± 8.08
Efluente	16.67 ± 8.50	28 ± 12	7.33 ± 10.07

Después de determinar el valor de sólidos suspendidos totales, se realizó la prueba de sólidos suspendidos volátiles (SSV) para conocer la concentración de estos en el sistema de tratamiento de agua residual. Los datos de sólidos suspendidos volátiles son fundamentales para determinar el comportamiento operativo y la concentración biológica en todo el sistema (EBS, 2022). En la operación continua se obtuvieron valores para SSV de 46.27 mg/L en el afluente de la planta hasta 11.17 mg/L en el efluente, como se muestra en la Tabla 26.

Tabla 26 Resumen de sólidos suspendidos volátiles durante la fase de operación continua.

	SSV (mg/L)	Máximo	Minimo
Afluente	46.27 ± 8.37	88.67 ± 23.18	17.33 ± 8.08
Efluente	11.17 ± 24.26	24 ± 19.80	0.67 ± 28.73

3.7.5 Color

El color del agua se debe a la presencia de materia orgánica natural (MON) como son las sustancias húmicas (SH) procedentes de los ácidos húmicos y fúlvicos, así como por la presencia de ciertos metales como hierro, manganeso, cobre, que se encuentran disueltos o en suspensión. Las sustancias húmicas representan entre el 50% y el 75% del carbono orgánico disuelto contenido en las aguas superficiales y aportan el color a las aguas a tratar (Hanna Instruments, 2018). Durante el proceso de arranque se ve un leve descenso en el color, el efluente del sistema aún tiene un ligero tono amarillo asociado a las sustancias húmicas (ver Tabla 27 y Gráfico 9).

Tabla 27 Resumen del color durante la puesta en marcha del proceso.

	Aceptación hidráulica	Formación de biomasa	Operación continua
Color afl (Unidades Pt-Co)		399.10 ± 23.37	375 ± 10.77
Color efl (Unidades Pt-Co)	168.67 ± 13.55	247.31 ± 24.11	184.67 ± 17.52

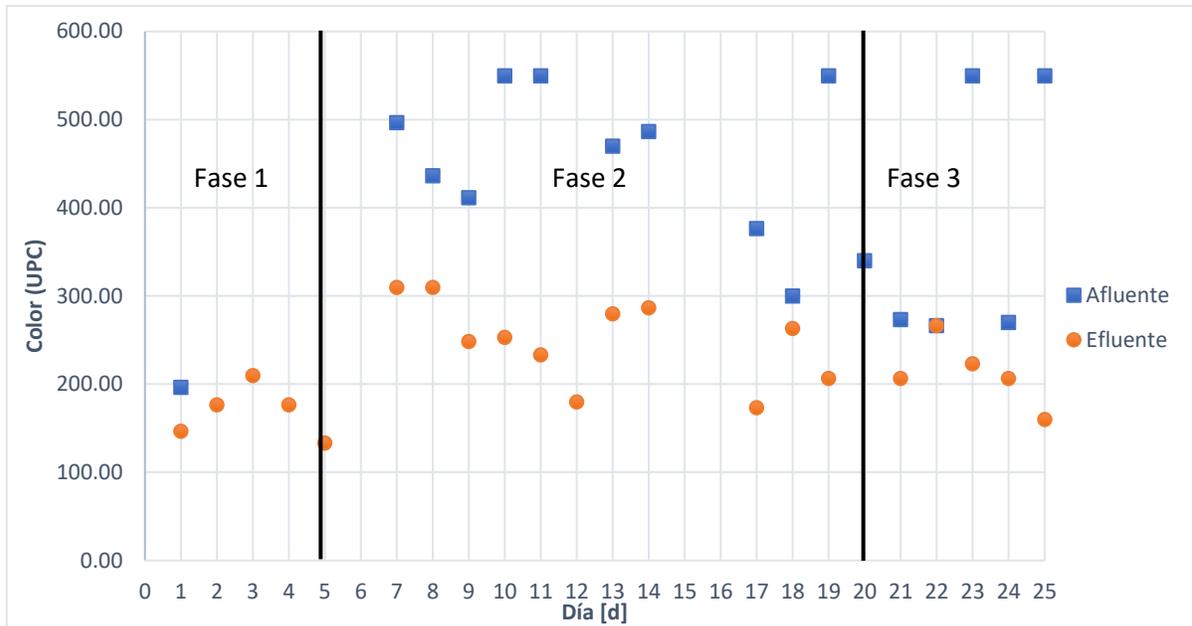


Gráfico 9 Comportamiento del color en el afluente y efluente.

El porcentaje de remoción del color tuvo variaciones a lo largo del periodo de arranque y operación de la planta. En la Fase 2 la remoción va desde 12% hasta el 62% y para la Fase 3 de 71% al 23% como se observa en el Gráfico 10. No obstante, el reactor biológico tubular no proporciona un efluente clarificado totalmente afectando su estética, esto es debido a que si bien otros contaminantes son removidos, el color del afluente esta dado por la materia húmica, el ácido húmico y otros compuestos lixiviados de la materia orgánica bentónica o flotante, que son responsables del teñido de color marrón oscuro en el agua de los humedales (Deemy et al., 2022). Sin embargo, se espera que a lo largo de la operación continua de la planta se obtenga un efluente cada vez más clarificado.

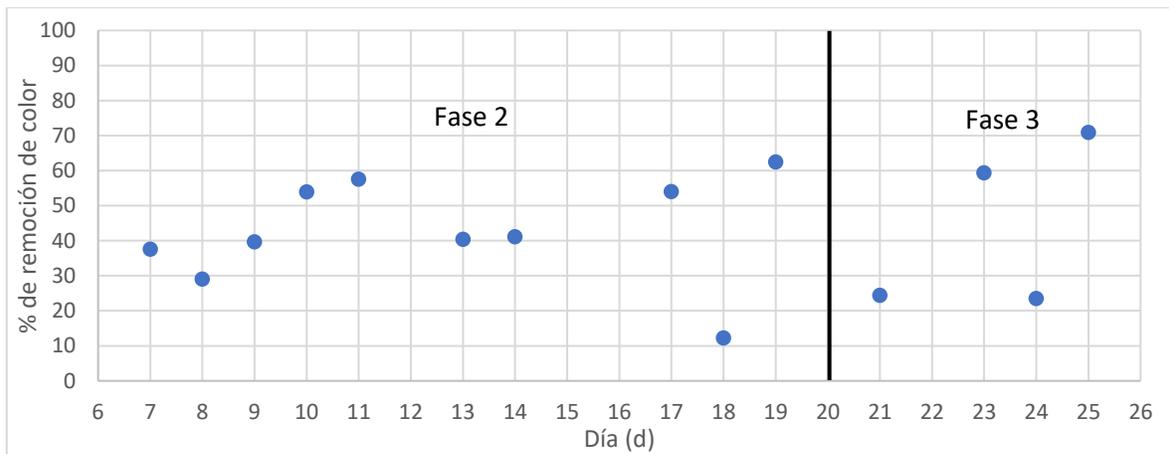


Gráfico 10 Porcentaje de remoción de color en el periodo de arranque y operación.

CAPÍTULO IV

Conclusiones

Conforme a los objetivos planteados en este trabajo y con los resultados, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Se instalaron los equipos mecánicos (hidrociclón, criba estática y filtro de lodos) y electromecánicos (bombas sumergibles de alimentación, soplador y bomba centrifuga) que componen la Planta de Tratamiento de Agua Residual San Lorenzo Xochimilco de acuerdo con las recomendaciones de los fabricantes.
- Se construyeron todas las partes que conforman al Reactor Biológico Tubular. Se elaboraron 64 elementos internos manualmente y se ubicaron en el interior de la tubería de proceso, misma que fue adaptada para funcionar como un sistema de tratamiento tubular de flujo ascendente.
- Se realizaron ensayos electromecánicos por medio de una prueba de arranque y paro conectando los equipos a la corriente eléctrica y comprobando su funcionamiento. De igual forma, se realizaron las pruebas hidrostáticas durante cinco días bajo condiciones de operación reales (11 m³/día) y se arreglaron las fugas de agua que se presentaron durante el llenado de los equipos. Adicionalmente, se hicieron modificaciones a las conexiones de la planta para asegurar la integridad del proceso para la operación continua.
- El desempeño de la planta a recirculación total y operando bajo un flujo de 11 m³/día mostró ser una opción factible para el tratamiento de agua residual del canal de Xochimilco, debido a que, a pesar de estar en una etapa de arranque y operación temprana, muestra porcentajes de remoción de contaminantes por arriba del 50%, proporcionando una buena calidad al efluente.
- Los manuales de arranque de la PTAR San Lorenzo Xochimilco para el Reactor Biológico Tubular y los equipos de pretratamiento proporcionan información detallada acerca de los procedimientos preventivos para iniciar con la puesta en marcha, los posibles problemas (así como recomendaciones para solucionarnos), instrucciones de operación de las unidades, y advertencias de uso. Los manuales cumplen con la función de ser una guía especializada para que el operador logre un arranque adecuado del sistema.

Recomendaciones

- ✓ Se sugiere realizar estudios sobre el crecimiento de la biopelícula en el interior del reactor para determinar de qué manera ocurre, el tipo de microorganismo que crecen en ella y la calidad del lodo producido por medio de parámetros fisicoquímicos.
- ✓ Continuar con la operación del sistema para identificar el periodo de tiempo en el que el reactor requiera una purga de lodos y verificar el funcionamiento del sistema de tratamiento de lodos instalado como equipo periférico del reactor.
- ✓ Aumentar el caudal de alimentación y realizar las pruebas fisicoquímicas para determinar la carga orgánica con la que el reactor tiene mayor eficiencia y porcentaje de remoción en los contaminantes, se recomienda probar con 23 m³/día, 35 m³/día y 46 m³/día
- ✓ Implementar un sistema de tratamiento terciario para la eliminación de organismos patógenos provenientes del efluente del reactor. Se recomienda un sistema de gran facilidad operativa y que pueda ser utilizado en espacios reducidos, como la luz ultravioleta e hipoclorito de sodio.
- ✓ A lo largo de la operación en continuo se recomienda la evaluación de más parámetros fisicoquímicos para evaluar la calidad del efluente como la Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO, Carbono Orgánico Total COT, Grasas y Aceites G y A, coliformes totales y fecales, huevos de helminto y Fósforo Total FT.
- ✓ Por último, desde un entorno socioambiental, se sugiere el acercamiento con la población aledaña a la planta para dirigir su sistema de drenaje al cárcamo de recepción, evitando que los vecinos viertan sus desechos al canal.

REFERENCIAS

- Akpor, O., Otohinoyi, D. A., Olaolu, T. D., & Aderiye, J. (2014). Pollutants in wastewater effluents: impacts and remediation processes. *International Journal of Environmental Research and Earth Science*, 3, 50–59. https://www.researchgate.net/publication/261834688_pollutants_in_wastewater_effluents_impacts_and_remediation_processes
- Al-Asheh, S., Bagheri, M., & Aidan, A. (2021). Membrane bioreactor for wastewater treatment: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4, 3. <https://doi.org/10.1016/J.CSCEE.2021.100109>
- Anh-Vu, N., Yun-Je, L., Masumi, K., & Visvanathan, C. (2022). Effects of membrane relaxation rate on performance of pilot-scale membrane aerated biofilm reactors treating domestic wastewater. *Environmental Research*, 211, 2. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113003>
- APHA, AWWA, & WPCF. (1992). *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales* (17th ed., Vol. 21). Ediciones Díaz de Santos, S.A.
- AWWA, & ASCE. (2005). *Water Treatment Plant Desing* (E. E. Baruth (ed.); 4th ed.). McGraw-Hill.
- Barbera, M., & Gurnari, G. (2018). Wastewater Treatment and Reuse in the Food Industry. In *SpringerBriefs in Molecular Science. Chemistry of Foods Series*. Springer. <http://www.springer.com/series/11853>
- Campbell, B. (2021). *What is Total Suspended Solids (TSS)?* Wastewater Digest. <https://www.wwdmag.com/instrumentation/suspended-solids-monitors/article/10939708/what-is-total-suspended-solids-tss>
- Canut, A., Duque, R., Donato, J., & Sáez, R. (2016). Tecnología Moving Bed Biological Reactor (MBBR) para el tratamiento de aguas residuales de la industria agroalimentaria. *Soluciones Industriales y Tratamientos Ambientales (SITRA)*, 13–14. https://sitra.es/wp-content/uploads/2021/11/Tecnología_MBBR_industria_agroalimentaria_CTC_JUN_2016_0.pdf
- Cheremisinoff, P. N. (1995). *Handbook of Water and Wastewater Treatment Technology*. CRC Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/9780203752494>
- CONAGUA. (2019a). *Descarga de aguas residuales (nacional)*. Subdirección de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=descargasResiduales>
- CONAGUA. (2019b). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Introducción al Tratamiento de Aguas Residuales Municipales* (Vol. 25). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Boulevard. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro25.pdf>
- CONAGUA. (2019c). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*.

- Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Filtros Rociadores.* (Vol. 52). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro52.pdf>
- CONAGUA. (2019d). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Lagunas aireadas* (Vol. 48). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Boulevard. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro48.pdf>
- CONAGUA. (2019e). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Procesos Anaerobios* (Vol. 49). Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro49.pdf>
- CONAGUA. (2019f). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Operación y Mantenimiento de Plantas Municipales: Lodos Activados* (Vol. 51). Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro51.pdf>
- CONAGUA. (2019g). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Pruebas, Puesta en Servicio, Operación y Mantenimiento de Equipo y Materiales Electromecánicos* (Vol. 43). Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro43.pdf>
- CONAGUA. (2020). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación.* <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/SGAPDS-2-22-a.pdf>
- Cortez, S., Teixeira, P., Oliveira, R., & Mota, M. (2013). Bioreactors: Rotating Biological Contactors. *Encyclopedia of Industrial Biotechnology*, 1013–1030. <https://doi.org/10.1002/9780470054581.eib650>
- Daud, M. K., Rizvi, H., Akram, M. F., Ali, S., Rizwan, M., Nafees, M., & Jin, Z. S. (2018). Review of Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor Technology: Effect of Different Parameters and Developments for Domestic Wastewater Treatment. *Journal of Chemistry*, 4. <https://doi.org/10.1155/2018/1596319>
- Davis, M. L. (2010). *Water and Wastewater Engineering. Desing principles and practice. Professional Edition.* McGraw-Hill.
- Davis, M. L. (2020). *Water and Wastewater Engineering. Design Principles and Practice* (2nd ed.). Mc Graw Hill.
- Deemy, J. B., Hall, B. M., Takagi, K. K., Tyler, K. N., & Rasmussen, T. C. (2022). Physicochemical environment. *Fundamentals of Tropical Freshwater Wetlands: From Ecology to Conservation Management*, 87–109.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822362-8.00022-0>

- Doble, M., & Kumar, A. (2005). Treatment of Municipal Waste. *Biotreatment of Industrial Effluents*, 275–283. <https://doi.org/10.1016/B978-075067838-4/50028-2>
- Dorji, U., Dorji, P., Shon, H., Badeti, U., Dorji, C., Wangmo, C., Tijing, L., Kandasamy, J., Vigneswaran, S., Chanan, A., & Phuntsho, S. (2022). On-site domestic wastewater treatment system using shredded waste plastic bottles as biofilter media: Pilot-scale study on effluent standards in Bhutan. *Chemosphere*, 286, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131729>
- Droste, R., & Gehr, R. (2019). *Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment* (2nd ed.). Wiley.
- EBS. (2022). *Total Suspended Solids (TSS) & Volatile Suspended Solids (VSS)*. <https://www.ebsbiowizard.com/articles/total-suspended-solids-tss-volatile-suspended-solids-vss/>
- EPA. (2000). Wastewater Technology Fact Sheet: Oxidation Ditches. *Environmental Protection Agency United States*, 1–3. https://www3.epa.gov/npdes/pubs/oxidation_ditch.pdf
- Fernández, L. (2015). UNAM: contaminación de Xochimilco es irreversible. *MILENIO 2020*. <https://www.milenio.com/estados/unam-contaminacion-de-xochimilco-es-irreversible>
- García, S. (2018). *Estudio de un reactor biológico de biopelícula fija a escala laboratorio con el uso de materiales no tejidos para la fijación de la biomasa* [Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://132.248.9.195/ptd2018/noviembre/0783123/0783123.pdf>
- García, S., & Durán, A. (2017). Biological tubular reactor, new technology for small wastewater treatment plants. *HAL Open Science*, 3–4. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02964318/file/proceedings_S2SMALL2017.pdf
- Genesis Water Tech. (2019). *Pros and Cons of a Moving Bed Bioreactor*. <https://genesiswatertech.com/blog-post/pros-and-cons-of-a-moving-bed-bioreactor/>
- Ghodeif, K. (2013). Baseline Assessment Study for Wastewater Treatment Plant for Al Gozayyera village, West Kantara City, Ismailia Governorate, Egypt. In *SWIM-Sustain Water MED-Egypt*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34897.63844>
- González, A. (2019). La contaminación del lago de Xochimilco, ubicado en la Ciudad de México. *Segundo Congreso Virtual Internacional Economía Social y Desarrollo Local Sostenible*, 110–126. <https://www.eumed.net/actas/19/economia-social/8-la-contaminacion-del-lago-de-xochimilco-ubicado-en-la-ciudad-de-mexico.pdf>
- Hanna Instruments. (2018). *Importancia de la medida de color en el agua de consumo humano*. <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/importancia->

de-la-medida-de-color-en-el-agua-de-consumo-humano

- Hazen & Sawyer. (2011). *Información compilada de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales Disponibles y Aplicables al Proyecto*. (No. 3). <https://www.car.gov.co/uploads/files/5aec916f61396.pdf>
- Judd, S. (2011). *The MBR book. Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment* (S. Judd & C. Judd (eds.); 2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Kasalab. (2021). *Nitrógeno amoniacal en aguas y efluentes*. <https://www.kasalab.com/nitrogeno-amoniaco-en-aguas-y-efluentes/>
- Konwitschny, R. (2016). Water tightness from a leak detection point of view. *19th World Conference on Non-Destructive Testing*. <https://www.ndt.net/article/wcndt2016/papers/p87.pdf>
- Kordrostami, S. (2015). *Waste-water treatment plant: Design*. https://www.researchgate.net/publication/281113121_Waste-water_treatment_plant_Design
- López, C., Buitrón, G., García, H., & Cervantes, F. (2008). *Tratamiento biológico de aguas residuales. Principios, modelación y diseño*. IWA. <https://doi.org/10.17345/9788484241027>
- Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales. Volumen 1: Tratamiento, vertido y reutilización*. (A. García Brage (ed.); 3ra ed.). McGraw-Hill.
- Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater engineering. Treatment and Reuse*. (4th ed.). McGraw-Hill.
- Nilusha, R. T., Yu, D., Zhang, J., Abeynayaka, A., & Wei, Y. (2021). Insights into the ambient temperature startup of an anaerobic ceramic membrane bioreactor with thermally hydrolyzed inoculum for domestic wastewater treatment. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4, 3,4. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100122>
- Noyola, A., Morgan-Sagastume, J., & Guereca, L. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas*. Instituto de Ingeniería UNAM. http://www.pronatura-sur.org/web/docs/Tecnologia_Aguas_Residuales.pdf
- ONU. (2015). *La Agenda para el Desarrollo Sostenible*. Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>
- Osmani, S. A., Rajpal, A., & Kazmi, A. A. (2021). Upgradation of conventional MBBR into Aerobic/Anoxic/Aerobic configuration: A case study of carbon and nitrogen removal based sewage treatment plant. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 4. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.101921>
- Pacheco, J., & Magaña, A. (2003). Arranque de un reactor anaerobio. *Ingeniería*, 7, 21–25. <https://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen7/arranque.pdf>

- Qasim, S. R., & Zhu, G. (2018). Wastewater treatment and reuse: Theory and design examples. In *Volume 1: Principles and Basic Treatment*. CRC Press.
- Quiroz, S., Menéndez, C., & Izquierdo, E. (2019). Tratamiento de agua y aguas residuales. In *Colección de libros académicos. Universidad Técnica de Manabí. Ciencias Tecnológicas*. Ediciones UTM.
- Riffat, R. (2013). *Fundamentals of wastewater treatment and engineering* (1ra ed.). IWA Publishing.
- Show, K.-Y., Yan, Y.-G., Zhao, J., Shen, J., Han, Z.-X., Yao, H.-Y., & Lee, D.-J. (2020). Startup and performance of full-scale anaerobic granular sludge blanket reactor treating high strength inhibitory acrylic acid wastewater. *Bioresource Technology*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123975>
- Singh, M., & Kishor, B. (2020). Removal of Turbidity and TDS from Wastewater by Using Natural Coagulants. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, 2, 521. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/889/1/012074>
- Spellman, F. R. (2009). *Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b15579>
- SSI Aeration. (2015). *Difusores Tubulares de Burbuja Fina*. <https://www.ssiaeration.com/es/difusores-tubulares-de-burbuja-fina/difusores-tubulares-de-burbuja-fina/>
- Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., Schertenleib, R., & Zurbrügg, C. (2020). *Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente*. SSWM. <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneamiento/recoleccion-y-almacenamiento/filtro-anaerobio-de-flujo-ascendente>
- Wang, L. K., Pereira, N. C., & Hung, Y.-T. (2009). *Handbook of Environmental Engineering. Biological Treatment Processes* (N. K. Shamas (ed.); Vol. 8). Humana Press. <https://doi.org/10.1201/9781351170529-1>
- WEF. (2008). *Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants. Management and Support Systems* (6th ed., Vol. 1). McGraw-Hill.
- WHO. (2017). Water quality and health - review of turbidity: Information for regulators and water suppliers. *World Health Organization*, 10. https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/turbidity-information-200217.pdf
http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/turbidity-information-200217.pdf

Anexo II. Memoria de cálculo de las condiciones de la tubería

Para el cálculo de la presión de la tubería de dos pulgadas y seis pulgadas se rescata la información que proporciona el fabricante de la bomba Truper BOS-1SM

$$Q = 216 \frac{\text{L}}{\text{min}} = 0.0036 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Altura máxima = 8m

Presión = 0.78 bar = 78000 Pa

Para determinar la velocidad se utilizó la siguiente ecuación:

$$V = \frac{Q}{A}$$

Donde:

V: La velocidad del fluido (m/s).

Q: Flujo en la tubería (m³/s).

A: Área de la tubería (m²).

Cálculo de velocidad en la tubería de 2"

Considerando una tubería de 2" de PVC cédula 80, se tiene un diámetro interno $d = 0.0486\text{m}$. Por lo tanto:

$$r = 0.0243\text{m}$$

$$A = \pi r^2$$

$$A = \pi(0.0243\text{m})^2$$

$$A = 1.86 \times 10^{-3} \text{m}^2$$

Sustituyendo:

$$V_1 = \frac{0.0036 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{1.86 \times 10^{-3} \text{m}^2} = 1.94 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Para la tubería de 6" de PVC cédula 80:

$$d = 0.145\text{m}$$

$$r = 0.0725\text{m}$$

$$A = \pi r^2$$

$$A = \pi(0.0725\text{m})^2$$

$$A = 0.0165 \text{m}^2$$

$$V = 0.0165 \text{m}^2 * 32 \text{m}$$

$$V = 0.528 \text{m}^3$$

Sustituyendo:

$$V_2 = \frac{0.0036 \frac{m^3}{s}}{0.0165 m^2} = 0.218 \frac{m}{s}$$

Se utilizó la ecuación de Bernoulli para determinar el rango de presión aproximado (debido a que no se consideró el empaque del sistema) a la que fue sometido el reactor biológico tubular. La altura del reactor va desde 1 a 2.5 metros con respecto a la bomba instalada en el cárcamo de bombeo.

De la ecuación de Bernoulli

$$\frac{1}{2}\rho V_1^2 + \rho g h_1 + P_1 = \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \rho g h_2 + P_2$$

Con los datos:

$$\begin{aligned}\rho &= 1000 \frac{kg}{m^3} \\ V_1 &= 1.94 \frac{m}{s} \\ g &= 9.81 \frac{m}{s^2} \\ h_1 &= 0.6 m \\ P_1 &= 7800 Pa \\ V_2 &= 0.218 \frac{m}{s} \\ h_2 &= 1m, 2.5m\end{aligned}$$

Y sustituyendo para una $h_2 = 1m$:

$$\begin{aligned}\frac{1}{2}(1000)(1.94)^2 + (1000)(9.81)(0.6) + 78000 \\ = \frac{1}{2}(1000)(0.218)^2 + (1000)(9.81)(1) + P_2 \\ 85767.8 = 9833.762 + P_2 \\ P_2 = 75934.04 Pa = 0.76 bar\end{aligned}$$

Sustituyendo para una $h_2 = 2.5 m$

$$\begin{aligned}\frac{1}{2}(1000)(1.94)^2 + (1000)(9.81)(0.6) + 78000 \\ = \frac{1}{2}(1000)(0.218)^2 + (1000)(9.81)(2.5) + P_2 \\ 85767.8 = 24548.76 + P_2 \\ P_2 = 61219.04 Pa = 0.61 bar\end{aligned}$$

El RBT opera de 0.76 bar a 0.61 bar

Anexo III. Fichas técnicas de los equipos de proceso

En el presente anexo se muestran los equipos de proceso utilizados en la PTAR San Lorenzo Xochimilco y sus especificaciones técnicas con el fin de tener información de los equipos y planear de manera eficiente el arranque.

Tabla 28 Alimentación de la planta. Tanque de recolección de agua cruda.

Tanque de recolección			
Estado	Nuevo	Deteriorado	Mal estado
	X		
Clave	T-001		
Ubicación	En el patio trasero de la planta a cinco metros de la fuente receptora		
Función	Proveer agua cruda al tren de tratamiento de la PTAR. En caso de inundaciones, descarga los excedentes en el canal de San Lorenzo Xochimilco		
Datos técnicos			
Tipo	Rectangular cerrada con dos tapas metálicas		
Material	Concreto reforzado y mampostería		
Dimensiones			
Ancho, largo, altura	4.5x3x0.8 m		
			

Tabla 29 Alimentación de la planta. Bomba sumergible de agua cruda.

Bomba sumergible			
Estado	Nuevo	Deteriorado	Mal estado
	X		
Clave	B-001 A/B		
Ubicación	En el interior del tanque de alimentación		
Función	Llenar el tanque agua cruda que alimenta los tratamientos posteriores de la PTAR		
Datos técnicos			
Fluido	Agua residual cruda		
Tipo	Bomba sumergible con cuerpo de acero inoxidable con un interruptor flotador para operación automática. Motor con bobinas de cobre		
Marca	Truper mod BOS-1SM		
Capacidad de la bomba	216 L/min		
Potencia	1 HP		
Presión	0.78 bar		
Dimensiones			
Altura y diámetro	35x16 cm		



Tabla 30 Equipos de pretratamiento. Hidrociclón.

Hidrociclón			
Estado	Nuevo	Deteriorado	Mal estado
	X		
Clave	H-001		
Ubicación	En el patio de tratamiento.		
Función	Utiliza la fuerza centrífuga para separar sólidos de líquidos, en este caso arenas del agua residual cruda.		
Datos técnicos			
Fluido	Agua residual cruda		
Tipo	Hidrociclón de poliamida reforzado de 25 m ³ con entrada de 2"		
Marca	Wide Rain HC225-2"		
Presión máxima	6 kg/cm ²		
Rango de tasa de flujo	15-25 m ³ /h		
Flujo nominal	25 m ³ /h		
Dimensiones			
Largo y ancho	1x0.5 m		

Tabla 31 Equipos de pretratamiento. Criba estática.

Criba			
Estado	Nuevo	Deteriorado	Mal estado
	X		
Clave	CR-001		
Ubicación	Del lado izquierdo de la cisterna de alimentación del RBT		
Función	Se encarga de la separación de sólidos en suspensión de gran tamaño (lirio acuático, hojas de árboles, etc.) dentro del agua residual a tratar.		
Datos técnicos			
Fluido	Agua residual proveniente del hidrociclón		
Tipo	Criba curva estática (hidrotamiz) con separación de malla de 5 mm habilitada de elementos estructurales de acero inoxidable.		
Diámetro del efluente	2"		
Diámetro del influente	4"		
Tamaño de cribado	5 mm ²		
Dimensiones			
Largo y ancho	1.22x0.4 m		



Tabla 32 Equipos del tratamiento secundario. Reactor Biológico Tubular.

Reactor Biológico Tubular			
Estado	Nuevo	Deteriorado	Mal estado
	X		
Clave	RBT-001		
Ubicación	En la zona oriente de la PTAR San Lorenzo Xochimilco		
Función	Elimina la mayor cantidad de materia orgánica disuelta en el agua residual, proporcionando un alto grado de tratamiento.		
Datos técnicos			
Fluido	Agua residual pretratada		
Tipo	Reactor tubular de flujo ascendente cerrado. Cuerpo de PVC cédula 80		
Volumen de tratamiento	32 m ³		
Dimensiones			
Diámetro	6"		
Altura (sin rack)	1.3m		
Altura (con rack)	2.20m		
Largo	2.60m		
Ancho	35cm		
Datos de los equipos			
Medio de soporte	Cuatro anillos plásticos de diferente diámetro		
Soporte	Fibra polimérica no tejida color blanco		
Tuberías y válvulas	Tuberías de 2" PVC cédula 40 y reducciones de 6" a 2". Válvulas de bola de 2" PVC		
Rack (soporte)	Soporte de metal de acero inoxidable que sujetan al reactor con abrazaderas		

Tabla 33 Equipos del tratamiento secundario. Tanque de alimentación de agua pretratada.

Tanque de alimentación			
Estado	Nuevo	Deteriorado	Mal estado
	X		
Clave	T-002		
Ubicación	En la parte inferior del reactor		
Función	Alimenta al reactor biológico tubular de agua proveniente del pretratamiento de la planta		
Datos técnicos			
Tipo	Rectangular cerrada con dos tapas metálicas		
Material	Concreto reforzado y mampostería		
Dimensiones			
Ancho, largo y altura	33x61x90 cm		
			

Tabla 34 Equipos de tratamiento secundario. Bomba de alimentación del reactor.

Bomba sumergible			
Estado	Nuevo	Deteriorado	Mal estado
	X		
Clave	B-002		
Ubicación	En el interior del tanque de alimentación		
Función	Llenar el tanque agua cruda que alimenta los tratamientos posteriores de la PTAR		
Datos técnicos			
Fluido	Agua residual cruda		
Tipo	Bomba sumergible con cuerpo de acero inoxidable con un interruptor flotador para operación automática. Motor con bobinas de cobre		
Marca	Truper mod BOS-1SM		
Capacidad de la bomba	216 L/min		
Potencia	1 HP		
Presión	0.78 bar		
Dimensiones			
Altura y diámetro	35x16 cm		
			

Tabla 35 Equipos de tratamiento secundario. Soplador.

Soplador			
Estado	Nuevo	Deteriorado	Mal estado
		X	
Clave	S-001		
Ubicación	En la parte inferior del soporte del RBT		
Función	Proporcionar de oxígeno al reactor para la proliferación de biomasa.		
Datos técnicos			
Fluido	Aire		
Tipo	Turbina eléctrica de vórtice, ventilador regenerativo, anillo de soplador de aire industrial		
Marca	Hailea modelo VB-290G		
Salida	500 L/min		
Potencia	390 vatios		
Presión	0.001 MPa		
Dimensiones			
Largo alto y ancho	230x199x215 mm		
			

Tabla 36 Tratamiento de lodos. Filtro de lodos.

Filtro de lodos			
Estado	Nuevo	Deteriorado	Mal estado
		X	
Clave	F-001		
Ubicación	Fijo en la pared del fondo del patio de tratamiento		
Función	Recuperar los lodos de desecho del reactor		
Datos técnicos			
Fluido	Agua residual con solidos sedimentables.		
Tipo	Lleva a cabo el proceso de lavado a contracorriente y el proceso de filtración sucesivamente a través de discos		
Marca	Azud helix automatic 201		
Flujo máximo	24 m ³ /h		
Elemento filtrante	Discos 5, 10, 20, 50, 100, 130, 200 micras.		
Dimensiones			
Largo y alto	14x60 cm		
			

Tabla 37 Tratamiento de lodos. Bomba centrífuga.

Bomba de lodos			
Estado	Nuevo	Deteriorado	Mal estado
			X
Clave	B-003		
Ubicación	Fijo en el suelo		
Función	Bombear los lodos de la salida del reactor al filtro de discos		
Datos técnicos			
Fluido	Lodos activados		
Tipo	Bomba centrífuga con motor monofásico		
Marca	SIEMENS		
Potencia	1 HP		
Tensión	115/230 V		
Caudal máximo	210 m ³ /h		
Dimensiones			
Largo, alto y ancho	40x30x30 cm		
			

Anexo IV. Técnicas analíticas para la medición de parámetros de calidad del agua

Determinación de sólidos suspendidos totales y sólidos suspendidos volátiles

Sólidos Suspendidos Totales (SST)

1. Se someten a proceso de secado tres filtros de fibra de vidrio en un horno a 105 °C por 12 hrs.
2. Enfriar los filtros en un desecador por al menos 1 hora.
3. Medir la masa de filtro y hacer un registro.
4. Agitar vigorosamente la muestra y transferir de forma inmediata y en un solo paso 50 mL a una probeta.
5. Tomar el filtro de la charola de aluminio y colocarlo en el equipo de filtración con ayuda de unas pinzas
6. Filtrar la muestra
7. Someter a proceso de secado las muestra en un horno a 105 °C por 2 horas.
8. Enfriar las muestras en un desecador y registrar las masas de los filtros con su contenido.

Cálculos. Calcular el contenido de sólidos totales como se muestra a continuación:

$$SST = (G_1 - G) * 1\,000\,000/V$$

Donde:

SST son los sólidos suspendidos totales, en mg/L.

G₁ es el peso del filtro con el residuo, después de la evaporación, en g.

G es el peso del filtro vacío a peso constante, en g.

V es el volumen de muestra, en mL.

En la Figura 15 se muestra un filtro que retuvo los sólidos suspendidos de una muestra de agua residual.



Figura 15 Determinación de sólidos suspendidos totales

Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)

1. Calcinar las muestras anteriormente obtenidas en una mufla a 550 °C de 15 a 20 minutos
2. Enfriar las muestras en un desecador y registrar las masas de los filtros con su contenido.
3. La determinación se realiza por triplicado.

Cálculos. Calcular el contenido de sólidos suspendidos volátiles como se muestra a continuación:

$$SSV = (G_1 - G_2) * 1\,000\,000 / V$$

Donde:

SSV es la materia orgánica total, en mg/L.

G₂ es el peso de la cápsula con el residuo, después de la calcinación, en g.

V es el volumen de muestra, en mL.

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

1. En un vial con taparrosca de 10 mL colocar 2.5 mL de la muestra y añadir 1.5 ml de la solución de K₂Cr₂O₇ y 3.5 mL del reactivo de H₂SO₄.
2. Introducir los viales en un reactor HACH por 2 h a 148° C.
3. Enfriar los viales a temperatura ambiente.
4. Vaciar el contenido de cada vial en una celda de vidrio y se tomar lectura de la absorbancia de las muestras a 600 nm. Todo el tiempo se ajustó la absorbancia a cero con el blanco de agua destilada.
5. Las mediciones se realizaron por triplicado.

Se generó una curva de calibración de absorbancia en función de DQO con soluciones de biftalato ácido de potasio a diferentes concentraciones. En la Figura 16 se observan las muestras para la curva de calibración.



Figura 16 Muestras para la curva de calibración de DQO.

Para esta curva de calibración se preparó una solución de biftalato ácido de potasio con una concentración que represente una DQO de 1000 mg/L. Se prepararon nueve diluciones a partir de esta solución, cada dilución representa una concentración de DQO diferente de 50 mg/L, 150 mg/L, 250 mg/L, 350 mg/L, 450 mg/L, 550 mg/L, 650 mg/L 750 mg/L y 850 mg/L. En el Gráfico 11 se aprecian los resultados obtenidos para la curva de calibración mencionada.

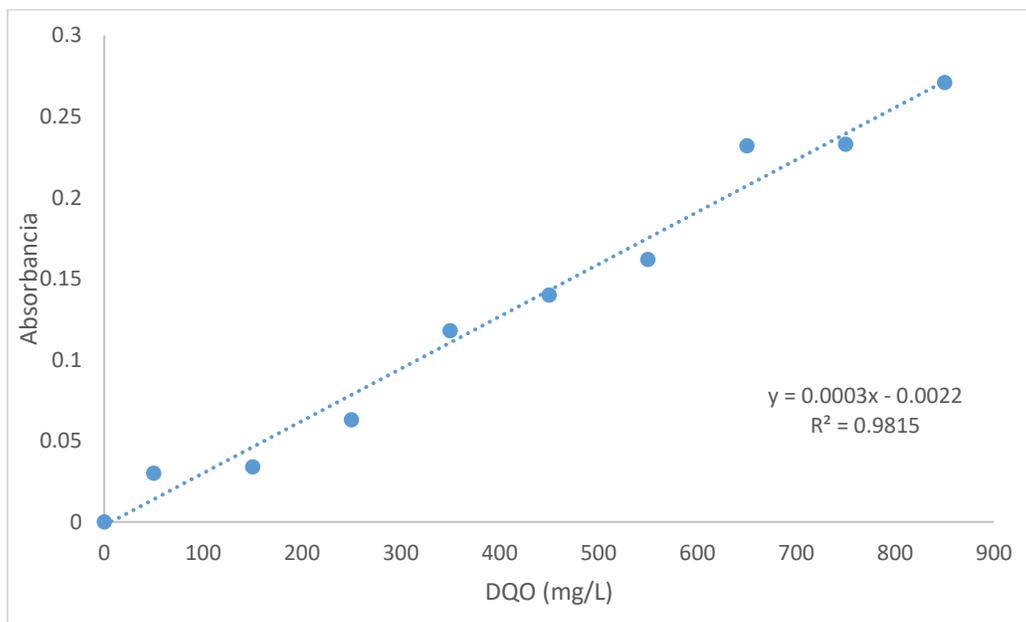


Gráfico 11 Curva de calibración de DQO.

Cálculos. Calcular el contenido de DQO como se muestra a continuación:

$$DQO = \frac{\text{Absorbancia} - b}{m}$$

Donde:

DQO es la Demanda Química de Oxígeno, en mg/L.

Absorbancia es la magnitud que cuantifica el fenómeno que ocurre con la radiación lumínica y las sustancias.

b ordenada de origen de la curva de calibración.

m pendiente de la curva de calibración.

Nitrógeno amoniacal N-NH₄

1. Adicionar 25 mL de solución buffer de boratos a una muestra de aproximadamente 50 mL de muestra de agua residual.
2. Ajustar el pH con la solución de NaOH 6N hasta pH=9.5 (si es necesario).
3. Destilar la muestra durante 5 minutos utilizando el equipo destilador BÜCHI.
4. Recoger el destilado en 25mL de solución indicadora de H₃BO₃ (esta solución color violeta vira a color verde brillante en presencia de nitrógeno).
5. Titular la solución recogida con la solución de H₂SO₄ 0.02N (hasta que vire a color violeta pálido y registrar el volumen gastado).

En la Figura 17 se muestra la diferencia de color que se genera por la presencia de nitrógeno en una muestra de agua residual al realizar el procedimiento antes descrito.



Figura 17 Recolección del destilado.

Cálculos. Calcular el contenido de N-NH₄ como se muestra a continuación:

$$NK = \frac{(A - B) * N * 14}{V} * 1000$$

Donde:

N es la Normalidad de la solución de H₂SO₄.

A es el volumen de solución de H₂SO₄ gastado en titular la muestra, en L.

B es el volumen de solución de H₂SO₄ gastado en titular el blanco, en L.

V es el volumen de la muestra, en L.

Turbidez

1. Encender el equipo y estabilizarlo de acuerdo con las indicaciones del manual de operación del fabricante.
2. Revisar la calibración del equipo con uno de los estándares dentro del intervalo de trabajo.
3. Enjuagar la celda dos veces con muestra para evitar errores por dilución.
4. Llenar la celda hasta la marca y oprimir el botón de “read” para obtener la medición.

El equipo utilizado para medir la turbidez se presenta en la Figura 18.

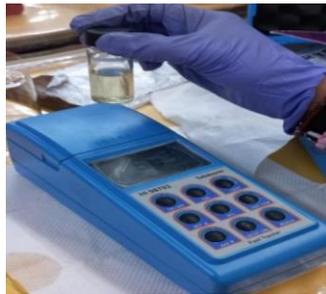


Figura 18 Medición de turbidez.

NOTA. - La muestra debe homogeneizarse perfectamente antes de realizar la lectura. Cuando la determinación se realice en campo las celdas deben de estar perfectamente secas para poder determinar la turbiedad de la muestra que se tome.

Color

1. Presionar el botón ON/OFF para encender, revisar la calibración del equipo con uno de los estándares dentro del intervalo de trabajo.
2. Llenar un vial hasta la marca de 10 mL con muestra sin filtrar, colocar la tapa y realizar la medición. Este es el color aparente.
3. Realizar este procedimiento por triplicado.

 	Manual de arranque: pretratamiento		
	<p>“TRATAMIENTO Y REÚSO IN SITU DE AGUAS RESIDUALES EN ESPACIOS PÚBLICOS CULTURALES, EDUCATIVOS, DEPORTIVOS Y DE SERVICIOS DE LA CDMX MEDIANTE PROCESOS BIOLÓGICOS Y FÍSICOQUÍMICOS, EN MÓDULOS TUBULARES COMPACTOS Y DE BAJO COSTO”</p>	No. de registro UNAM	9125c19 (SECTEI/259/2019)
 <p>GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO</p> <p>SECRETARÍA DE EDUCACIÓN, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN</p>	Fecha	06/02/2023	
	Página	1 de 10	
	Revisión	0	

Anexo V. Manual de arranque de los equipos de pretratamiento



		Manual de arranque: pretratamiento	
		“TRATAMIENTO Y REÚSO IN SITU DE AGUAS RESIDUALES EN ESPACIOS PÚBLICOS CULTURALES, EDUCATIVOS, DEPORTIVOS Y DE SERVICIOS DE LA CDMX MEDIANTE PROCESOS BIOLÓGICOS Y FÍSICOQUÍMICOS, EN MÓDULOS TUBULARES COMPACTOS Y DE BAJO COSTO”	No. de registro UNAM 9125c19 (SECTEI/259/2019)
 GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO SECRETARÍA DE EDUCACIÓN, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN		Fecha	06/02/2023
		Página	2 de 10
		Revisión	0

Índice

Introducción.....	3
Antecedentes.....	3
Metodología.....	4
1. INSPECCIÓN EN EL PRE-ARRANQUE.....	4
2. PUESTA EN MARCHA.....	5
2.1 Arranque del cárcamo de bombeo (Truper, 2019).....	5
I. Advertencias de seguridad previas al uso de bombas sumergibles.....	5
II. Partes de la bomba.....	74
III. Arranque de la bomba.....	6
2.2 Arranque del hidrociclón (Netafim).....	75
2.3 Arranque de la criba.....	7
3. EVALUACIÓN DEL ARRANQUE.....	7
3.1 Puntos de muestreo.....	7
3.2 Problemas típicos en el arranque.....	7
I. Problemas causados por el tipo de fuente de abastecimiento al cárcamo.....	8
II. Problemas de funcionamiento de las bombas.....	8
III. Problemas en el funcionamiento del hidrociclón (Solids control, 2022).....	9
IV. Problemas en el funcionamiento de la criba.....	9
Referencias.....	9

 	Manual de arranque: pretratamiento		
	<p>“TRATAMIENTO Y REÚSO IN SITU DE AGUAS RESIDUALES EN ESPACIOS PÚBLICOS CULTURALES, EDUCATIVOS, DEPORTIVOS Y DE SERVICIOS DE LA CDMX MEDIANTE PROCESOS BIOLÓGICOS Y FÍSICOQUÍMICOS, EN MÓDULOS TUBULARES COMPACTOS Y DE BAJO COSTO”</p>	No. de registro UNAM	9125c19 (SECTEI/259/2019)
Fecha		06/02/2023	
Página		3 de 10	
Revisión		0	
  <p>GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO SECRETARÍA DE EDUCACIÓN, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN</p>			

Introducción

Es necesario realizar un adecuado pretratamiento para proteger los equipos de tratamiento (principalmente bombas, aireadores, etc.) y tuberías, con el fin de evitar la entrada de objetos grandes, el desgaste de piezas por abrasión de arenas, dificultades en el tratamiento por grasas y aceites, y en general para conservar en buenas condiciones el sistema de tratamiento. Algunas de las operaciones del pretratamiento más comunes son: el cribado (rejas, rejillas y micro rejillas), desarenador, y en ocasiones también se incluye la eliminación de grasas y aceites. La mayor parte de las plantas de tratamiento cuentan con un cárcamo de bombeo posterior al pretratamiento. El agua residual usualmente se recibe en un cárcamo de bombeo que eleva el agua a las unidades posteriores al pretratamiento y al reactor biológico. (CONAGUA, 2019).

Antecedentes

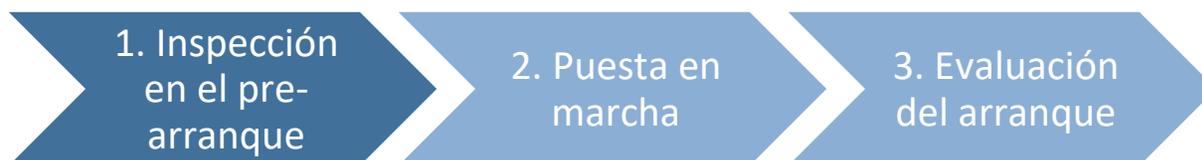
La Planta de Tratamiento de Agua Residual PTAR San Lorenzo Xochimilco consta de los siguientes equipos de pretratamiento:

- Cárcamo de bombeo: Es un tanque o depósito del cual se extraerá líquido por medio del tubo de succión de la bomba, particularmente para el servicio de traslado de agua. Este líquido puede ser extraído desde algún río, canal o de cualquier estructura de almacenamiento. (CONAGUA, 2019). La PTAR cuenta con dos cárcamos de bombeo, cada uno con una bomba sumergible.
- Hidrociclón: Es un mecanismo de filtro o separador que utiliza la fuerza centrífuga para separar sólidos de líquidos o incluso líquidos de diferentes consistencias. El hidrociclón consiste en una cámara de dos partes con un perfil interno que es cilíndrico a lo largo de su sección superior y cónico a lo largo de la mitad inferior equipado con una entrada y dos puntos de salida. Cuando se bombea una suspensión al ciclón, gira alrededor del interior de la cámara creando una fuerza centrífuga que hace que los sólidos en suspensión se separen del vehículo líquido. El agua filtrada y los sólidos salen del hidrociclón, típicamente en los extremos opuestos (Netinbag, 2020).
- Criba: La operación de cribado se emplea para remover el material grueso, generalmente flotante, contenido en algunas aguas residuales crudas, que puede obstruir o dañar bombas, tuberías y equipos de las plantas de tratamiento o interferir con la buena operación de los procesos de tratamiento. El cribado puede ser fino por medio de rejillas. (CONAGUA, 2019).

 	Manual de arranque: pretratamiento		
	“TRATAMIENTO Y REÚSO IN SITU DE AGUAS RESIDUALES EN ESPACIOS PÚBLICOS CULTURALES, EDUCATIVOS, DEPORTIVOS Y DE SERVICIOS DE LA CDMX MEDIANTE PROCESOS BIOLÓGICOS Y FISICOQUÍMICOS, EN MÓDULOS TUBULARES COMPACTOS Y DE BAJO COSTO”	No. de registro UNAM	9125c19 (SECTEI/259/2019)
Fecha		06/02/2023	
Página		4 de 10	
 GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO SECRETARÍA DE EDUCACIÓN, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN	Revisión	0	

Metodología

A continuación, se muestra la estrategia de arranque dividida en etapas que se explicarán más a detalle.



1. Inspección en el pre-arranque.

La puesta en marcha de una planta debe ser planificada de manera temprana para el inicio exitoso de las operaciones de la PTAR, lo cual es clave para preservar toda la inversión, las instalaciones y el personal involucrado.

Para la inspección del pre-arranque se deben verificar las siguientes condiciones:

- Estudiar los planos de diseño de los equipos y mantener una copia permanentemente en la planta.
- Definir las responsabilidades del ingeniero supervisor y de los operadores.
- Preparar los formatos donde se llevarán todos los registros con la información básica requerida (nombre del que llena el registro, fecha, firma, entre otros).
- Reunir información sobre la planta, incluyendo el instructivo de operación, catálogos de los equipos, manuales de arranque y otra literatura de interés que pueda ser útil en la aclaración y solución de problemas operativos.
- Inspeccionar detenidamente la planta de tratamiento y hacer una lista de herramientas rutinarias que pueden ser requeridas para reparaciones mecánicas y eléctricas, piezas de repuesto, grasa para lubricación, etc.
- Verificar que los tanques, mecanismos, ductos y canales se encuentren perfectamente nivelados, limpios y libres de obstrucciones.
- Verificar que los sistemas eléctricos (fuerza y tierras) y de control estén en perfectas condiciones de operación.
- Revisar con los operadores que los equipos mecánicos estén funcionando correctamente, bien lubricados y engrasados, que no presenten ruidos y vibraciones anormales.
- Hacer pruebas hidrostáticas en todas las estructuras construidas y de preferencia con agua limpia por si existe la necesidad de hacer reparaciones.

 	Manual de arranque: pretratamiento		
	<p>“TRATAMIENTO Y REÚSO IN SITU DE AGUAS RESIDUALES EN ESPACIOS PÚBLICOS CULTURALES, EDUCATIVOS, DEPORTIVOS Y DE SERVICIOS DE LA CDMX MEDIANTE PROCESOS BIOLÓGICOS Y FÍSICOQUÍMICOS, EN MÓDULOS TUBULARES COMPACTOS Y DE BAJO COSTO”</p>	No. de registro UNAM	9125c19 (SECTEI/259/2019)
Fecha		06/02/2023	
Página		5 de 10	
Revisión		0	

- Antes del llenado de cada estructura se deberá remover de tanques y canales restos de piedras, alambres y otros desperdicios de la construcción que puedan obstruir la planta.
- Abrir y cerrar las válvulas y revisar que su operación sea fácil y normal.
- Revisar y preparar todas las medidas de seguridad dentro de la planta especialmente aquellos que tengan que ver con equipos eléctricos.
- Reunir todas las personas que le van a colaborar al supervisor de la planta durante el arranque, definir procedimientos y responsabilidades.
- Hacer un inventario del equipo de laboratorio y solicitar los elementos faltantes.
- **Si no se presentaron problemas en los pasos anteriores, proceder a cargar el sistema con agua residual.** (HC Ingenieros SAS, 2014)

2. Puesta en marcha

Dado que el tratamiento primario consta de tres equipos, la puesta en marcha se dividirá en tres partes; arranque del cárcamo de bombeo, arranque del hidrociclón y arranque de la criba.

2.1 Arranque del cárcamo de bombeo (Truper, 2019)

I. Advertencias de seguridad previas al uso de bombas sumergibles:

- ✓ Dado que la bomba puede arrancar o pararse automáticamente, no introducir nunca las manos u otros objetos cuando esté conectada a la red eléctrica. Tener cuidado de que las conexiones eléctricas se hagan en un lugar seco y protegidas de cualquier inundación.
- ✓ Evitar que la bomba trabaje en seco.
- ✓ Revisar la línea de tensión.
- ✓ Antes de usar, despejar la línea de salida. Observar el nivel mínimo de agua y la altura máxima de suministro. La bomba debe estar dentro del agua que se va a bombear, en una posición estable (especialmente para operación automática).

II. Partes de la bomba.

Las principales piezas que componen una bomba sumergible son su motor, el adaptador de acoplamiento y el cable de la alimentación. El motor está sellado para evitar que el líquido acceda a la parte eléctrica y pueda provocar un cortocircuito. En la Imagen I se pueden apreciar las partes de la bomba sumergible.

		Manual de arranque: pretratamiento	
		“TRATAMIENTO Y REÚSO IN SITU DE AGUAS RESIDUALES EN ESPACIOS PÚBLICOS CULTURALES, EDUCATIVOS, DEPORTIVOS Y DE SERVICIOS DE LA CDMX MEDIANTE PROCESOS BIOLÓGICOS Y FÍSICOQUÍMICOS, EN MÓDULOS TUBULARES COMPACTOS Y DE BAJO COSTO”	No. de registro UNAM 9125c19 (SECTEI/259/2019)
 GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO SECRETARÍA DE EDUCACIÓN, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN		Fecha 06/02/2023	Página 6 de 10
		Revisión 0	

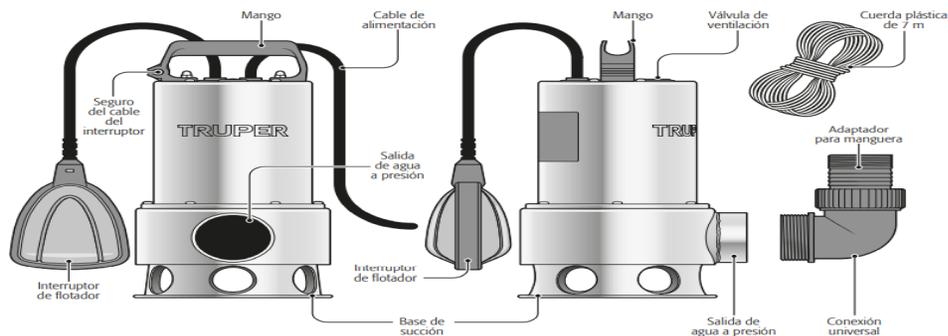


Imagen 1 Partes la bomba sumergible Trupper BOS-1SM. (Trupper, 2019)

III. Arranque de la bomba

1. El interruptor del flotador enciende y apaga la bomba de forma automática dependiendo de la altura del nivel del agua. Cuando el flotador se encuentra a una altura de aproximadamente 53 cm enciende la bomba, y cuando baja hasta una altura aproximada de 10 cm apaga la bomba.
2. Para controlar el interruptor del flotador de forma manual y evitar que la bomba se apague de manera automática, es necesario asegurar el cable del interruptor en el seguro del cable para que el flotador no baje hasta apagar la bomba.
3. Evitar la operación en seco, de lo contrario la bomba sufriría un desgaste excesivo. Cuando el agua deja de fluir, desconectar la bomba de inmediato.
4. El protector térmico del motor apaga la bomba de manera automática en caso de sobrecalentamiento. Una vez que se enfríe, el motor se volverá a encender de manera automática.
5. Después de haber bombeado agua que deje residuos, se debe enjuagar la bomba con agua limpia.
6. La bomba sumergible viene equipada con una válvula de ventilación cuya función es la de evitar fugas de presión en la bomba. Se puede meter el agua por la válvula, esto no es ningún defecto.

2.2 Arranque del hidrociclón (Netafim)

1. Instalar y conectar el hidrociclón verticalmente con el tanque de sedimentación debajo del hidrociclón.
2. Prestar especial atención a la dirección correcta del flujo: la entrada horizontal y la salida vertical superior están claramente marcada por flechas.
3. Instalar la válvula de bola manual en el puerto de descarga del tanque de sedimentación.

 	Manual de arranque: pretratamiento		
	“TRATAMIENTO Y REÚSO IN SITU DE AGUAS RESIDUALES EN ESPACIOS PÚBLICOS CULTURALES, EDUCATIVOS, DEPORTIVOS Y DE SERVICIOS DE LA CDMX MEDIANTE PROCESOS BIOLÓGICOS Y FÍSICOQUÍMICOS, EN MÓDULOS TUBULARES COMPACTOS Y DE BAJO COSTO”	No. de registro UNAM	9125c19 (SECTEI/259/2019)
Fecha		06/02/2023	
Página		7 de 10	
 GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO SECRETARÍA DE EDUCACIÓN, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN	Revisión	0	

4. El tanque de sedimentación se puede lavar manual o automáticamente con un controlador de riego, cuando se instala una válvula manual, drenar el tanque de sedimentación a intervalos periódicos de acuerdo con las siguientes sugerencias: el tanque de sedimentación se debe drenar cuando este 1/3 lleno.
5. No permitir que el tanque de sedimentación se llene más de la mitad de su volumen, de lo contrario la arena no se enjuagará correctamente. Como resultado, la arena girará, no tendrá lugar para drenar y causará pequeños agujeros en el cuello del hidrociclón.

2.3 Arranque de la criba

1. Verificar que la criba haya sido instalada correctamente.
2. Hacer fluir el agua residual a través de la criba.
3. Verificar que no existan fugas.
4. Retirar los residuos recuperados por la criba manualmente con ayuda de un rastrillo y el equipo de protección personal pertinente.

3. Evaluación del arranque

El control del proceso se basa en la calidad del afluente y efluente. Las muestras se analizan visualmente dado que en esta etapa del tratamiento únicamente se eliminan los contaminantes de mayor tamaño, permitiendo obtener información básica. Un efluente libre de arenas y partículas de gran tamaño indica un correcto funcionamiento del pretratamiento.

3.1 Puntos de muestreo

Posterior al arranque, es necesario definir los puntos de muestreo para tener un control en los parámetros de medición de calidad del agua.

- ✓ El primer punto de muestreo corresponde a la entrada de la PTAR y el segundo a la salida del RBT (ver “Manual de Arranque del Reactor Biológico Tubular”)

3.2 Problemas típicos en el arranque

A continuación, se presentan los problemas más comunes en el proceso de arranque de los equipos de pretratamiento que conforman la Planta de Tratamiento de Agua Residual PTAR San Lorenzo Xochimilco.

 	Manual de arranque: pretratamiento		
	“TRATAMIENTO Y REÚSO IN SITU DE AGUAS RESIDUALES EN ESPACIOS PÚBLICOS CULTURALES, EDUCATIVOS, DEPORTIVOS Y DE SERVICIOS DE LA CDMX MEDIANTE PROCESOS BIOLÓGICOS Y FÍSICOQUÍMICOS, EN MÓDULOS TUBULARES COMPACTOS Y DE BAJO COSTO”	No. de registro UNAM	9125c19 (SECTEI/259/2019)
Fecha		06/02/2023	
Página		8 de 10	
 GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO SECRETARÍA DE EDUCACIÓN, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN	Revisión	0	

I. Problemas causados por el tipo de fuente de abastecimiento al cárcamo

Las fuentes de abastecimiento producen frecuentemente problemas que pueden ser muy serios y perjudicar notablemente el funcionamiento hidráulico del cárcamo.

Arrastre de sólidos: La gran cantidad de materia orgánica y de sólidos en suspensión son un factor que influye decisivamente en las tomas para bombeo de aguas negras. Estos pueden obligar al uso de desmenuzadores o de bombas inatascables o bien de estructuras desarenadoras que encarecen la obra.

Obstrucción por cuerpos flotantes: Las basuras que por su poca densidad flotan, así como cuerpos de animales, constituyen importantes obstruores de las rejillas.

II. Problemas de funcionamiento de las bombas

Conocer los problemas más comunes de las bombas sumergibles ayuda a prevenir y reparar las situaciones límite por algún fallo en el sistema de bombeo. En la Tabla 1 se enlistan los problemas probables, su causa y algunas soluciones.

Tabla 1. Principales problemas en las bombas.

Problema	Causa	Solución.
La bomba no enciende o se detiene de repente durante la operación	<ul style="list-style-type: none"> No hay corriente eléctrica. El flotador no cambia de posición. El interruptor térmico apagó la bomba debido a un sobrecalentamiento. Hay partículas de suciedad en la base de succión 	<ul style="list-style-type: none"> Revisar el cable, la clavija y el fusible. Colocar la bomba de manera adecuada en el fondo de la pileta, pozo, etc. Desconectar la clavija y limpiar la turbina. Asegurarse que la temperatura máxima del agua sea de 35°C. Desconectar la clavija y limpiar la base de succión
No hay flujo	<ul style="list-style-type: none"> El orificio de succión está tapado. La manguera de presión está doblada. El aire se cierra en la base de succión. Al arrancar la bomba la altura del agua cae por debajo del nivel mínimo de agua 	<ul style="list-style-type: none"> Limpiar el orificio de aspiración de agua. Colocar correctamente la manguera. Esperar un minuto como máximo hasta que la bomba se desgasifique automáticamente por la válvula de ventilación. En caso necesario, apagar y volver a encender. Sumergir la bomba a mayor profundidad
La bomba no se apaga	<ul style="list-style-type: none"> El flotador no se hunde. 	<ul style="list-style-type: none"> Colocar la bomba de manera adecuada en el fondo de la pileta, pozo, etc

 	Manual de arranque: pretratamiento		
	“TRATAMIENTO Y REÚSO IN SITU DE AGUAS RESIDUALES EN ESPACIOS PÚBLICOS CULTURALES, EDUCATIVOS, DEPORTIVOS Y DE SERVICIOS DE LA CDMX MEDIANTE PROCESOS BIOLÓGICOS Y FÍSICOQUÍMICOS, EN MÓDULOS TUBULARES COMPACTOS Y DE BAJO COSTO”	No. de registro UNAM	9125c19 (SECTEI/259/2019)
Fecha		06/02/2023	
Página		9 de 10	
 GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO SECRETARÍA DE EDUCACIÓN, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN	Revisión	0	

Flujo insuficiente	<ul style="list-style-type: none"> • El orificio de aspiración está tapado. • La capacidad de bombeo puede reducirse debido al paso de agua abrasiva y sucia. 	<ul style="list-style-type: none"> • Limpiar el orificio de aspiración de agua.
La bomba se apaga después de un período corto de operación	<ul style="list-style-type: none"> • La bomba tiene cortes térmicos debido a agua sucia. 	<ul style="list-style-type: none"> • Desconectar la clavija principal. Limpiar la bomba y el eje. • Verificar que la temperatura del agua no sobrepase los 35° C

III. Problemas en el funcionamiento del hidrociclón (Solids control, 2022)

Durante el arranque y la operación, el hidrociclón podrá tener algunas fallas. Si no se puede descubrir y resolver a tiempo, es probable que deba detenerlo para evitar una falla estructural mayor. En la Tabla 2 se enlistan los principales problemas en el hidrociclón.

Tabla 2. Principales problemas en el hidrociclón

Problema.	Solución.
Baja densidad de subdesbordamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Si el hidrociclón no se alimenta correctamente, reemplace la boquilla de descarga/tubo de rebose • El tamaño de la boquilla de descarga es incorrecto, use la boquilla de descarga del tamaño correcto
Vibración de hidrociclón violentamente	<ul style="list-style-type: none"> • Si ocurre una succión vacía, use la tubería de succión. • Una gran cantidad de material, cambie los parámetros de alimentación/hidrociclón • El tubo de rebose está deformado y se reemplaza el tubo de rebose; parar y comprobar un posible bloqueo
Bloqueo del sistema del hidrociclón	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar el orificio del tamiz

IV. Problemas en el funcionamiento en la criba

Dentro del pretratamiento pueden presentarse problemas en el cribado. En la Tabla 3 se presenta el indicador u observación del problema, la causa probable del problema y la solución propuesta para rejillas de limpieza manual (CONAGUA, 2019).

 	Manual de arranque: pretratamiento		
	“TRATAMIENTO Y REÚSO IN SITU DE AGUAS RESIDUALES EN ESPACIOS PÚBLICOS CULTURALES, EDUCATIVOS, DEPORTIVOS Y DE SERVICIOS DE LA CDMX MEDIANTE PROCESOS BIOLÓGICOS Y FÍSICOQUÍMICOS, EN MÓDULOS TUBULARES COMPACTOS Y DE BAJO COSTO”	No. de registro UNAM	9125c19 (SECTEI/259/2019)
Fecha		06/02/2023	
Página		9 de 10	
 GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO SECRETARÍA DE EDUCACIÓN, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN	Revisión	0	

Tabla 3. Problemas y acciones correctivas en el cribado.

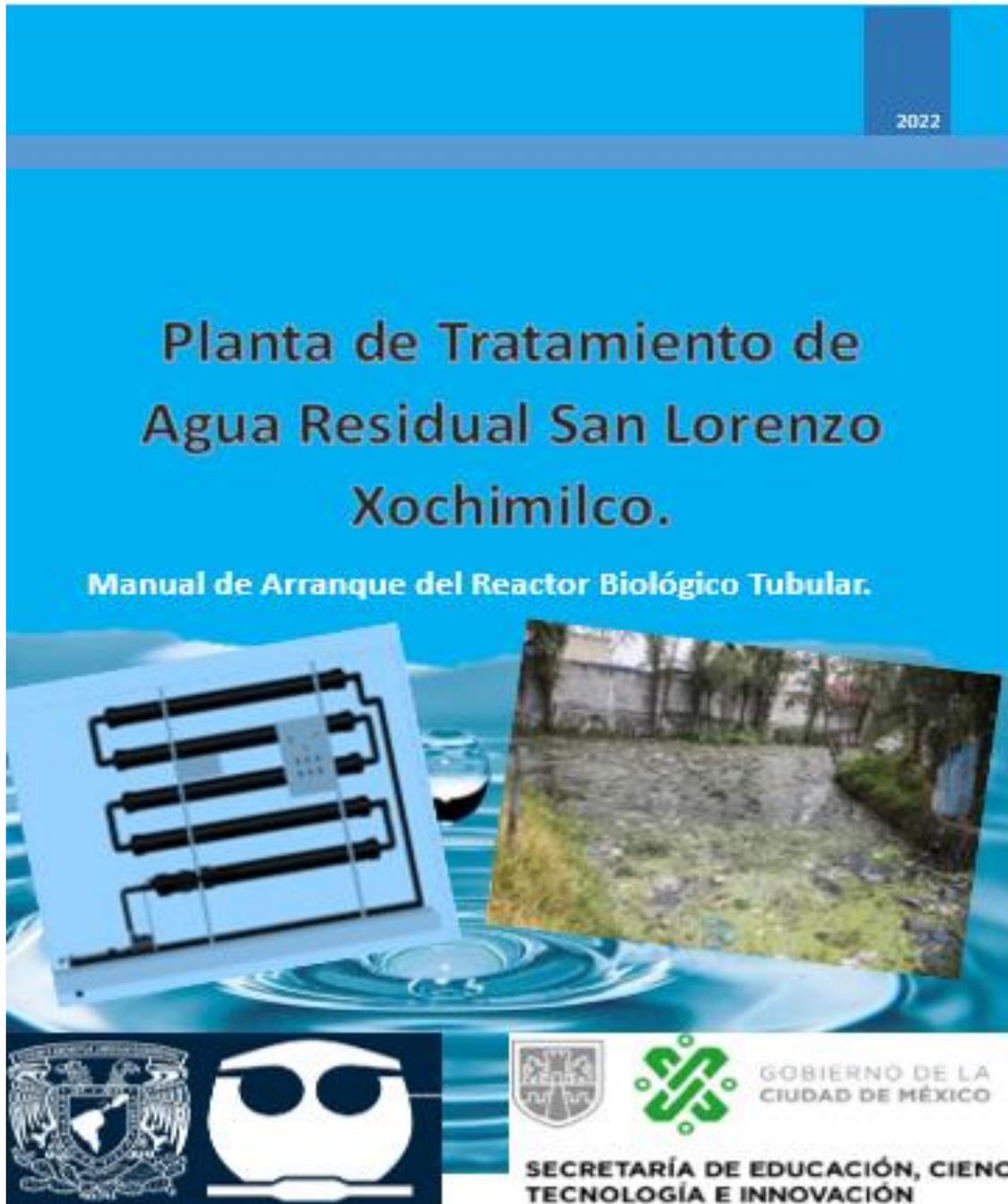
Problema	Indicador/Observación	Causa probable	Solución
Olores repugnantes, presencia de moscas y otros insectos	Acumulación de basura en la rejilla y contenedores	Falta de limpieza	Retirar la basura y aumentar la frecuencia de limpieza
Atascamiento excesivo de la rejilla	Cantidad inusual de la basura en las aguas residuales	<ul style="list-style-type: none"> •Aumento de desechos. •Frecuencia de limpieza inadecuada. 	<ul style="list-style-type: none"> •Identificar la fuente de los desechos causantes del problema. •Aumentar la frecuencia de limpieza

Referencias

- CONAGUA. (2019). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Cálculo, estudio y diseño de instalaciones mecánicas.* (Vol. 15). México. Obtenido de <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro15.pdf>
- CONAGUA. (2019). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Introducción al tratamiento de aguas residuales municipales.* (Vol. 25). México. Obtenido de <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro25.pdf>
- CONAGUA. (2019). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: pretratamiento y tratamiento primario.* (Vol. 46). México. Obtenido de <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro46.pdf>
- HC Ingenieros SAS. (2014). *Manual de operación, mantenimiento y control de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira.* Medellín. Obtenido de <https://www2.utp.edu.co/cms-utp/data/bin/UTP/web/uploads/media/contratacion/documentos/1480454882-INSTRUCTIVODEOPERACION.pdf>
- Netafim. (s.f.). *Hydrocyclone sand separators. Operation, installation and maintenance guide.* California. Obtenido de <https://www.netafimusa.com/bynder/4666C97C-52D6-4C5A-B6ACB9229C80EB18-hydrman-hydrocyclone-manual.pdf>
- Netinbag. (2020). *¿Qué es un hidrociclón?* Obtenido de <https://www.netinbag.com/es/manufacturing/what-is-a-hydrocyclone.html>
- Solids control . (2022). *Hydrocyclones: 11 troubles and troubleshooting.* Obtenido de <https://www.dcsolidscontrol.com/news/hydrocyclones-troubles-and-troubleshooting.html#:~:text=Frequent%20failures%20of%20hydrocyclones%20include%20abnormal%20superb%20granularity%2C,troubleshooting%20concerning%20hydrocyclones.%20Trouble%201%3A%20low%20Und>
- Truper. (2019). *Instructivo de bomba sumergible.* México. Obtenido de <https://www.truper.com/admin/descargables/manual/12607.pdf>

 	No. de registro UNAM: 9125c19 (SECTEI/259/2019):	
	Arranque del sistema biológico	
 <small>GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO</small> SECRETARÍA DE EDUCACIÓN, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN	Fecha: 05/11/2023 Página: 1 de 14	
	Rev:	0
	“TRATAMIENTO Y REÚSO IN SITU DE AGUAS RESIDUALES EN ESPACIOS PÚBLICOS CULTURALES, EDUCATIVOS, DEPORTIVOS Y DE SERVICIOS DE LA CDMX MEDIANTE PROCESOS BIOLÓGICOS Y FÍSICOQUÍMICOS, EN MÓDULOS TUBULARES COMPACTOS Y DE BAJO COSTO”	

Anexo VI. Manual de arranque del reactor biológico tubular



		No. de registro UNAM: 9125c19 (SECTEI/259/2019):	
		Arranque del sistema biológico	
“TRATAMIENTO Y REÚSO IN SITU DE AGUAS RESIDUALES EN ESPACIOS PÚBLICOS CULTURALES, EDUCATIVOS, DEPORTIVOS Y DE SERVICIOS DE LA CDMX MEDIANTE PROCESOS BIOLÓGICOS Y FÍSICOQUÍMICOS, EN MÓDULOS TUBULARES COMPACTOS Y DE BAJO COSTO”		Fecha:	05/11/2023
		Página:	2 de 14
		Rev:	0
 GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO SECRETARÍA DE EDUCACIÓN, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN			

ÍNDICE

Introducción.....	3
Antecedentes.....	3
Metodología del proceso	4
<i>Preparación previa al arranque y puesta en marcha del sistema</i>	<i>4</i>
1.1 Análisis del agua residual	5
1.2 Revisión del equipo electromecánico	5
1.3 Revisión hidráulica de los tanques	5
<i>Inoculación del reactor</i>	<i>5</i>
2.1 Instrucciones de inoculación	6
<i>Alimentación del reactor con aguas residuales.....</i>	<i>6</i>
3.1 Operación en continuo del reactor biológico tubular	7
<i>Plan de muestreo.....</i>	<i>7</i>
4.1 Frecuencia de monitoreo	7
4.2 Cronograma de actividades.....	9
4.3 Puntos de muestreo	9
4.4 Identificación de las muestras.....	10
Técnicas analíticas.....	10
Parámetros de control de procesos.....	11
Anexo.....	11
<i>Documentos técnicos para el monitoreo previo al arranque</i>	<i>11</i>
<i>Verificación de los equipos de procesos</i>	<i>12</i>
<i>Control de parámetros</i>	<i>13</i>
REFERENCIAS	14

 	No. de registro UNAM: 9125c19 (SECTEI/259/2019):	
	Arranque del sistema biológico	
  GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO SECRETARÍA DE EDUCACIÓN, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN	Fecha:	05/11/2023
	Página:	3 de 14
	Rev:	0
“TRATAMIENTO Y REÚSO IN SITU DE AGUAS RESIDUALES EN ESPACIOS PÚBLICOS CULTURALES, EDUCATIVOS, DEPORTIVOS Y DE SERVICIOS DE LA CDMX MEDIANTE PROCESOS BIOLÓGICOS Y FÍSICOQUÍMICOS, EN MÓDULOS TUBULARES COMPACTOS Y DE BAJO COSTO”		

Introducción

Dentro del tratamiento de aguas residuales, las operaciones unitarias de separación física no son suficientes para alcanzar la calidad de agua requerida para los diferentes usos disponibles, debido predominantemente a los contaminantes solubles, los cuales son removidos mediante procesos bioquímicos (CONAGUA, 2019).

El arranque de cualquier proceso biológico lleva tiempo y deben tenerse ciertos cuidados para lograr su estabilización, así como un buen funcionamiento del proceso. Un arranque típico se compone de dos fases: arranque mecánico y arranque del proceso (CONAGUA, 2019).

En este manual se presentan instrucciones, recomendaciones, y documentos de seguimiento para el arranque del Reactor Biológico que se encuentra en la planta de tratamiento de agua residual en el barrio de San Lorenzo, Xochimilco. Dado que nos encontramos con una tecnología innovadora y que el biorreactor opera con un gasto piloto, se recabó información de algunos sistemas biológicos a escala industrial, piloto y laboratorio como los sistemas de lodos activados, RAFA, FAFA, Biodiscos y Filtro Rociador, con el fin de elaborar una guía para la correcta operación y seguimiento del sistema biológico en cuestión.

Generalmente, el arranque de sistemas biológicos suele ser tardado, debido a dificultades de operación. Sin embargo, se sabe que el periodo de arranque y estabilización del RBT a escala laboratorio es de poco menos de 4 semanas (García & Durán, 2017).

Antecedentes

El reactor biológico tubular utiliza una novedosa tecnología de fijación de biomasa que le permite ser compacto, dándole la capacidad de ser instalado en sitios donde se requiera un tratamiento de agua a pequeña escala, el tratamiento in situ reduce gastos de logística de alcantarillado y conducción del agua.

El reactor está conformado por 8 tubos de 6” de PVC cédula 80 lo que le confiere resistencia a altas presiones, la longitud de cada tubo es de 2 metros por lo que en total nos proporciona 16 metros de tratamiento, en estos 16 metros del reactor tubular se localiza internamente una fibra polimérica no tejida de poliéster en una configuración especial que sirve de soporte para los microorganismos que degradan la materia orgánica del agua residual a tratar, ésta consiste en 5 círculos concéntricos con cierta separación para permitir el flujo del agua cruda con oxígeno disuelto. La alta porosidad de la fibra le permite tener un área superficial basta en un volumen pequeño y debido a que el área superficial de la fibra es proporcional al área de biopelícula se cuenta con una extensa zona de tratamiento (García, 2019). En la Figura 1 se muestra un esquema que representa la configuración del reactor bilógico tubular.

En la parte inferior del reactor se localiza un difusor de aire el cual cuenta con una membrana semipermeable que genera burbujas de milímetros de diámetro y esto proporciona el oxígeno disuelto necesario para la degradación aerobia en el reactor a partir del metabolismo del microorganismo. El reactor cuenta con recirculación al final del módulo para así mejorar la remoción de materia orgánica aumentando los tiempos de residencia hidráulicos.

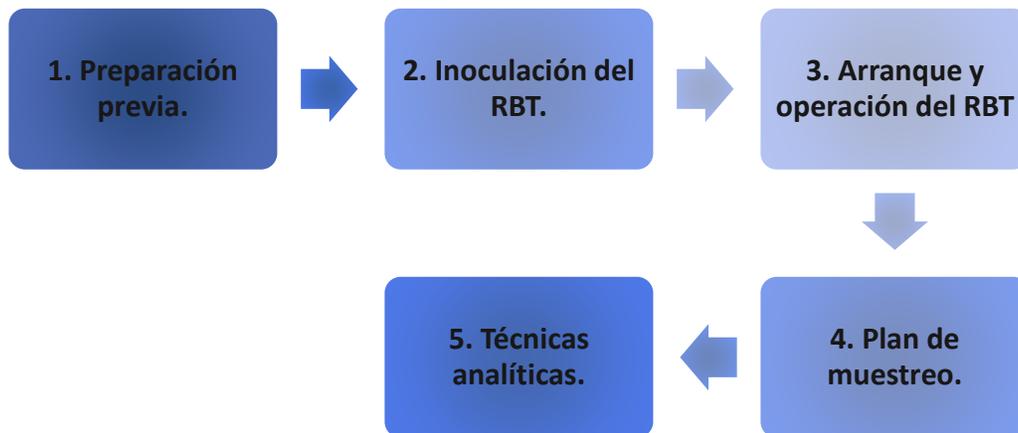
 	No. de registro UNAM: 9125c19 (SECTEI/259/2019):	
	Arranque del sistema biológico	
 GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO SECRETARÍA DE EDUCACIÓN, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN	Fecha: 05/11/2023	Página: 4 de 14
	“TRATAMIENTO Y REÚSO IN SITU DE AGUAS RESIDUALES EN ESPACIOS PÚBLICOS CULTURALES, EDUCATIVOS, DEPORTIVOS Y DE SERVICIOS DE LA CDMX MEDIANTE PROCESOS BIOLÓGICOS Y FÍSICOQUÍMICOS, EN MÓDULOS TUBULARES COMPACTOS Y DE BAJO COSTO”	
	Rev: 0	



Figura 1. Esquema representativo del Reactor Biológico Tubular.

Metodología del proceso

A continuación, se muestra la estrategia de arranque dividida en etapas que se explicarán más a detalle.



Preparación previa al arranque y puesta en marcha del sistema

Para tener éxito en el arranque de la planta, se requiere una planeación cuidadosa. Los factores ambientales que afectan al proceso son muchos como para iniciar el arranque sin preparación previa. Las actividades requeridas antes de arrancar son: **análisis del agua residual, revisión del equipo electromecánico y revisión hidráulica de los tanques** (CONAGUA, 2019).

 	No. de registro UNAM: 9125c19 (SECTEI/259/2019):	
	Arranque del sistema biológico	
 <small>GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO</small> <small>SECRETARÍA DE EDUCACIÓN, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN</small>	<p>“TRATAMIENTO Y REÚSO IN SITU DE AGUAS RESIDUALES EN ESPACIOS PÚBLICOS CULTURALES, EDUCATIVOS, DEPORTIVOS Y DE SERVICIOS DE LA CDMX MEDIANTE PROCESOS BIOLÓGICOS Y FÍSICOQUÍMICOS, EN MÓDULOS TUBULARES COMPACTOS Y DE BAJO COSTO”</p>	Fecha: 05/11/2023
		Página: 5 de 14
	Rev: 0	

1.1 *Análisis del agua residual*

Esta actividad es importante debido a que cualquier PTAR ha sido diseñada bajo ciertos criterios o parámetros de calidad de agua residual, por lo que, si el agua que se va a tratar está muy por arriba o por debajo de las concentraciones propuestas, se tendrá dificultad en el arranque y por tanto en la estabilización del proceso, lo que no permitirá alcanzar la calidad de agua residual tratada deseada.

1.2 *Revisión del equipo electromecánico*

Como primera etapa de esta actividad se realiza un listado de todos los equipos electromecánicos utilizados en el sistema biológico y posteriormente se hará una prueba de arranque y paro, esto con la finalidad de verificar que no estén obstruidos los motores.

1.3 *Revisión hidráulica de los tanques*

Una vez concluida la revisión de equipos y de fallas que se hayan presentado se procederá a realizar el llenado de las unidades para verificar que no existan fugas o grietas en las paredes.

➤ **Pasos para la revisión hidráulica de los interiores del reactor: aireación.**

- 1) Alimentar con agua de primer uso al reactor.
- 2) Encender el sistema de aireación para verificar que no existan fugas en las conexiones, si se presentan repararlas.
- 3) Agregar agua hasta cubrir el difusor. Encender el sistema de aireación y verificar la instalación de los difusores.
- 4) Medir la cantidad de oxígeno disuelto antes y después de iniciar el arranque del sistema de aireación en la entrada y en la salida del reactor.

Inoculación del reactor

La duración del arranque depende de parámetros biológicos, químicos y físicos. El arranque está influenciado por la concentración y composición de las aguas residuales, el volumen, la actividad y la adaptación del inóculo, condiciones ambientales y los parámetros de operación.

Los procesos altamente eficientes requieren períodos de puesta en marcha más prolongados, un mejor control operativo y operadores más calificados, para que el rendimiento máximo del sistema sea alcanzado, con riesgos mínimos de falla del proceso (Chernicharo, 2007)..

 	No. de registro UNAM: 9125c19 (SECTEI/259/2019):	
	Arranque del sistema biológico	
 GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO SECRETARÍA DE EDUCACIÓN, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN	Fecha:	05/11/2023
	Página:	6 de 14
	Rev:	0
“TRATAMIENTO Y REÚSO IN SITU DE AGUAS RESIDUALES EN ESPACIOS PÚBLICOS CULTURALES, EDUCATIVOS, DEPORTIVOS Y DE SERVICIOS DE LA CDMX MEDIANTE PROCESOS BIOLÓGICOS Y FÍSICOQUÍMICOS, EN MÓDULOS TUBULARES COMPACTOS Y DE BAJO COSTO”		

Para la inoculación de los sistemas biológicos existen tres escenarios de arranque con el fin de mantener las condiciones idóneas para el desarrollo de la biomasa: utilizando un inóculo adaptado, un inóculo no adaptado y sin la utilización de inóculo.

- **Utilizando inóculo adaptado al agua residual a tratar (forma rápida).** La puesta en marcha del sistema se produce rápido, de una manera satisfactoria, ya que no hay necesidad de aclimatación de los lodos.
- **Utilizando inóculo no adaptado al agua residual a tratar (periodo de aclimatación).** En este caso, la puesta en marcha del sistema pasa a través de un periodo de aclimatación, incluyendo una fase de selección microbiana.
- **Sin la utilización de inóculo.** La puesta en marcha requiere de un tiempo largo, dependiendo del contenido de microorganismos de las aguas residuales a tratar, que generalmente es muy pequeña (Chernicharo, 2007).

Dadas las condiciones de la planta y disposición del espacio, se llevará a cabo la formación de la biopelícula sin la utilización de inóculo.

2.1 Instrucciones de inoculación

A continuación, se muestra una serie de instrucciones para la inoculación del RBT.

1. Se utiliza el agua residual proveniente del tratamiento primario de la planta y se llena la cisterna hasta un 70% de la capacidad, (es importante que el afluente haya sido tratado previamente, debido a que algunos contaminantes como arenas, basuras y trozos de algas acuáticas pueden dañar el interior del RBT e interferir con el desarrollo de la biopelícula).
2. Iniciar la operación del RBT con el agua residual a recirculación total.
3. Iniciar la operación del suministro de oxígeno (sistema de aireación) y mantener una recirculación del 100%.
4. Mantener una concentración de oxígeno disuelto mayor a 2 ± 0.5 mg/L, monitorear de ser posible diariamente.
5. Recircular el agua residual durante un período aproximado de 5 días para permitir la adaptación gradual de la biomasa a la temperatura local y a la fibra polimérica.
6. Continuar con la segunda fase de arranque.

Alimentación del reactor con aguas residuales

1. Después de finalizar el período de aclimatación de la biomasa en el reactor, se inicia la alimentación con agua residual. Por lo que se requiere llenar la cisterna de alimentación del reactor diariamente.
2. Llenar el reactor con un flujo de agua residual de $5 \text{ m}^3/\text{día}$ y continuar con la operación, esperar 24 horas y recolectar muestras de la salida del reactor para analizar los parámetros de control.

 	No. de registro UNAM: 9125c19 (SECTEI/259/2019):	
	Arranque del sistema biológico	
  GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO SECRETARÍA DE EDUCACIÓN, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN	Fecha:	05/11/2023
	Página:	7 de 14
	Rev:	0
“TRATAMIENTO Y REÚSO IN SITU DE AGUAS RESIDUALES EN ESPACIOS PÚBLICOS CULTURALES, EDUCATIVOS, DEPORTIVOS Y DE SERVICIOS DE LA CDMX MEDIANTE PROCESOS BIOLÓGICOS Y FÍSICOQUÍMICOS, EN MÓDULOS TUBULARES COMPACTOS Y DE BAJO COSTO”		

3. Si los parámetros analizados están dentro de los rangos establecidos, se puede seguir alimentando el reactor en forma intermitente.
4. Implementar y desarrollar un monitoreo de rutina del proceso de tratamiento.
5. Continuar con la operación en continuo del sistema.

3.1 Operación en continuo del reactor biológico tubular

1. Llenar el reactor con un flujo de agua residual de 11.5 m³/día y continuar con la operación continua, esperar 24 horas y recolectar muestras de la entrada y salida del reactor para analizar los parámetros de control.
2. Si los parámetros analizados están dentro de los rangos establecidos, se puede seguir alimentando el reactor en forma continua.
3. Si los parámetros analizados no están dentro de los rangos establecidos, el flujo puede ser incrementado o reducido hasta obtener parámetros aceptables.
4. Implementar y desarrollar un monitoreo de rutina del proceso de tratamiento.

Plan de muestreo

El muestreo de planta constituye una parte medular para el análisis fisicoquímico de la fase de arranque y operación. El cuidado que se tenga en la toma de la muestra determinará en gran parte la validez de los resultados. Con el objetivo de apoyar con esta tarea, se abordó el plan de muestreo de la siguiente manera.

4.1 Frecuencia de monitoreo

La frecuencia de los análisis depende del tamaño de la planta y de los datos requeridos por las autoridades correspondientes, ya que los estándares de calidad del efluente varían de un país a otro. Para el control del proceso son importantes los parámetros de DQO, sólidos suspendidos y nitrógeno amoniacal, además de parámetros generales tales como temperatura, pH, color, turbidez, etc. (CONAGUA, 2019).

A continuación, se presenta el plan de muestreo elaborado para del reactor biológico tubular en la PTAR San Lorenzo Xochimilco, dividido en dos fases:

 	No. de registro UNAM: 9125c19 (SECTEI/259/2019):	
	Arranque del sistema biológico	
 GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO SECRETARÍA DE EDUCACIÓN, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN	“TRATAMIENTO Y REÚSO IN SITU DE AGUAS RESIDUALES EN ESPACIOS PÚBLICOS CULTURALES, EDUCATIVOS, DEPORTIVOS Y DE SERVICIOS DE LA CDMX MEDIANTE PROCESOS BIOLÓGICOS Y FÍSICOQUÍMICOS, EN MÓDULOS TUBULARES COMPACTOS Y DE BAJO COSTO”	
	Página:	8 de 14
Rev:	0	



i. Plan de muestreo durante los primeros 20 días de arranque

Para realizar el monitoreo del proceso de tratamiento se debe definir una rutina de recolección de muestras y parámetros fisicoquímicos, los cuales serán analizados. En la Tabla 1 se presenta un programa de monitoreo para el afluente/efluente del Reactor Biológico Tubular.

En los primeros 5 días de arranque se tomarán muestras diariamente de la recirculación del sistema, de igual forma para los siguientes 15 días correspondientes a la formación de biomasa.

Tabla 1. Plan de muestreo adaptado para el RBT.

	PTAR San Lorenzo Xochimilco
	Plan de muestreo durante 20 días
Afluente/Efluente	
DQO	Diario
SST	Diario
SSV	Diario
N-NH ₄	Diario
Turbidez	Diario
Color	Diario
Oxígeno Disuelto	Diario

ii. Plan de muestreo durante 1 semana

Esta parte corresponde al monitoreo de operación posterior al arranque.

Tabla 2. Plan de muestreo durante una semana.

	PTAR San Lorenzo Xochimilco
	Plan de muestreo durante una semana
Afluente/Efluente	

 	No. de registro UNAM: 9125c19 (SECTEI/259/2019):	
	Arranque del sistema biológico	
 GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO SECRETARÍA DE EDUCACIÓN, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN	“TRATAMIENTO Y REÚSO IN SITU DE AGUAS RESIDUALES EN ESPACIOS PÚBLICOS CULTURALES, EDUCATIVOS, DEPORTIVOS Y DE SERVICIOS DE LA CDMX MEDIANTE PROCESOS BIOLÓGICOS Y FÍSICOQUÍMICOS, EN MÓDULOS TUBULARES COMPACTOS Y DE BAJO COSTO”	Fecha: 05/11/2023
		Página: 9 de 14
		Rev: 0

DQO	Diario
SST	Diario
SSV	Diario
N-NH ₄	Diario
Turbidez	Diario
Color	Diario
Oxígeno Disuelto	Diario

iii. *Plan de muestreo posterior a los 25 días de operación*

Después de los primeros 25 días de operación de la planta y de verificar que no existan fluctuaciones en los parámetros medidos se considera que el sistema ha alcanzado su estabilización, por lo tanto, es recomendable hacer las mediciones del afluente/efluente cada 3 días.

4.2 *Cronograma de actividades*

En la Tabla 3 se describen actividades de muestreo.

Tabla 3. *Cronograma de actividades.*

Numero	Fase	Actividades	Mes 1			
			1	2	3	4
1	Arranque	Se medirán los parámetros de calidad del agua diariamente. Esta etapa corresponde al arranque del sistema con un total de tres semanas .				
2	Operación	En esta etapa se medirán los parámetros de calidad del agua diariamente durante una semana .				

4.3 *Puntos de muestreo*

Para el monitoreo del proceso de tratamiento, la rutina de recolección de la muestra y los parámetros fisicoquímicos a ser analizados deberán ser definidos durante el periodo de arranque. Se consideraron dos puntos de muestreo, en el afluente de la planta y el efluente del reactor.

 	No. de registro UNAM: 9125c19 (SECTEI/259/2019):	
	Arranque del sistema biológico	
 GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO SECRETARÍA DE EDUCACIÓN, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN	Fecha:	05/11/2023
	Página:	10 de 14
	Rev:	0
“TRATAMIENTO Y REÚSO IN SITU DE AGUAS RESIDUALES EN ESPACIOS PÚBLICOS CULTURALES, EDUCATIVOS, DEPORTIVOS Y DE SERVICIOS DE LA CDMX MEDIANTE PROCESOS BIOLÓGICOS Y FÍSICOQUÍMICOS, EN MÓDULOS TUBULARES COMPACTOS Y DE BAJO COSTO”		

4.4 Identificación de las muestras

Se deben tomar las precauciones necesarias para que en cualquier momento sea posible identificar las muestras. Se deben emplear etiquetas pegadas o colgadas, o numerar los frascos anotándose la información en una hoja de registro para parámetros que necesiten ser trasladados a laboratorio.

De acuerdo con las recomendaciones de la NMX-AA-003-1980 Aguas residuales. -muestreo; estas etiquetas deben contener como mínimo la siguiente información:

- Identificación de la descarga
- Número de muestra
- Fecha y hora de muestreo
- Punto de muestreo
- Nombre y firma de la persona que efectúa el muestreo

Técnicas analíticas

Para el seguimiento del proceso y el funcionamiento del RBT, es necesaria la realización de un monitoreo continuo, desde el arranque y durante la operación. Más adelante, se presentan los tipos de monitoreo a realizar en el sistema biológico.

- Monitoreo de la eficiencia del reactor (DQO, SST, SSV, N-NH₄).
- Monitoreo de la estabilidad del proceso (Turbidez y Color) el cambio de estos se consideran una inestabilidad en el reactor.

Se debe verificar que el gasto diario a la planta se encuentre dentro de los parámetros de diseño. También es importante monitorear el correcto funcionamiento hidráulico de la planta, especialmente en el afluente y efluente del reactor, así como también el sistema de aireación en el interior del reactor. En caso del mal funcionamiento se debe informar al gerente de la planta y/o al personal del mantenimiento.

Una inspección visual permite obtener información básica, un efluente transparente y claro sin partículas de lodo indica un correcto funcionamiento del reactor. Un efluente turbio indica una baja remoción de coloides y materia disuelta, lo que puede ser provocado por una baja calidad de la biomasa. Una gran cantidad de sólidos en el efluente pueden ser resultado de altos flujos o de grandes cantidades de lodo en el reactor. Las inspecciones visuales siempre deben ser complementadas con análisis de laboratorio del afluente y efluente. Todos los datos deben ser interpretados, comparados con datos promedio y anotados para identificar cambios en el tiempo (CONAGUA, 2019).

		No. de registro UNAM: 9125c19 (SECTEI/259/2019):	
		Arranque del sistema biológico	
 GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO SECRETARÍA DE EDUCACIÓN, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN		Fecha:	05/11/2023
		Página:	11 de 14
		Rev:	0
“TRATAMIENTO Y REÚSO IN SITU DE AGUAS RESIDUALES EN ESPACIOS PÚBLICOS CULTURALES, EDUCATIVOS, DEPORTIVOS Y DE SERVICIOS DE LA CDMX MEDIANTE PROCESOS BIOLÓGICOS Y FÍSICOQUÍMICOS, EN MÓDULOS TUBULARES COMPACTOS Y DE BAJO COSTO”			

Parámetros de control de procesos

Para realizar una operación adecuada de un sistema de tratamiento aerobio, es necesario efectuar un monitoreo apropiado del proceso. En la Tabla 4 se muestran los métodos analíticos que recomienda, en su mayoría, la Norma Mexicana para la cuantificación de los parámetros de control definidos anteriormente.

Tabla 4. Parámetros analíticos.

Parámetro	Método de medición	Lugar de muestreo	Referencia
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	NMX-AA-030 1/2-SCFI-2011	Afluente/Efluente	https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166774/NMX-AA-030-1-SCFI-2012.pdf https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166775/NMX-AA-030-2-SCFI-2011.pdf
Turbiedad	NMX-AA-038-SCFI-2001	Afluente/Efluente	https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166777/NMX-AA-038-SCFI-2001.pdf
Nitrógeno Amoniacal	APHA-AWWA-WPCF	Afluente/Efluente	Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales
Sólidos Suspendidos Totales	NMX-AA-034-SCFI-2015	Afluente/Efluente	https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166146/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf
Sólidos Suspendidos Volátiles	NMX-AA-034-SCFI-2015	Afluente/Efluente	https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166146/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf
Color	NMX-AA-045-SCFI-2001	Afluente/Efluente	https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166767/NMX-AA-008-SCFI-2016.pdf

Anexo

Documentos técnicos para el monitoreo previo al arranque

Tabla 1. Calidad del agua residual.

Identificación:		Fecha de muestreo:	
Observador:		Hora de muestreo:	
Firma:		Lugar de muestreo:	

		No. de registro UNAM: 9125c19 (SECTEI/259/2019):	
		Arranque del sistema biológico	
“TRATAMIENTO Y REÚSO IN SITU DE AGUAS RESIDUALES EN ESPACIOS PÚBLICOS CULTURALES, EDUCATIVOS, DEPORTIVOS Y DE SERVICIOS DE LA CDMX MEDIANTE PROCESOS BIOLÓGICOS Y FÍSICOQUÍMICOS, EN MÓDULOS TUBULARES COMPACTOS Y DE BAJO COSTO”		Fecha:	05/11/2023
		Página:	12 de 14
		Rev:	0
 GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO SECRETARÍA DE EDUCACIÓN, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN			

Parámetro	Real
	Entrada
ST=Sólidos Totales (mg/L)	
SDT= Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	
SDF= Sólidos Disueltos Fijos (mg/L)	
SST= Sólidos suspendidos totales (mg/L)	
SDV= Sólidos disueltos volátiles (mg/L)	
DQO=Demanda química de oxígeno (mg/L)	
NH ₃ =Nitrógeno amoniacal (mg/L)	
NT=Nitrógeno total (mg/L)	
PT= Fósforo total (mg/L)	
Turbidez= NTU	
Alcalinidad = (mgCaCO ₃ /L)	
Acidez= (mgCaCO ₃ /L)	
pH=Potencial Hidrógeno	

Verificación de los equipos de procesos

Tabla 2. Lista y verificación de equipos por unidad de proceso.

Identificación:		Fecha de muestreo:	
Observador:		Hora de muestreo:	
Firma:		Lugar de muestreo:	

Corriente de alimentación					
Equipo	Clave	Características	Arranca		Si es "No" identificar posible causa
			Si	No	
Bomba	B-001A				
Bomba	B-001B				
Bomba	B-001C				
Hidrociclón	H-001				

Corriente de aire					
Equipo	Clave	Características	Arranca		Si es "No" identificar posible causa
			Si	No	
Soplador	S-001				

REFERENCIAS

Chernicharo, C. (2007). Anaerobic Reactors. Biological wastewater treatment series (Vol. 4). Inglaterra: IWA Publishing.

CONAGUA. (2019). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Filtros rociadores. Libro 52, CDMX, México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONAGUA., (2019). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Lodos Activados. Libro 51, CDMX, México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONAGUA., (2019). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Procesos anaerobios. Libro 49, CDMX, México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

García, S. (2018). Estudio de un reactor biológico de biopelícula fija a escala laboratorio con el uso de materiales no tejidos para la fijación de la biomasa (tesis doctoral). Universidad Nacional Autónoma de México; México CDMX

García, S., & Durán, A. (2017). Biological tubular reactor, new technology for small wastewater treatment plants. 3–4.