



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

DISEÑO DEL PROCESO DE UNA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN LA ZONA
LACUSTRE DE XOCHIMILCO UTILIZANDO LA
TECNOLOGÍA "REACTOR BIOLÓGICO TUBULAR"

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA:
GRECIA CAROLINA RAMON MONTEJO



ASESOR DEL TEMA:
DR. GARCÍA GONZÁLEZ SERGIO ADRIÁN

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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: GUTIÉRREZ LARA MARÍA RAFAELA
VOCAL: ÁLVAREZ MACIEL CARLOS
SECRETARIO: GARCÍA GONZÁLEZ SERGIO ADRIÁN
1ER SUPLENTE: MORALES CABRERA JUAN MARIO
2º SUPLENTE: DURÁN MORENO ALFONSO

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

LABORATORIO 301 DE INGENIERÍA AMBIENTAL
FACULTAD DE QUÍMICA, CONJUNTO E
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ASESOR DEL TEMA: DR. SERGIO ADRIÁN GARCÍA GONZÁLEZ _____

SUPERVISOR TÉCNICO: DR. ALFONSO DURÁN MORENO _____

SUSTENTANTE: GRECIA CAROLINA RAMON MONTEJO _____

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y a la Facultad de Química por brindarme la invaluable oportunidad de cursar mi licenciatura en un entorno académico de excelencia. La UNAM ha sido el cimiento sobre el cual he construido mi educación, proporcionándome conocimientos, experiencias y recursos que han enriquecido mi formación profesional de manera significativa.

Al Dr. Sergio Adrián García González y al Dr. Alfonso Durán Moreno por su valiosa amistad, apoyo constante, orientación y dedicación a lo largo de mi proceso de investigación y redacción de esta tesis. Su profundo conocimiento, paciencia y disposición para compartir sus sabios consejos han sido fundamentales en mi crecimiento académico y personal.

A la M. Gutiérrez Lara María Rafaela y Álvarez Maciel Carlos, por haber sido parte de mis sinodales, gracias por el tiempo que dedicaron a revisar mi tesis, me ayudaron enormemente a mejorar la calidad de mi trabajo. Muchas gracias.

DEDICATORIA

En este capítulo de mi vida, deseo expresar mi reconocimiento profundo a Dios, quien ha sido mi guía inquebrantable, mi refugio seguro y mi fuente de inspiración. Mi tesis es un testimonio de su gracia y fidelidad, y rindo homenaje a Él por su amor eterno.

Dedico esta tesis a mi mamá Carolina, cuyo amor incondicional, apoyo constante y ejemplo de determinación han sido mi mayor fuente de inspiración. Tu aliento y consejos han sido mi fortaleza en los momentos difíciles y mi motivación en los momentos de éxito. Esta tesis es un testimonio de tu amor y sacrificio, y es mi humilde forma de expresar mi profunda gratitud por todo lo que has hecho por mí.

A Sofi, hermano Roberto y Silvia gracias por el gran apoyo que me han brindado, por tanto amor, por las risas y buenos momentos que pasamos, por hacer de la pandemia una temporada feliz y siempre aceptarme en su hogar como si fuera el mío.

A toda mi familia y amigos cercanos por su gran amor, apoyo incondicional, por ser mi fuente inagotable de inspiración, gracias por creer en mi por inspirarme a superar obstáculos y celebrar mis éxitos conmigo, nombrar a todos sería tan extenso como esta tesis pero gracias de todo corazón.

A mis amigos Maar, Alejandro, Diego y Edmee por ser un pilar fundamental en este camino, su amistad ha sido un regalo invaluable, ustedes han sido mi fuente de alegría, gracias por escucharme, leerme, aconsejarme, por sus actos de amor, por ser mi familia, soy la más afortunada de contar con amigos tan increíbles como ustedes.

A Emi que desde el primer momento que te conocí no he parado de tener nuevos aprendizajes y nuevas experiencias, gracias por todo tu apoyo y amor.

A mi perro poppy porque me acompañaste en todos estos años de mi vida, gracias por tanto amor vuelta alto en el cielo de los perritos.

RESUMEN

La presente tesis tiene como objetivo proponer el anteproyecto de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) para tratar las descargas de aguas residuales domésticas provenientes de locatarios que no cuentan con un sistema de alcantarillado sanitario y que desembocan en los canales de San Lorenzo Xochimilco, utilizando un proceso biológico denominado Reactor Biológico Tubular (RBT).

El objetivo principal es el desarrollo de una pequeña planta de tratamiento de aguas residuales, diseñando las tres fases que componen un tren de tratamiento; tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario. El proceso está fundamentado en el aprovechamiento de la tecnología RBT y es plasmado en el Diagrama de Flujo de Proceso (DFP) el cual incluye todos los equipos involucrados.

Se elaboró un balance de materia que considera como efluente un agua residual urbana, los sistemas analizados en el balance de masa son; pretratamiento, lodos producidos por el reactor biológico, así como su tratamiento, los sistemas de aireación y la desinfección del efluente. Los resultados del balance de materia indican que el proceso cumple con la NOM- 003- SEMARNAT-1997.

Con el balance de masa completo se construyó el Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI), esta metodología permitió generar un diseño que puede ser aplicado en varios puntos de los canales de Xochimilco principalmente donde ocurran descargas de aguas residuales.

Contenido

RESUMEN	5
CONTENIDO	6
CAPÍTULO 1. PROBLEMÁTICA	12
1.1 RECURSOS HÍDRICOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO	12
1.2 AGUAS RESIDUALES DE LA CIUDAD DE MÉXICO	12
1.3 XOCHIMILCO	13
1.4 CONTAMINACIÓN EN CANALES DE XOCHIMILCO	14
1.4.1 CONTAMINANTES QUÍMICOS	14
1.4.2 DESCARGAS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	15
JUSTIFICACIÓN	18
OBJETIVOS	19
CAPITULO 2. ANTECEDENTES	20
2.1 AGUAS RESIDUALES	20
2.1.1 ORIGEN DE AGUAS RESIDUALES	20
2.1.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES	21
2.1.3 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES	21
2.1.4 CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS	22
2.2 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	22
2.2.1 PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	22
2.2.2 CLASIFICACIÓN DE OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO	23
2.2.3 TRATAMIENTO PRIMARIO DE AGUAS RESIDUALES	24
2.2.4 TRATAMIENTO SECUNDARIO DE AGUAS RESIDUALES	24
2.2.5 TRATAMIENTO TERCIARIO DE AGUAS RESIDUALES	25
2.3 PEQUEÑA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	25
2.4 INGENIERÍA DE PROYECTOS	25
2.4.1 NORMAS Y REGLAMENTOS	26
2.5 INGENIERÍA CONCEPTUAL	27
2.6 INGENIERÍA BÁSICA	27
2.7 INGENIERÍA DE DETALLE	29
2.7.1 ETAPAS DE LA FASE DE INGENIERÍA DE DETALLE	30
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	32

3.1	TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN EL SITIO	33
3.1.1	TRATAMIENTO PRIMARIO	33
3.1.2	TRATAMIENTO SECUNDARIO	33
3.1.3	TRATAMIENTO TERCARIO	34
3.1.4	CALIDAD DE EFLUENTE	34
 CAPITULO 4. CASO DE ESTUDIO		 36
4.1	UBICACIÓN DEL PROYECTO	36
4.2	BASES DE DISEÑO	37
4.3	FILOSOFÍA DE OPERACIÓN	37
4.4	DESCRIPCIÓN BÁSICA DEL PROCESO	40
4.5	DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO (DFP)	45
4.5.1	ÍNDICE DE LÍNEAS	46
4.6	PRINCIPALES EQUIPOS QUE CONFORMAN EL PROCESO	48
 CAPITULO 5. BALANCE DE MATERIA		 50
5.1	MEMORIA DE CÁLCULO DEL BALANCE DE MATERIA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO	50
5.1.1	CORRIENTES DE AGUA:	51
5.1.2	CORRIENTES DE DESINFECCIÓN:	57
5.1.3	CORRIENTES DE LODOS:	61
5.1.4	CORRIENTES DE AIRE:	73
 CONCLUSIONES		 81
 BIBLIOGRAFÍA		 83
 ANEXO 1		 86

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. CAUDALES DE ENTRADA A LA ZONA CHINAMPERA DE XOCHIMILCO FUENTE: SACMEX.....	16
TABLA 2 RESULTADOS DEL MONITOREO DE NUTRIMENTOS EN UNA DESCARGA DE AGUA DE LA PTAR CE. UNIDADES MG/L FUENTE: SACMEX	17
TABLA 3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES	21
TABLA 4. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES.	21
TABLA 5. CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	22
TABLA 6 CLASIFICACIÓN DE OPERACIONES UNITARIAS	24
TABLA 7. COMPOSICIÓN TÍPICA DEL AGUA RESIDUAL.	32
TABLA 8. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE LA MUESTRA RESIDUAL DE XOCHIMILCO.....	37
TABLA 9 CLASIFICACIÓN DE SUSTANCIAS QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO.....	46
TABLA 10 CLASIFICACIÓN DE MATERIAL EN TUBERÍAS	46
TABLA 11 CLASIFICACIÓN DE LÍNEAS.....	47
TABLA 12 CLASIFICACIÓN DE EQUIPOS.....	48
TABLA 13. DATOS DEL INFLUENTE.	51
TABLA 14. DATOS DE EQUIPOS.	51
TABLA 15. BALANCE EN CORRIENTES 1 AL 4.	52
TABLA 16. CORRIENTES DE CRIBA E HIDROCICLÓN.....	54
TABLA 17. CORRIENTES DEL CÁRCAMO Y EL RBT.	57
TABLA 18. CORRIENTES DE DESINFECCIÓN 24-29.	60
TABLA 19. CORRIENTES DE DESINFECCIÓN 30-34.	60
TABLA 20. CLASIFICACIÓN DE MICROORGANISMOS PRESENTES EN REACTORES.	61
TABLA 21 VALORES CONSIDERADOS PARA EL CÁLCULO DE SSV.....	68
TABLA 22. CORRIENTE DE LODOS 14-20.....	72
TABLA 23. DATOS DEL SOPLADOR.....	79
TABLA 24. RESULTADOS SOPLADOR.	79
TABLA 25. CORRIENTES DEL COMPRESOR 15, 16, 17, 18.	80
TABLA 26. CORRIENTES DE AIRE 12, 13, 15, 16 Y 21.	80

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1. ÁREA DEL LAGO DE XOCHIMILCO Y SISTEMA DE CANALES	14
ILUSTRACIÓN 2. LOCALIZACIÓN PTAR. FUENTE: GOOGLE	
ILUSTRACIÓN 3. IMAGEN SATELITAL DE LA DEMARCACIÓN. FUENTE: GOOGLE	36
ILUSTRACIÓN 4. IMAGEN SATELITAL DEL PREDIO. FUENTE:MAPS.....	36
ILUSTRACIÓN 5. DIAGRAMA DE TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL.....	37
ILUSTRACIÓN 6. CONFIGURACIÓN INTERNA DE LA FIBRA POLIMÉRICA	42
ILUSTRACIÓN 7. DIFUSOR DE BURBUJA FINA USADO EN EL RBT	43
ILUSTRACIÓN 8. REACTOR BIOLÓGICO TUBULAR.	43
ILUSTRACIÓN 9. DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO DE LA PTAR.	49
ILUSTRACIÓN 10 CORRIENTES DE ENTRADA AL PROCESO	52
ILUSTRACIÓN 11. CORRIENTES DEL HIDROCICLÓN.	53
ILUSTRACIÓN 12. CORRIENTES DE LA CRIBA ESTÁTICA.	53
ILUSTRACIÓN 13. CORRIENTES EN EL CÁRCAMO DE BOMBEO.....	54
ILUSTRACIÓN 14. CORRIENTES DEL RBT.	55
ILUSTRACIÓN 15. CORRIENTES DE LA RECIRCULACIÓN.....	56
ILUSTRACIÓN 16. CORRIENTES DE DESINFECCIÓN DE LA 24 A LA 34.....	58
ILUSTRACIÓN 17. CORRIENTES DE INGRESO AL MEZCLADOR ESTÁTICO.	58
ILUSTRACIÓN 18. CORRIENTES DE LODOS 14 - 20.	68
ILUSTRACIÓN 19. CORRIENTES DEL SOPLADOR 12, 13, 21.	73
ILUSTRACIÓN 20. CORRIENTES DEL COMPRESOR 15, 16, 17, 18.....	80

LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

COT	Carbono Orgánico Total
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno (A los 5 días)
DBO _u	Demanda Bioquímica de Oxígeno última
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EDAR	Estaciones de Depuración de Aguas Residuales
f _i	Relación SSV/SST
FS _{bi}	Materia orgánica biodegradable
FS _{ti}	Materia orgánica total
FX _{loi}	Sólidos suspendidos inorgánicos
FX _{ivi}	Materia orgánica suspendida no biológica.
FX _T	Masa de lodos como SST producidos diariamente
MX _{BHv}	Masa de SSV de OHOs
MX _{EHv}	Residuo endógeno
MX _{iv}	Material orgánico no biodegradable
MX _T	Masa de lodos en el sistema
MX _v	Sólidos suspendidos volátiles
O _c	Tasa de utilización de Oxígeno carbonáceo en el reactor
OHO	Organismos Heterótopos Ordinarios
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
Q _i	Caudal tratado de agua residual
Q _s	Caudal de recirculación del lodo
Q _w	Caudal de purga del reactor
RBT	Reactor Biológico Tubular
SDB	Sólidos Disueltos Biodegradables
SDT	Sólidos Disueltos Totales
SSI	Sólidos Sedimentables Inorgánicos
SST	Sólidos Suspendidos Totales
SSV	Sólidos Suspendidos Volátiles

SSVD	Sólidos Suspendidos Volátiles Biodegradables
SVD	Sólidos Volátiles Disueltos
SVDB	Sólidos Volátiles Disueltos Biodegradables
S_{te}	Concentración total de DQO soluble en efluente
TNK	Nitrógeno Total tipo Kjeldahl
TRH_n	Tiempo de Retención Hidráulico nominal
TRS	Tiempo de Retención de Sólidos
V_p	Volumen del RBT
X_{BH}	Organismos heterótrofos ordinarios
X_{EH}	Residuo endógeno
X_v	Concentración SSV reactor biológico
X_1	Fracción de material orgánico particulado no biodegradable

CAPÍTULO 1. PROBLEMÁTICA

El surgimiento de este proyecto se debe a la necesidad de abordar un problema social existente. Es esencial comprender los antecedentes y las causas de dicho problema para poder proponer una solución adecuada. A continuación, se presenta una descripción breve de la problemática en cuestión.

1.1 RECURSOS HÍDRICOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO

El Sistema de Aguas de la Ciudad de México atiende la demanda de agua potable para 8.9 millones de habitantes, la demanda principal es la de consumo doméstico que representa el 87% de los usuarios, le siguen los usos mixtos con 6% y usos no domésticos con 7%. La demanda de agua potable se atiende empleando fuentes internas y externas; el suministro promedio anual en la última década es de 31.4 metros cúbicos por segundo (m^3/s), con un mínimo de 29.3 m^3/s y un máximo de 33.6 m^3/s . (SACMEX , 2018)

1.2 AGUAS RESIDUALES DE LA CIUDAD DE MÉXICO

En grandes ciudades como lo es la CDMX los servicios urbanos relacionados con el abastecimiento del agua, drenaje y el saneamiento de las aguas residuales presentan niveles de cobertura muy irregulares, casos siempre asociados a un inadecuado manejo.

El reporte de plantas de tratamiento de aguas residuales actualmente reporta 271, las alcaldías que presentan un mayor número de plantas de tratamiento son Azcapotzalco con 39 y Miguel Hidalgo con 34 plantas.

La distribución espacial de las PTAR (Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales) reportadas por las fuentes fijas se concentra en el norte, poniente y centro de la Ciudad de México; zonas que se caracterizan por tener una gran actividad económica. En caso contrario, se observa que, en el sureste de la ciudad, en donde se encuentra ubicada Milpa Alta, no hay reporte de la operación de plantas de tratamiento.

1.3 XOCHIMILCO

Xochimilco es una de las 16 demarcaciones de la Ciudad de México, localizada al sureste de la capital y tiene una superficie de 122 km², en el territorio de Xochimilco se encuentran 14 pueblos originarios, las montañas del sur y la zona lacustre pertenecen a la mayor reserva natural de la CDMX.

Actualmente los canales de Xochimilco se han convertido en una zona muy importante para el turismo tanto mexicano como extranjero, ya que entre semana y fines de semana asisten miles de turistas a comer al aire libre y disfrutar de un paseo en trajineras.

La zona lacustre de Xochimilco y sus alrededores es una zona de captación fundamental para la recarga de los acuíferos de la cuenca de México, desde hace muchos años se sabe que la Ciudad de México extrae agua de dicha zona para abastecerse, provocando que el nivel de los lagos y la red de canales disminuya drásticamente.

El equilibrio ecológico fue quebrantado de gran manera en el presente siglo, en 1909 se comenzó a construir un acueducto que desvió los cauces originales de los ríos y manantiales, al no ser irrigados por los manantiales los canales y apantles que son canales más pequeños comenzaron a perder su nivel, los manantiales se agotaron en la época de los cincuenta, por lo que una alternativa para el riego fue utilizar agua tratada de mala calidad.

En la ilustración 1 se muestra la disminución del área en km² del lago y sistemas de canales a lo largo de los años a consecuencia de actividad humana.

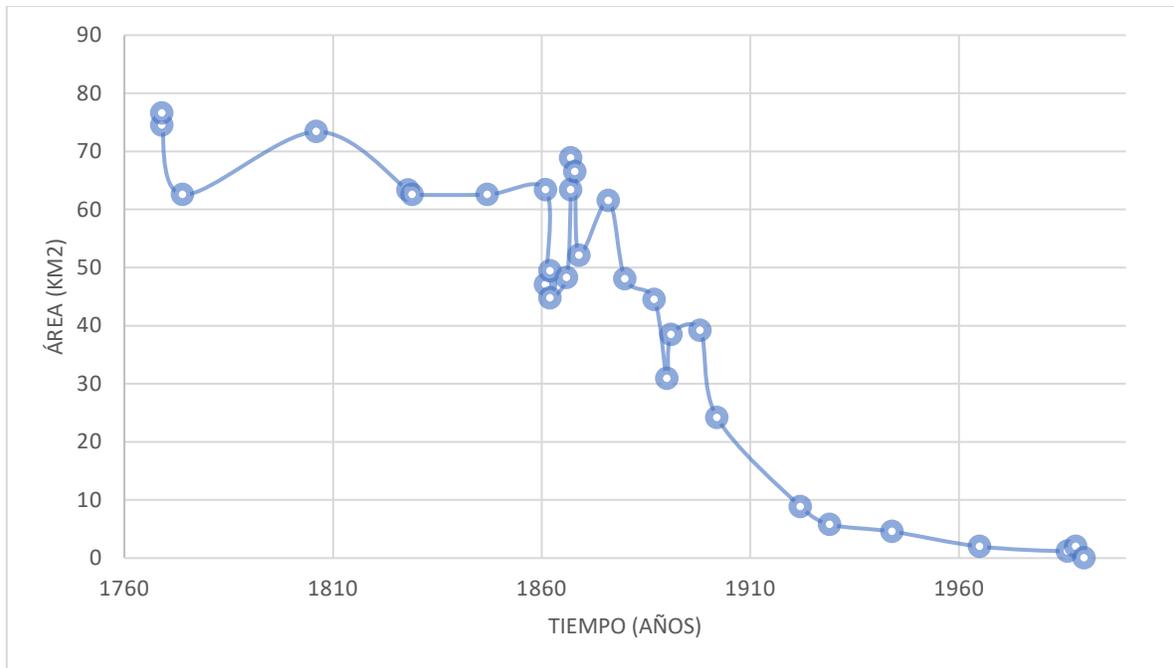


Ilustración 1. Área del Lago de Xochimilco y sistema de canales

1.4 CONTAMINACIÓN EN CANALES DE XOCHIMILCO

La zona de Xochimilco cuenta con una gran variedad de contaminantes presentes en sus canales, lagunas y suelos agrícolas o pecuarios, es esencial conocer los contaminantes que se encuentran en mayores proporciones y las principales fuentes de contaminación para llevar a cabo un diseño adecuado del tren de tratamiento. A continuación, se proporciona una lista de los contaminantes químicos presentes en los canales, lagunas y suelos agrícolas o pecuarios de la zona de Xochimilco.

1.4.1 CONTAMINANTES QUÍMICOS

Los contaminantes inorgánicos encontrados en Xochimilco son:

- Diversas sales, especialmente sodio.
- Óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y ozono.
- Los metaloides arsénicos, boro y antimonio.
- Varios metales pesados: hierro, cadmio, cobre, plomo, zinc y otros.

Los contaminantes orgánicos encontrados en Xochimilco son:

- Materia orgánica derivada principalmente de desechos agrícolas.

- Detergentes
- Grasas y aceites
- Pesticidas, principalmente insecticidas.
- Hidrocarburos poliaromáticos.
- Desorganizadores endocrinos.
- Otros compuestos orgánicos diversos como el fenol y ácido butírico.

La caracterización de los contaminantes nos indica que las principales fuentes de contaminación son la industria, vivienda, agricultura y tráfico vehicular, el principal aporte de contaminantes químicos a los canales es el conjunto de descargas de agua semitratada proveniente en su mayor parte de las plantas de tratamiento de aguas de desecho de las PTAR de Cerro de la Estrella y San Luis Tlaxiátemalco. (Castro, 2017)

1.4.2 DESCARGAS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Actualmente los canales de Xochimilco reciben vertidos de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales ubicadas en Cerro de la Estrella y San Luis Tlaxiátemalco, son el principal aporte de los contaminantes químicos, sumando las de viviendas aledañas a los canales que no están conectadas a la red de alcantarillado.

Las aguas suministradas de estas plantas reciben un tratamiento terciario esto quiere decir que supuestamente no ofrece riesgos de contaminación a los cultivos agrícolas ni a la biota, sin embargo, se presume que las concentraciones de cadmio y plomo en la PTAR de Cerro de la Estrella rebasa el límite permisible.

Durante muchos años se ha introducido a los canales agua semidepurada de origen industrial y doméstico, hecho verificado por diversos estudios. (Bojórquez Castro, 2017)

El agua residual tratada es la principal fuente de abastecimiento de agua del sistema en época de estiaje, de acuerdo con el informe "Infraestructura de agua tratada en Xochimilco y Tláhuac" existen 7 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales con relación directa con Xochimilco.

Las cuales desembocan en diferentes puntos de los canales, destacando 13 sitios, de los cuales 9 son abastecidos por la PTAR Cerro de la Estrella (PTAR CE), 3 por la PTAR San Luis Tlaxialtemalco (PTAR SLT) y una por la PTAR San Lorenzo (PTAR SL) de la cual el caudal es de 875 L/s. (UNAM, 2017)

En la Tabla 1 se enlistan las PTAR's que desembocan en zonas lacustres de Xochimilco.

Tabla 1. Caudales de entrada a la zona chinampera de Xochimilco Fuente: SACMEX

N	SITIO DE SUMINISTRO	DIÁMETRO	GASTO (L/s)	FUENTE
1	Parque Ecológico	12"	150	PTAR CE
2	La Draga	15"	50	PTAR CE
3	Fernando Celada	6"	60	PTAR CE
4	Los Galeana	-	0	PTAR CE
5	Canal 27	32"	300	PTAR CE
6	Canal Caltongo	-	0	PTAR CE
7	Canal Caltongo (Exclusa)	12"	20	PTAR CE
8	Canal Caltongo (Mercado)	4"	20	PTAR CE
9	Floricultor	24"	30	PTAR CE
10	México 70	4"	5	PTAR SLT
11	Atenco	12"	30	PTAR SLT
12	La Fabrica	4"	10	PTAR SLT
13	Moctezuma	12"	40	PTAR SL

En la Tabla 2 se muestran los compuestos nitrogenados que poseen las descargas de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Cerro de la Estrella.

*Tabla 2 Resultados del monitoreo de nutrimentos en una descarga de agua de la PTAR CE. Unidades mg/L
Fuente: SACMEX*

MESES (2005)	AMONIO (NH ₄ ⁺)	NITRITOS (NO ₂)	NITRATOS (NO ₃)	FOSFATOS (PO ₄ ³⁻)
Octubre	0.12	0.01	-	10.60
Noviembre	1.94	1.36	13.00	15.0
Diciembre	2.34	3.67	-	5.30
Promedio	1.47	1.68	13.00	10.30

JUSTIFICACIÓN

El lago de Xochimilco es un remanente de un sistema lacustre de cinco lagos que abarcaban una distancia de 920 kilómetros cuadrados de la cuenca de México. (Luis Zambrano, 2009)

Sufre sus primeros impactos ecológicos más graves a principios del siglo XX, cuando se utilizan las aguas de los manantiales aledaños para proveer a la Ciudad de México. (Salles, 1992) Aunado a eso comienza a incrementar la tasa de deforestación en la peri-urbanidad de la ciudad.

Cuarenta años después el impacto es evidente cuando el Lago de Xochimilco casi se seca por completo, la rápida urbanización y la sobreexplotación de las aguas subterráneas causan hundimiento del suelo en gran parte del área lacustre, por lo que el gobierno de la CDMX intentó compensar la falta de agua inyectando aguas residuales parcialmente tratadas. (Amezquita Quiñonez, 2005)

En 2015 la Secretaría de Ciencia y Tecnología (SECITI) realizó el “Censo de descargas de aguas negras y grises en los canales de Xochimilco” en el cual hallaron que a lo largo de 116 km de canales se encontraron 1374 descargas irregulares, de las cuales 603 son de aguas negras y 771 de aguas grises pertenecientes a 917 predios que desembocan directamente a los canales. (UNAM, 2017)

En un intento por fomentar tanto la precipitación como la mayor captación de agua de lluvia, llevaron a cabo una campaña de reforestación, lamentablemente sin investigaciones previas ni consultas a expertos biólogos se utilizaron especies vegetales introducidas es decir que no pertenecían al entorno, estas terminaron por consumir mucha más agua y desplazar vegetación nativa.

Los altos valores de diversos contaminantes que están presentes en los canales de Xochimilco son una permanente fuente de enfermedades para los habitantes de esa zona, y han contribuido a la disminución de fauna y flora nativa, se han buscado diferentes alternativas para limpiar el agua de los canales, lo cual ha llevado a implementar la tecnología Reactor Biológico Tubular.

OBJETIVOS

GENERAL.

Proyectar la construcción e instalación de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) que estará ubicada en San Lorenzo Xochimilco. Utilizando la tecnología “reactor biológico tubular” y tecnología de desinfección aportada por el CIDETEQ para tratar la descarga de agua residual de la comunidad.

PARTICULARES.

- Buscar y recopilar información mediante la consulta en informes técnicos, bibliografía especializada y fuentes hemerográficas referente a la contaminación de los canales de Xochimilco para identificar la problemática en término de descargas de aguas residuales para obtener una línea base.
- Plantear el tren de tratamiento basado en la tecnología del Reactor Biológico Tubular mediante el diseño conceptual en un diagrama de bloques del proceso para tratar las descargas de aguas residuales a los canales, para cumplir la NOM-003-SEMARNAT-1997.
- Elaborar el DFP, DTI y LayOut correspondientes a una PTAR basado en la tecnología Reactor Biológico Tubular utilizando AutoCad, para establecer los equipos principales del sistema de tratamiento que permitan cumplir la NOM-003-SEMARNAT-1997.
- Calcular los equipos de proceso que conforman el tren de tratamiento mediante bibliografía especializada para determinar el balance de materia del proceso.

CAPITULO 2. ANTECEDENTES

2.1 AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales pueden definirse como las aguas de composición variada provenientes de las descargas de uso público urbano, doméstico, industrial, comercial de servicios, agrícola, pecuario, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier uso, así como la mezcla de ellas. (NOM-003-SEMARNAT-1997)

2.1.1 ORIGEN DE AGUAS RESIDUALES

Según su origen las aguas residuales resultan de la combinación de líquidos y residuos sólidos transportados por el agua que proviene de residencias, oficinas, edificios comerciales e instituciones, junto con los residuos de las industrias, así como de las aguas subterráneas, superficiales o de precipitación que también pueden agregarse eventualmente al agua residual. Así, de acuerdo con su composición, las aguas residuales pueden ser clasificadas como:

- **Agua residual doméstica:** Líquidos provenientes de las viviendas o residencias, edificios, comercios e instituciones.
- **Aguas negras:** Provenientes de inodoros, aquellos que transportan excrementos humanos y orina.
- **Aguas grises:** Son aquellas provenientes de tinajas, regaderas, lavabos, lavadoras.
- **Aguas pluviales:** Son grandes cantidades de agua de lluvia que cae sobre el suelo.
- **Aguas negras industriales:** mezcla de las aguas negras de una industria en combinación con las aguas residuales de sus descargas.

2.1.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES

La Tabla 3 muestra las principales características físicas de las aguas residuales.

Tabla 3 Características físicas de las aguas residuales

PROPIEDAD	CARACTERÍSTICAS
Temperatura	Afecta directamente las reacciones químicas y las velocidades de reacción
Color	Indica si han sufrido descomposición, o si se trata de aguas sépticas bajo descomposición bacteriana en condiciones anaerobias
Olor	Bajo degradación anaerobia se liberan compuestos malolientes
Sólidos	Sólidos suspendidos totales (SST)

2.1.3 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES

La Tabla 4 muestra las principales características químicas de aguas residuales.

Tabla 4. Características químicas de las aguas residuales.

PROPIEDAD	CARACTERÍSTICAS
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	Estima el oxígeno gastado en la descomposición de una muestra residual.
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Estima el contenido orgánico total de una muestra de agua residual.
Carbón Orgánico Total (COT)	Detecta el Carbón Orgánico Total, que indica la cantidad de compuestos orgánicos presentes.
Amoniaco	iones amonio o como amoniaco libre, es el contaminante nitrogenado con mayor frecuencia, el amoniaco reduce la efectividad en la cloración

2.1.4 CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS

La Tabla 5 muestra las principales características biológicas de las aguas residuales.

Tabla 5. Características biológicas de las aguas residuales.

PROPIEDAD	CARACTERÍSTICAS
Organismos patógenos	Son bacterias y parásitos que provienen principalmente de los desechos humanos,

2.2 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El tratamiento de aguas residuales consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin eliminar los contaminantes presentes en el agua. El objetivo principal del tratamiento de aguas residuales es producir un efluente reutilizable en el ambiente y un residuo sólido al que comúnmente se le nombran “lodos” que son convenientes para su disposición con posterior tratamiento y reutilización.

2.2.1 PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Existen diversos procesos unitarios de tratamiento de aguas residuales, los cuales se clasifican en 5 etapas que se tienen que llevar a cabo para lograr que el efluente cumpla con las características requeridas, cada etapa cuenta con diferentes equipos que se pueden usar conjuntamente para el objetivo deseado.

Hay principios específicos para evaluar, elegir los equipos y seleccionar los procesos unitarios que forman parte del tren de tratamiento. Los aspectos más importantes que influyen en la elección de los equipos y procesos son:

- Caudal y calidad del agua residual cruda.
- Requerimientos de la calidad del agua residual tratada
- Requerimientos de energía
- Disponibilidad del terreno
- Operación y mantenimiento

- Impacto ambiental
- Producción de lodos residuales

La opción óptima de tratamiento se determina a través del estudio detallado de cada situación específica. Para llevar a cabo este análisis, es necesario contar, al menos, con los cálculos básicos de cada opción de tratamiento, que permitan conocer los requerimientos de espacio, la demanda de energía, así como los costos de operación y mantenimiento por metro cúbico de agua tratada.

Esta evaluación es necesaria llevar a cabo bajo las mismas condiciones de caudal y calidad, de entrada y salida.

La determinación de los requerimientos de calidad para el agua residual tratada es función de la NOM-003-SEMARNAT-1997.

2.2.2 CLASIFICACIÓN DE OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO

La complejidad de un tren de tratamiento dependerá de los objetivos propuestos y del análisis previo, los procesos y operaciones se combinan y complementan para dar lugar a diversos niveles de tratamiento.

Los términos “pretratamiento” y/o “primario” se refieren a las operaciones físicas unitarias, el término “secundario” se refiere a los procesos químicos o biológicos unitarios y se conoce como “tratamiento secundario” y/o “avanzado” a la desinfección. (Metcalf & Eddy, 1995)

La Tabla 6 muestra una clasificación más detallada de los procesos, su clasificación y la remoción de cada uno.

Tabla 6 Clasificación de operaciones unitarias

CLASIFICACIÓN	REMUEVE	PROCESO
Tratamiento primario	Arenas Partículas gruesas Sólidos suspendidos	Rejillas Desarenadores Sedimentación
Tratamiento secundario	Materia orgánica disuelta	Tratamiento biológico
Tratamiento terciario	Nitrógeno Fósforo Materia coloidal	Desnitrificación-nitrificación Remoción de fósforo Coagulación-floculación
Tratamiento avanzado	Patógenos Microcontaminantes	Desinfección Oxidación forzada

2.2.3 TRATAMIENTO PRIMARIO DE AGUAS RESIDUALES

El propósito del pretratamiento es remover, reducir o modificar los constituyentes del agua residual cuya presencia pueda provocar problemas de mantenimiento y funcionamiento de los equipos electromecánicos, se recomienda que se encuentre al comienzo del tren de tratamiento, algunos ejemplos de pretratamiento son desbaste (cribado) para la eliminación de sólidos gruesos, flotación que elimina las grasas y aceites presentes en el agua y el desarenador para la eliminación de arenas que puedan causar la obstrucción de equipos y un desgaste excesivo de los mismos.

2.2.4 TRATAMIENTO SECUNDARIO DE AGUAS RESIDUALES

El tratamiento secundario de agua residual elimina la materia orgánica medida como DBO, consiste en la acción de microorganismos a los que se le añade oxígeno; el tratamiento secundario es un tratamiento de depuración que constituye una serie de importantes procesos de naturaleza biológica de tratamiento de las aguas residuales que tienen en común la utilización de microorganismos para la eliminación de materia orgánica biodegradable, tanto coloidal como disuelta, así como la eliminación de compuestos que contienen elementos nutrientes (N y O), hasta que el efluente contenga niveles aceptables de DBO, materia coloidal y nutrientes.

2.2.5 TRATAMIENTO TERCIARIO DE AGUAS RESIDUALES

También llamado Tratamiento Avanzado de Efluentes Residuales, el tratamiento secundario es un conjunto de procesos adicionales para eliminar remanentes, en estado coloidal o suspendido. Forman diferentes combinaciones entre distintas tecnologías y reduce la carga contaminante del agua residual permitiendo su vertido en cauces naturales y su reutilización como recurso hídrico.

2.3 PEQUEÑA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Una solución a la problemática detectada en los canales de Xochimilco; es tratar las descargas de aguas residuales antes de que desemboquen en los canales para esto se propone utilizar sistemas de tratamiento de aguas residuales a pequeña escala denominados Small Waste Water System SWWS por sus siglas en inglés. Según la EPA (United States Environmental Protection Agency) se considera que un sistema de aguas residuales es pequeño si atiende a una comunidad con una población de 10,000 o menos y un flujo diario promedio de aguas residuales de menos de 3786 m³. (EPA, 2021). Para lograr y mantener sistemas sostenibles de tratamiento de aguas residuales en comunidades pequeñas se enfrentan diversos desafíos que incluyen limitaciones económicas/financieras, incapacidad para atraer y mantener operadores de sistemas, topografía y condiciones climáticas extremas y lejanía.

La planeación del diseño, construcción y arranque de la SWWS se lleva a cabo apoyándonos en la ingeniería de proyectos; que nos da las herramientas suficientes para concluir con éxito.

2.4 INGENIERÍA DE PROYECTOS

Un proyecto es definido como " un conjunto autónomo de inversiones, actividades, políticas y medidas institucionales o de otra índole, diseñado para lograr un objetivo

específico de desarrollo en un período determinado, en una región geográfica delimitada y para un grupo predefinido de beneficiarios, que continúa produciendo bienes y/o prestando servicios tras la retirada del apoyo externo y cuyos efectos perduran una vez finalizada su ejecución" (Agencia Andaluza de Voluntariado, 2002).

Un proyecto posee objetivos específicos, que se mencionan a continuación:

- A. Conseguir un resultado final.
- B. Cumplir un plazo establecido.
- C. Satisfacer las necesidades de usuario o cliente.

El alcance del proyecto son las actividades que se tienen que realizar de manera ordenada para que la ingeniería del proyecto se lleve a cabo de manera satisfactoria.

- o Identificar y recopilar requisitos (bases de usuario).
- o Identificar a los interesados.
- o Seleccionar técnicas y herramientas.
- o Realizar el desglose de actividades y entregables.

2.4.1 NORMAS Y REGLAMENTOS

Todo trabajo de ingeniería de proyectos ha de realizarse basado en conocimiento y manejo de normas, reglamentos y leyes.

Las normas son documentos que contienen especificaciones técnicas establecidas y son de régimen internacional, estas permiten acelerar los trabajos y establecer procedimientos repetitivos, proporcionando rapidez, confiabilidad y exactitud en los cálculos y diseños.

Un ejemplo de normas es:

- ASTM. Por sus siglas en inglés, Asociación Americana para Pruebas y Materiales.
- ASME. Por sus siglas en inglés, Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos.

- NEMA. Por sus siglas en inglés, Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos.
- ANSI. Por sus siglas en inglés, Instituto Nacional Americano de Estandarización.
- ISO. Por sus siglas en inglés, Organización Internacional de Estandarización

2.5 INGENIERÍA CONCEPTUAL

La ingeniería conceptual es la primera etapa de un proyecto de ingeniería e inicia como resultado de la necesidad de generar un producto determinado, se estudian y se analizan los conceptos técnicos iniciales para determinar si el proyecto es factible e identificar cuáles son los requerimientos del proceso.

Esta etapa de la ingeniería se fijan objetivos, se estudian las tecnologías que se aplicarán, se define el marco de normas, los requerimientos de espacio y se establecen las especificaciones técnicas conceptuales. Los principales puntos que analizar en esta primera fase son:

- Los productos y la capacidad de producción.
- La normativa y regulación requerida.
- La descripción del proceso de fabricación y los requerimientos del usuario.
- La descripción general de la instalación.
- Los diagramas de bloques, la distribución de salas, los planos de flujos de materiales y personas, los planos de áreas clasificadas y los diagramas de procesos básicos.
- La estimación de requerimientos de servicios auxiliares.
- El listado de equipos preliminar.

(Instituto Mexicano del Petróleo , 2019)

2.6 INGENIERÍA BÁSICA

La ingeniería básica puede definirse como “el conjunto de documentos que definen inequívocamente el proyecto y su costo más favorable en un entorno dado” (Morote, Proyectos de Ingeniería, 2013).

Tiene por objetivo definir las líneas básicas del proyecto, para lograr proveer al cliente la información necesaria para poder tomar la decisión de seguir con el proyecto o suspenderlo, además sirve para que el equipo de ingeniería pueda tomar decisiones acerca de todos los datos precisos para realizar el cálculo detallado de todos los componentes.

Los objetivos de la ingeniería básica son los siguientes:

- Seleccionar la solución más conveniente
- Desarrollarla y definirla.
- Mejorar los diseños previos.
- Conocer la rentabilidad del proyecto.

Entregables de la Ingeniería básica:

- Bases de diseño: Es el documento que fija el alcance y las particularidades del proyecto el cual indica:
 - Rendimientos y consumos específicos
 - Límites de suministro y responsabilidades
 - Consumo y características de servicios auxiliares
 - Normas y reglamentos aplicables
- Criterios de diseño: Son un conjunto de pautas y directrices que se utilizan para guiar el proceso de diseño de un proyecto.
- Diagrama de flujo de proceso (DFP) : El gráfico que ilustra la conexión entre los elementos principales del sistema, así como también presenta en una tabla los valores específicos de diseño de los procesos
 - Su finalidad es explicar cómo funciona el proceso a través de rutas de flujo primario entre unidades.
 - Debe incluir: Tuberías de proceso, símbolos de equipos mayores, nombres y designaciones, interconexión con otros sistemas, bypass mayores y líneas de recirculación, valores operacionales del sistema, composición de los fluidos, etc.

- Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI): Este diagrama muestra las tuberías y la instrumentación que conforma el sistema.
 - Su finalidad es la de explicar cómo funciona el proceso en relación con la instrumentación aplicada, mostrando una representación gráfica del equipo, tubería e instrumentación.
 - Debe incluir: Instrumentación y designaciones (TAG), equipos mecánicos con nombres y números, todas las válvulas y sus identificaciones, tuberías de proceso, dimensiones e identificación; venteos, drenajes, purgas y otros misceláneos, direcciones de flujo, controles de ingreso y salidas, lazos, interfaces con vendedores y contratistas, secuencia física de los equipos.
- Balances de materiales y energía: Analizan los flujos cualitativos y cuantitativos que intervienen en el proceso, indicando su estado físico (presión, temperatura, etc.). Suelen darse tabulados que resumen cálculos y reacciones.
- Distribución en planta: Plano detallado de la solución. Justificación del lay-out exponiendo el método empleado y su aplicación. Descripción de la maquinaria y de las instalaciones. Características básicas de las construcciones.

2.7 INGENIERÍA DE DETALLE

La Ingeniería de Detalle es la fase en la que quedan definidos todos y cada uno de los subsistemas, componentes o partes que integran el proyecto, de tal manera que los documentos que se desarrollan han de ser suficientes para llevarlo a la práctica (Morote, OCW UPCT, 2013).

Esta fase se diferencia de las demás fases creativas, en las otras fases los objetivos son los de analizar los problemas y definir las soluciones más adecuadas y efectivas, estas soluciones deben concretarse en respuestas únicas que han de describirse en su totalidad, la precisión debe de ser alta, no se permiten errores importantes.

Los objetivos de esta fase son los siguientes:

- Suministrar los datos técnicos, detalles constructivos y condiciones en que debe fabricarse o construirse el objeto del proyecto.
- Servir de documento de gestión en aquellos casos en los que el anteproyecto o diseño básico es insuficiente o no existe.

2.7.1 ETAPAS DE LA FASE DE INGENIERÍA DE DETALLE

Es una fase fundamental de cálculos técnicos y de diseño, el proyectista percibe la calidad de anteproyecto, las diferentes etapas que constituyen la Ingeniería de Detalle son:

- ETAPA 1. Comprobación de especificaciones.

En esta etapa se realiza la revisión exhaustiva de la Ingeniería Básica que se llevó a cabo previamente, esta etapa incluye:

- La definición de los subsistemas (forma, materiales y características fundamentales).
- La fijación de las hipótesis de cálculo a considerar.
- La división de los subsistemas en componentes, su modelización y el cálculo y comprobación de cada uno de ellos.

- ETAPA 2. Definir y calcular las partes.

Todas las partes en que se divide cada componente deben ser tales que en la fase de fabricación no quede ningún aspecto constructivo sin definir. Todos los detalles no resueltos en esta fase pueden llegar a significar un gran problema en un futuro. Esta etapa incluye:

- Definición de las partes de cada componente y de las hipótesis de cálculo específicas.
- La modelización, el cálculo y el dimensionado de cada elemento.
- La consideración de que los elementos forman parte de un conjunto y de que éste debe ser óptimo.

- El estudio y cálculo de los elementos de unión y piezas auxiliares, de control y de montaje.
- Los esquemas, dibujos y detalles constructivos de cada una de las partes.

– ETAPA 3. Ensamblar y comprobar partes.

Esta etapa lleva a una primera solución de diseño completo y comprende los siguientes procesos:

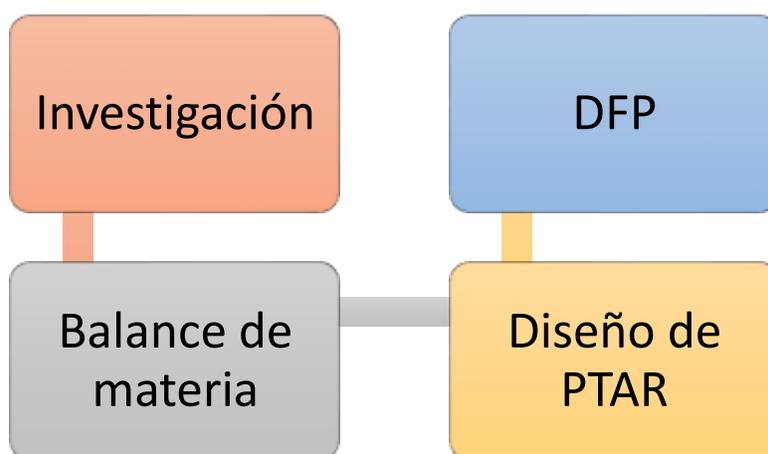
- Ensamblar partes en componentes y éstos en subsistemas.
- Dibujar el conjunto y detalles del ensamblaje.
- Calcular los elementos que aún no estaban definidos.

– ETAPA 4. Comprobar dimensiones y resultados con normas.

Cuando el proyecto esté calculado en su totalidad y las dimensiones y los componentes estén completos, se tiene que comprobar los resultados de modo que se cumplan las leyes, normas y los reglamentos. En todo caso se deben consultar las normas con el fin de incluir en los planos y los demás documentos todas las condiciones que es obligatorio citar.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

El inicio del proyecto fue la investigación de los antecedentes más importantes de la zona a tratar; San Lorenzo Xochimilco, los datos arrojados por la investigación son importantes para que la elección de la tecnología sea la adecuada y para conocer los antecedentes de contaminantes o tecnologías aplicadas al sitio. En el siguiente diagrama se muestra la metodología.



Posteriormente se llevó a cabo el diseño del proceso, tomando en cuenta los principales parámetros fisicoquímicos que caracterizan al agua residual como lo son DQO, Nitratos y Sólidos totales, estos valores fueron seleccionados de la literatura Metcalf and Eddy, en la tabla 7 se enlistan los contaminantes presentes en el agua residuales y su concentración, clasificando en débil, media o fuerte.

Tabla 7. Composición típica del agua residual.

CONTAMINANTE	UNIDADES	CONCENTRACIÓN		
		DEBIL	MEDIA	FUERTE
Sólidos Totales (ST)	mg/L	350	750	1200
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	mg/L	250	500	850
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	mg/L	110	220	400
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	250	500	1000
Nitrógeno Total (NT)	mg/L	20	40	85
Nitrógeno Amoniacal (NA)	mg/L	12	25	50

Para el diseño del proceso se calculó un valor promedio, y posteriormente se realizaron las técnicas analíticas correspondientes para determinar los valores reales de los contaminantes presentes.

Nitrógeno Total Kjendahl	NORMA MEXICANA NMX-AA-026-SCFI-2010
Demanda Química de Oxígeno	NORMA MEXICANA NMX-AA-030/1-SCFI-2012
Sólidos Disueltos Totales	NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-AA-34-1976

Para que el efluente de la PTAR cumpla con la NOM-003-SEMARNAT-1997, el diseño del tren de tratamiento debe cumplir con las tres fases de tratamiento las cuales se explican a continuación:

3.1 TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN EL SITIO

A continuación, se explican cada una de las etapas que conforman el tratamiento de agua residual.

3.1.1 TRATAMIENTO PRIMARIO

El tratamiento primario consistió en la eliminación de sólidos y arenas que están presentes en el influente de la planta, para esta etapa se utilizó la criba y el hidrociclón.

3.1.2 TRATAMIENTO SECUNDARIO

El tratamiento secundario en una planta de tratamiento de aguas residuales es la eliminación de la materia orgánica que se encuentra en el influente del sistema, y para llevar a cabo este paso existen diversas tecnologías, para este caso particular se podrían utilizar tres diferentes tecnologías; reactor anaerobio de flujo ascendente, lodos activados y el reactor biológico tubular.

Tomando en cuenta los datos que arrojó la investigación previa como el espacio disponible, tipo de suelo y accesibilidad, se estableció que de las tres tecnologías el RBT fue la más óptima, este reactor tiene características como lo es su tamaño compacto, fácil armado, y de fácil transportación que lo hizo perfecto para el sitio.

3.1.3 TRATAMIENTO Terciario

El tratamiento terciario consta de la desinfección del agua, para esta etapa se pensaron tres desinfecciones diferentes: desinfección con lámpara UV, cloración y la tecnología aportada por el CIDETEQ que consta de electroquímica.

3.1.4 CALIDAD DE EFLUENTE

La integración de un proceso de tratamiento se define en función de la calidad deseada del efluente, la cual se define con los requerimientos de descarga fijados en la legislación vigente o bien de especificaciones de reúso.

Teniendo esta información y la obtenida en la caracterización del agua residual a tratar, se obtiene la eficacia (remoción de contaminantes) que el proceso tiene que cumplir.

Cuando se completó el diseño del proceso, se llevó a cabo la realización de los planos correspondientes a una planta de tratamiento de aguas residuales, que son el Diagrama de Flujo de Proceso (DFP) y Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI), LAY-OUT.

El Diagrama de Flujo de Proceso (DFP) muestra el proceso completo paso por paso, acotando las entradas, las salidas, nombre de los equipos, acotaciones correspondientes, número de líneas, y componentes que entran y salen del proceso.

Para tener mejor control de los parámetros a medir se diseñó un dispositivo que funciona mediante IoT (internet de las cosas) y cada media hora registra los datos que arrojen los medidores correspondientes a pH, turbidez, oxígeno disuelto y temperatura, y son enviados a una base de datos para su posterior análisis.

Cuando la elección de la tecnología principal se llevó a cabo, se diseñó un proceso que complementa el tren de tratamiento, realizando el balance de materia de cada equipo y del proceso completo, para saber con más exactitud cómo funciona el proceso y si el influente cumple con la normatividad establecida.

Los equipos que complementan el proceso se diseñaron con base en los requerimientos de proceso y de la tecnología principal para este caso el Reactor

Biológico Tubular, se cotizaron con diferentes proveedores y se eligió el más apto para el proceso.

CAPITULO 4. CASO DE ESTUDIO

4.1 UBICACIÓN DEL PROYECTO

El terreno destinado para la construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales se ubica en la alcaldía Xochimilco de la Ciudad de México.

Localización de la planta: 2da. Cerrada de Adelaida, San Lorenzo, Xochimilco. C.P. 16040, CDMX.

En las Ilustraciones 2,3,4 se muestra la localización de la PTAR.



Ilustración 2. Localización PTAR. Fuente: Google



Ilustración 3. Imagen satelital de la demarcación. Fuente: Google



Ilustración 4. Imagen satelital del predio. Fuente: Maps

4.2 BASES DE DISEÑO

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales se abastecerá de agua proveniente del canal ubicado en San Lorenzo Xochimilco, las cuales emanan directamente de los drenajes de casas aledañas que no cuentan con drenaje municipal, en su mayoría se consideran de tipo doméstico clasificadas como aguas negras y aguas grises.

Para lograr un buen diseño de la Planta de Tratamiento es necesario y fundamental llevar a cabo muestreo y posterior análisis para saber el nivel de contaminantes que contiene el agua, con base en eso se elige el tipo de tratamiento y se diseñan los diferentes equipos.

En la tabla 8 se muestran los valores de los contaminantes presentes en la muestra proveniente de San Lorenzo Xochimilco.

Tabla 8. Parámetros fisicoquímicos de la muestra residual de Xochimilco

CONTAMINANTE	UNIDADES	CONCENTRACIÓN
Sólidos Totales (ST)	mg/L	711
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	mg/L	611
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	288.44
Nitrógeno Total (NT)	mg/L	34.58
Nitrógeno Amoniacal (NA)	mg/L	19.23

El diagrama del tren de tratamiento de agua residual se muestra en la ilustración 5:

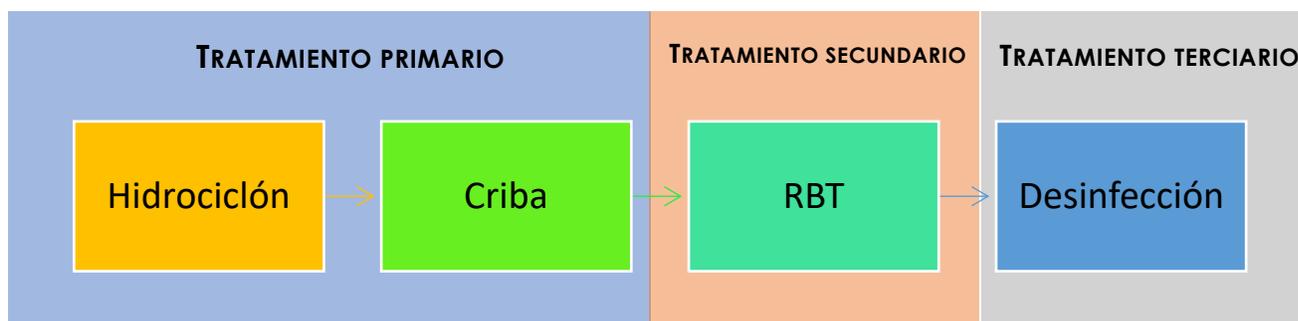


Ilustración 5. Diagrama de tratamiento del agua residual.

4.3 FILOSOFÍA DE OPERACIÓN

Las aguas residuales que se tratarán en el proceso provienen del canal de San Lorenzo en Xochimilco; el suministro será directamente de dos descargas que se encuentran

en las orillas del canal, y entran a la planta de tratamiento de agua con un gasto de 285 L/min \pm 10%.

El influente de la planta reside en el primer tanque de alimentación donde la bomba sumergible marca FranklinAgua® P-001 A/B impulsará 28 L/min de aguas residuales al equipo F-001 Hidrociclón.

Las corrientes provenientes de la bomba P-001 A/B contienen arena y sólidos que puede llegar a dañar el funcionamiento del reactor biológico tubular y equipos electromecánicos, la función del hidrociclón es separar las arenas del efluente de P-001/A/B, en dos fracciones, la corriente que se llevará la arena para su posterior disposición y en la corriente que ingresará a la criba estática F-002.

La principal función de la criba estática F-002 es eliminar eficazmente todos los sólidos suspendidos que contenga el agua residual con la condición de que el diámetro del sólido sea mayor a 1mm, el agua libre de arenas y sólidos se dirige al tanque de bombeo B-002.

El tanque de bombeo B-002 tiene como función contener el agua residual libre de arenas y sólidos, lista para ser tratada, la bomba sumergible impulsa el agua hacia el reactor biológico tubular.

El equipo principal corresponde al tratamiento secundario y es conocido como reactor biológico tubular (RBT) consta de un sistema innovador de reactores biológicos de biomasa fija conformado por 8 tubos de 6" de PVC cédula 80 lo que confiere resistencia a altas presiones, la longitud de cada tubo es de 2 m proporcionando así 16 m de tratamiento.

Las medidas totales del equipo son de 2.5 m de largo, 1 m de ancho y 2 m de altura. El sistema biológico cuenta con medidores de oxígeno disuelto, pH, turbidez y manómetros en las corrientes de entrada y salida para monitorear el funcionamiento del equipo. Dados los requerimientos de oxígeno del equipo RBT para mantener la biomasa en óptimas condiciones, se utiliza un soplador V-001 marca HAILEA® que

suministra una corriente de aire de 350 L/min en el primer módulo del reactor biológico tubular para su distribución dentro del sistema.

Debido al incremento de lodos ocasionado por la actividad microbiana dentro del reactor, el sistema de purga será accionado manualmente con el fin de evitar obstrucciones dentro del RBT. En la corriente de purga opera un compresor V-002 con motor eléctrico de 1 HP, este equipo tiene la función de filtrar, a través de una corriente de aire, los lodos provenientes del tratamiento en el reactor biológico tubular RBT.

La corriente de purga de lodos llega a un sistema de filtros que consta de un filtro de discos AZUD®, el proceso de filtrado se encuentra en etapa de investigación para su posterior experimentación en la planta. Cuenta con una corriente de salida que contienen los sólidos de los lodos una especie de “torta” para su posterior disposición y una corriente de agua filtrada con destino al canal.

El RBT cuenta con una corriente de salida de aire cuyo destino es la atmósfera, y una corriente de salida del agua tratada que, a su vez, se divide en dos corrientes; una con dirección a B-002 con el fin de mantener las variables antes mencionadas constantes y la otra corriente que se divide en tres corrientes para su posterior desinfección.

Por último, se llega a la parte del tratamiento terciario que consiste en un mezclador estático y tiene como función mezclar el efluente del reactor con una corriente de hipoclorito de sodio suministrada con ayuda de una bomba peristáltica P-004. La tecnología de desinfección será proporcionada por CIDETEQ que consiste en el diseño y experimentación de un reactor electro-Fenton para desinfección de agua real y finalmente una lámpara de luz UV.

Los tres efluentes de desinfección se juntan de nuevo en una sola corriente que cuenta con todos los parámetros para ser desembocada en el canal.

El material seleccionado para las tuberías e instrumentación (codos, válvulas, adaptadores) es PVC cedula 80, para el control de las bombas, RBT y demás equipos se tienen manómetros de glicerina de la marca de rango de operación de 0 Kg/m² a

700 kg/m², rotámetros que serán de la marca Blue-White ® capaces de medir un flujo de 28 L/min.

4.4 DESCRIPCIÓN BÁSICA DEL PROCESO

En los siguientes párrafos se describe la función de cada una de las etapas.

Tanque de alimentación (B-001)

El tanque de alimentación permite homogenizar el agua, mantener un flujo continuo hacia el reactor biológico tubular y permite controlar las variaciones de flujo que pudieron ocurrir durante el día (Cheremisinoff, 2018)

Los principales beneficios derivados de la integración de este equipo a la planta son (Cheremisinoff, 2018)

- La tratabilidad de las aguas residuales mejora después de haber añadido dicho equipo.
- Se mejora el tratamiento biológico porque se eliminan o se pueden minimizar las cargas de choque, se pueden diluir las sustancias inhibitoras y se puede estabilizar el pH.
- La calidad del efluente y el rendimiento de espesamiento de los tanques de sedimentación secundaria después del tratamiento biológico se mejoran mediante la carga constante de sólidos.
- Se reducen los requerimientos de superficie de filtración de efluentes, se mejora el rendimiento del filtro y son posibles ciclos de retrolavado de filtro más uniformes.
- En el tratamiento químico, la amortiguación de cargas masivas mejora el control de la alimentación química y la confiabilidad del proceso.

En algunos casos, puede ser apropiada la homogeneización de flujo después del tratamiento primario y antes del tratamiento biológico.

Ahora bien, es entonces que el efluente del tanque de grasas y aceites ingresará a este equipo, en donde el flujo chocará con una mampara para obtener dos beneficios

principalmente: que la velocidad de flujo sea controlada y que ciertos sólidos caigan por gravedad a una fosa de la cual se puedan retirar con facilidad del proceso.

A un lado de la mampara se encontrará el cárcamo de bombeo que trasladará el agua por las tuberías verticales hacia el siguiente equipo.

Bomba P-001 A/B

La bomba de alimentación principal P-001A es una bomba sumergible conectada en paralelo con la bomba de relevo P-001 B, contiene un impulsor sellado, e impulsará 28 L/min de aguas residuales al hidrociclón F-001. La bomba tendrá un impulsor para aguas residuales contra atascos y que soporte el paso de arena.

Hidrociclón (F-001)

Las corrientes provenientes de las bombas P-01 A/B contienen arena que puede llegar a dañar el rendimiento de la biopelícula o las tuberías que componen al reactor biológico tubular RTB. El hidrociclón F-001, es un equipo destinado a separar los sólidos suspendidos, en dos fracciones, la corriente que llevará la arena y en la corriente que ingresará a la criba estática. La alimentación entra tangencialmente en la parte cilíndrica a una cierta presión, lo que genera su rotación alrededor del eje longitudinal del hidrociclón, formándose un “torbellino primario” descendente hacia el vértice inferior del hidrociclón, la arena gira cercana a la pared por efecto de la aceleración centrífuga, siendo evacuadas a través de la boquilla en forma de pulpa espesa.

Criba estática (F-002)

La corriente proveniente del hidrociclón F –001 está libre de arena, pero aún contiene algunos sólidos suspendidos, la criba estática también llamado tamiz es un equipo desarrollado para la separación de sólidos en suspensión dentro de líquidos, se hace de forma rápida sin necesidad de soporte de energía.

Reactor Biológico Tubular (RBT)

Directamente del equipo F-001 entra al reactor donde se llevará a cabo el principal tratamiento.

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 y logística de alcantarillado y conducción del agua.

El reactor está conformado por 8 tubos de 6" de PVC cedula 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, la configuración se puede observar en la ilustración 6, ésta consiste en cinco 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 González, 2019)

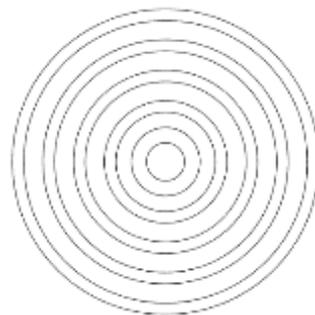


Ilustración 6. Configuración interna de la fibra polimérica

En la parte inferior del reactor se localiza un difusor de aire como el que se muestra en la ilustración 7, 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 de los microorganismos estos microorganismos toman el oxígeno y la materia orgánica presente para su metabolismo y su crecimiento celular por lo que disminuyen la DBO del agua.



Ilustración 7. Difusor de burbuja fina usado en el RBT

Los esfuerzos cortantes mantienen una biopelícula óptima debido a que el grosor se mantiene a pesar del crecimiento celular lo que evita la colmatación en los tubos por lo que sólo es necesaria una purga de lodos periódicamente.

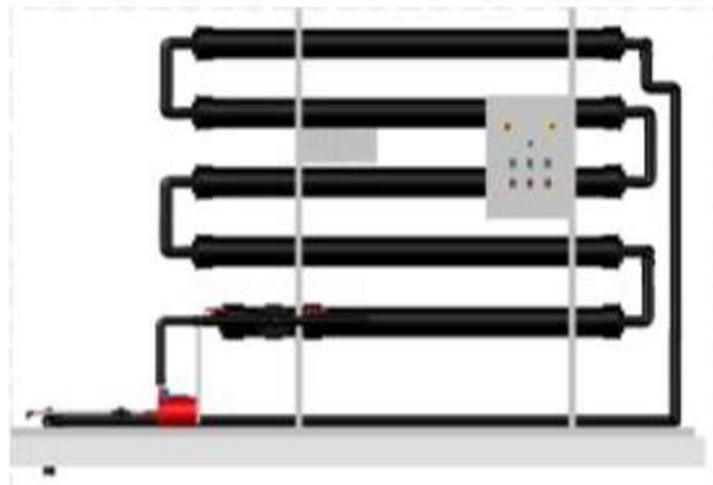


Ilustración 8. Reactor Biológico Tubular.

El reactor biológico tubular se muestra en la ilustración 8 y es la parte medular del tren de tratamiento esto es debido a que en éste se realiza el tratamiento principal reduciendo considerablemente la carga orgánica de agua cruda así como el nitrógeno

amoniacal, además, un modelo previo a demostrado ser una opción factible para aguas residuales domésticas a pequeña escala. (García González, 2019)

El reactor cuenta con recirculación al final del módulo para así mejorar la remoción de materia orgánica aumentando los tiempos de residencia hidráulicos.

Sus medidas en planta son de 2.5 metros de largo, 1 metro de ancho y 2 metros de altura.

Filtro de lodos de purga (F-003)

- Filtro de discos.

Las corrientes provienen de la purga del reactor, sin embargo, los lodos producidos en procesos de tratamiento biológicos están formados por biomasa y contienen del 98.5 al 99.5% de humedad, con un valor típico del 99.2% (Macias, 2013)

El filtro Helix System de AZUD (F-003) funciona de la siguiente forma; el flujo ingresa al filtro encontrándose con una hélice en el interior de éste, ésta origina un movimiento helicoidal y centrífugo que aleja las partículas de los discos, reduciendo la frecuencia e intensidad de las labores de mantenimiento, con el consiguiente ahorro de agua. (AZUD, 2020)

Cuando el agua está bien distribuida dentro del filtro, ésta pasa a través de los discos ranurados comprimidos gracias a un muelle ubicado en la parte superior del filtro que retienen las partículas del lodo, el agua ya filtrada fluye hacia una de las conexiones de salida .

Para la limpieza manual es necesario desenroscar la manilla del muelle para descomprimir el filtro y que sea sencillo separar los discos, con agua a presión se limpian los discos y se arma nuevamente el dispositivo.

Soplador (V-001)

Los sopladores se emplean generalmente cuando se generan cabezales de presión en el rango de 2.0 a 14.7 psi.

Hay 4 tipos de sopladores comúnmente usados para la aeración de agua residual: centrífugo de una etapa, centrífugo de multietapa, turbo de alta velocidad y de desplazamiento positivo. Los sopladores centrífugos se utilizan casi universalmente cuando la capacidad de la unidad es superior a 425 m³/min de aire libre. (Tchobanoglous, 2013)

Los sopladores centrífugos tienen características de operación similares que una bomba centrífuga. La presión de descarga sube desde el cierre o “shutoff” hasta un máximo en aproximadamente el 50 por ciento de la capacidad y luego desciende.

El punto de operación de un soplador es determinado de forma similar que una bomba centrífuga por medio de la intersección de la curva de capacidad de la cabeza y la curva del sistema.

De acuerdo al soplador seleccionado, se espera impulsar cierto flujo de aire hacia el primer módulo que conforma al reactor biológico, con el objetivo de proporcionar oxígeno disuelto dentro del flujo de agua residual que ingresa a este mismo reactor y que, los microorganismos inmovilizados dentro del soporte lleven a cabo con eficacia los procesos biológicos de remoción de contaminantes.

Compresor (V-002)

El compresor V-002 tiene la función de filtrar con ayuda de aire los lodos provenientes del tratamiento en el reactor biológico tubular (RBT) para que únicamente queden los lodos al final del proceso. Los compresores son equipos que aumentan la presión de líquidos compresibles como gases y vapores haciéndolos fluir. La energía para realizar este trabajo la proporciona un motor eléctrico y se requerirá de uno pequeño con potencia de 1hp.

4.5 DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO (DFP)

El Diagrama de Flujo de Proceso es un tipo de plano que muestra los principales equipos que conforman el proceso y cómo es que se relacionan entre ellos, contiene

simbología que identifica las corrientes que conectan los equipos y el balance de materia del proceso.

4.5.1 ÍNDICE DE LÍNEAS

Para el diseño del DFP se necesita una clasificación de las sustancias que intervienen en el proceso las cuales se muestran en la Tabla 9, una clasificación de líneas (corrientes) la cual se muestra en la Tabla 11, una clasificación del material que conforma las tuberías, Tabla 10, y una clasificación de los principales equipos que se muestran en la Tabla 12.

Tabla 9 Clasificación de sustancias que intervienen en el proceso

SUSTANCIA	CLAVE
Agua Cruda	AA
Agua Pretratada	AP
Agua Tratada	AT
Agua Desinfectada	AD
Aire	Ai
Lodos de purga	LP
Arena	AR
NaClO	NC

Tabla 10 Clasificación de material en tuberías

MATERIAL	CLAVE
PVC	S1
PVC flexible	S2
Concreto	S3

Tabla 11 Clasificación de líneas

CORRIENTE	CODIFICACIÓN	ENTRADA	SALIDA
Línea 1	SE-AA-01-S3	Límite de Batería	CP
Línea 2	SE-AA-02-S3	Límite de Batería	CP
Línea 3	SE-AA-03-S3	CP	B-001
Línea 4	SE-AA-04-S3	B-001	P-001A/B
Línea 5	2"-SS-05-S1	P-001 A/B	F-001
Línea 6	SE-AR-06-S1	F-001	Límite de Batería
Línea 7	2"-AP-07-S1	F-001	F-002
Línea 8	2"-AP-08-S1	F-002	B-002
Línea 9	2"-AP-09-S1	B-002	P-002A/B
Línea 10	2"-AP-10-S1	P-002 A/B	RBT
Línea 11	2"-AP-11-S1	Bifurcación	RBT
Línea 12	2"-Ai-12	Límite de Batería	V-001
Línea 13	2"-Ai-13-S1	V-001	RBT
Línea 14	2"-LD-14-S1	Bifurcación	P-003
Línea 15	2"-Ai-15	Límite de Batería	V-002
Línea 16	2"-al-16-S1	V-002	Línea 18
Línea 17	2"-Ai-17-S1	P-003	F-003
Línea 18	2"-LD-18-S1	Línea 17	F-003
Línea 19	2"-LD-19-S1	F-003	Límite de Batería
Línea 20	2"-AT-20-S1	F-003	Límite de Batería
Línea 21	2"-Ai-21-S1	RBT	Límite de Batería
Línea 22	2"-AT-22-S1	RBT	Bifurcación
Línea 23	2"-AT-23-S1	Bifurcación	B-002
Línea 24	2"-AT-24-S1	Bifurcación	Líneas 29,27,25
Línea 25	2"-AT-25-S1	Línea 24	A-001
Línea 26	2"-AD-26-S1	A-001	Línea 34
Línea 27	2"-AT-27-S1	Línea 24	C-001
Línea 28	2"-AD-28-S1	C-001	Línea 34
Línea 29	2"-AT-29-S1	Línea 24	Línea 32
Línea 30	2"-NC-30-S2	B-003	P-004
Línea 31	2"-NC-31-S2	P-004	Línea 32
Línea 32	2"-AT-32-S1	Líneas 29 Y 31	R-001
Línea 33	2"-AD-33-S1	R-001	Línea 34
Línea 34	2"-AD-34-S1	Líneas 26,28 y 33	Límite de Batería

4.6 PRINCIPALES EQUIPOS QUE CONFORMAN EL PROCESO

Para la correcta selección de los equipos que conforman el proceso se realizaron los cálculos de diseño correspondientes a cada equipo; los equipos seleccionados se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12 Clasificación de equipos

EQUIPO	CLAVE
Tanque de alimentación	B-001
Bomba de alimentación	P-001 A/B
Hidrociclón	F-001
Criba estática	F-002
Tanque de bombeo	B-002
Bomba de alimentación	P-002 A/B
Paquete Reactor Biológico Tubular	RBT
Soplador	V-001
Bomba de lodos	P-003
Filtro de lodos de purga	F-003
Compresor	V-002
Tanque hipoclorito de sodio	B-003
Bomba peristáltica	P-004
Mezclador estático	R-001
Reactor electro-fenton	C-001
Cámara de luz UV	A-001

En la ilustración 9 se muestra el Diagrama de Flujo de Proceso.

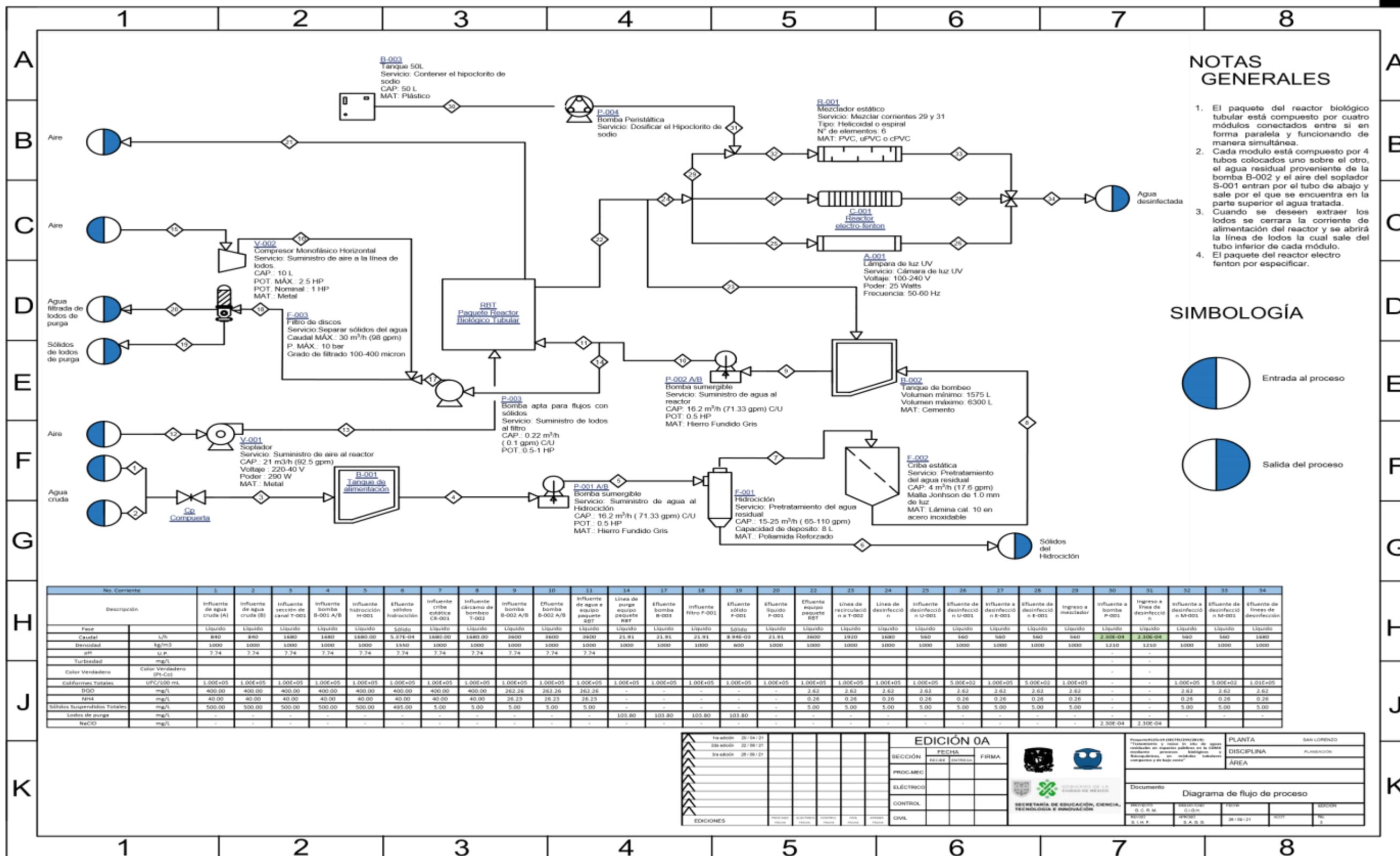


Ilustración 9. Diagrama de flujo de proceso de la PTAR.

CAPITULO 5. BALANCE DE MATERIA

5.1 MEMORIA DE CÁLCULO DEL BALANCE DE MATERIA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

Se describen las estrategias, los procedimientos, los cálculos y los resultados obtenidos que dan origen al balance de materia de las distintas corrientes presentes en la planta de tratamiento.

CONSIDERACIONES PRELIMINARES:

1. El caudal de ingreso a la planta de tratamiento es de 1,680 L/h, se sabe que el agua de los canales contiene diversos contaminantes, entre ellos sólidos suspendidos (SS) y arenas.
2. Se busca eliminar el 99% de arenas finas con un hidrociclón, mientras que los sólidos suspendidos mayores a 1 mm en un 99% se eliminan mediante el uso de una criba estática.
3. La densidad del agua ($\rho=1000 \text{ kg/m}^3$) fue tomada de la literatura Metcalf-Eddy. "Tratamiento y depuración de las aguas residuales" 1991.
4. Con el fin de abordar las particularidades del sistema y superar los desafíos asociados a las interconexiones entre las líneas de aire y agua, así como la complejidad del balance para obtener la producción de lodos, se tomó la decisión de desglosar el balance en cuatro partes distintas.
 - o Corrientes de Agua
 - o Corrientes de Desinfección
 - o Corrientes de Lodos
 - o Corrientes de Aire
5. Cada apartado está dividido en los siguientes subapartados:
 - o Clasificación de la información: En donde se expone un esquema, la corriente de ingreso y egreso a la sección, las consideraciones utilizadas, así como las fuentes de las cuales se tomaron las mismas.

- Procesamiento de la información: En donde se muestran las ecuaciones utilizadas a lo largo del balance.
- Resultados: En donde se expone tabla con los parámetros para cada corriente.

5.1.1 CORRIENTES DE AGUA:

Los parámetros por medir a lo largo de la línea incluyen: amonio (NH_4^+), sólidos suspendidos (SS), turbiedad, pH, densidad, coliformes totales (CT) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) que se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Datos del influente.

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Flujo	L/min	28
Densidad	Kg/m ³	1000
DQO	mg/L	400
Huevos de Helminetos	mg/L	10
NH ₄	mg/L	40
Sólidos Suspendidos	mg/L	500

La Tabla 14 muestra los datos de los equipos.

Tabla 14. Datos de equipos.

EQUIPO	UNIDAD	VALOR
Bomba P-001-2 A/B	L/min	270
Bomba P-004	L/min	60
Soplador	L/min	350
Compresor	m ³ /min	0.28

La ilustración 10 muestra las corrientes 1 y 2 que representan tomas de drenaje sanitario proveniente de casas aledañas, ambas tomas se unen y desembocan en el canal, representado por la corriente 3.

La corriente 4 representa el ingreso del agua residual al tratamiento primario, el balance para esta etapa es la mostrada en la ecuación 1.

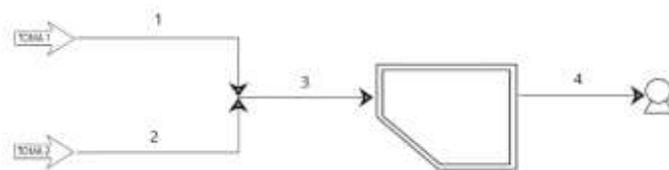


Ilustración 10 Corrientes de entrada al proceso

$$F_1 + F_2 = F_3 = F_4 = F_5 \tag{1}$$

En la Tabla 15 se muestra el balance para la primera etapa establecida.

Tabla 15. Balance de materia en las corrientes 1 a la 4.

NO. CORRIENTE		1	2	3	4
DESCRIPCIÓN		INFLUENTE DE AGUA CRUDA (A)	INFLUENTE DE AGUA CRUDA (B)	INFLUENTE SECCIÓN DE CANAL T-001	INFLUENTE BOMBA B-001 A/B
Fase		LIQUIDO	LIQUIDO	LIQUIDO	LIQUIDO
Caudal	L/h	840	840	1680	1680
Densidad	kg/m ³	1000	1000	1000	1000
pH	U.P.	7.74	7.74	7.74	7.74
Coliformes Totales	UFC/100 mL	1.00E+05	1.00E+05	1.00E+05	1.00E+05
DQO	mg/L	400.00	400.00	400.00	400.00
NH ₄	mg/L	50.00	50.00	50.00	50.00
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	500.00	500.00	500.00	500.00
Lodos de purga	mg/L	-	-	-	-
NaClO	mg/L	-	-	-	-

En la Ilustración 11 se muestra el diagrama del hidrociclón y las corrientes que conforman el proceso; con el uso del hidrociclón se busca eliminar el 99% de arenas presentes en la corriente 5. La purga de arenas obtenidas en el hidrociclón es un proceso discontinuo, implicando así, que la cantidad de agua desviada a la corriente 6 puede considerarse como despreciable para el balance de materia. En la Ecuación 2 se observa cómo obtener los sólidos que salen del hidrociclón en la corriente 7.

$$SS_{[F7]} \left(\frac{kg}{h} \right) = \left(SS_{[F6]} \frac{kg}{h} \right) - \left(SS_{[F6]} \frac{kg}{h} \right) (0.99) \tag{2}$$

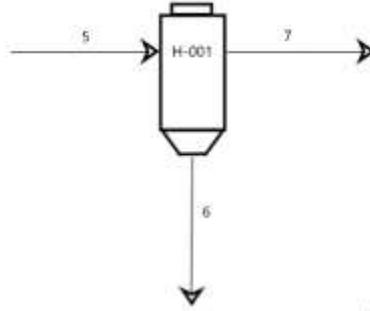


Ilustración 11. Corrientes del hidrociclón.

Siendo el balance para el hidrociclón la Ecuación 3:

$$F_5 = F_7 - F_6 \quad (3)$$

En la ilustración 12 se muestra la criba estática donde los sólidos superiores a 1 mm de espesor son eliminados de la corriente 7.

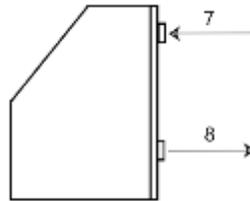


Ilustración 12. Corrientes de la criba estática.

Siendo el balance para la criba la Ecuación 4:

$$F_7 = F_8 \quad (4)$$

En la Tabla 16 se muestra el balance de materia para la criba.

Tabla 16. Corrientes de criba e hidrociclón.

PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE SÓLIDOS		99%		
NO. CORRIENTE		5	6	7
DESCRIPCIÓN		INFLUENTE HIDROCICLÓN H-001	EFLUENTE SÓLIDOS HIDROCICLÓN	INFLUENTE CRIBA ESTÁTICA CR-001
Fase		LÍQUIDO	SÓLIDO	LÍQUIDO
Caudal	L/h	1680.00	5.37E-04	1680.00
Densidad	kg/m ³	1000	1550	1000
pH	U.P.	7.74	7.74	7.74
Coliformes Totales	UFC/100 mL	1.00E+05	1.00E+05	1.00E+05
DQO	mg/L	400.00	400.00	400.00
NH ₄	mg/L	50.00	50.00	50.00
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	500.00	495.00	5.00
Lodos de purga	mg/L	-	-	-
NaClO	mg/L	-	-	-

La ilustración 13 muestra las corrientes establecidas para el cárcamo de bombeo, la corriente 9 ingresa al RBT, mientras que la corriente 8 y 23 ingresan al cárcamo de bombeo, esta última producto de una recirculación descrita un poco más adelante. Considerando que, debido a que la recirculación es del 53% de la corriente 9, existirá una mezcla de ambas corrientes, el valor de los parámetros; DQO y NH₄ en la corriente 9 se calcularon como se muestra en las Ecuaciones 5 y 6.

$$F_9 X_{DQO}^9 = \left(\frac{F_{23}}{F_{23} + F_8} \right) X_{DQO}^{23} + \left(\frac{F_8}{F_{23} + F_8} \right) X_{DQO}^8 \quad (5)$$

$$F_9 X_{NH_4}^9 = \left(\frac{F_{23}}{F_{23} + F_8} \right) X_{NH_4}^{23} + \left(\frac{F_8}{F_{23} + F_8} \right) X_{NH_4}^8 \quad (6)$$

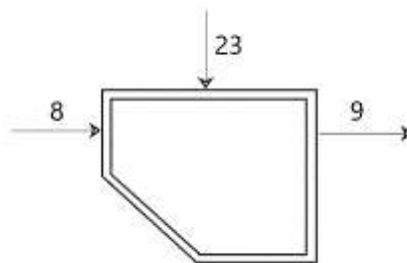


Ilustración 13. Corrientes en el cárcamo de bombeo.

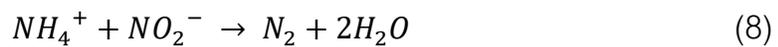
En la ecuación 7 se muestra el balance por corrientes para el cárcamo de bombeo:

$$F_9 = F_{23} + F_8 \quad (7)$$

La ilustración 14 establece el balance de corrientes para el reactor biológico tubular (RBT), se puede observar que la corriente 11 ingresa al RBT, en donde se elimina el 99% de DQO y de NH_4 presentes en la corriente. La concentración de sólidos no se ve afectada.

El amonio puede eliminarse de las aguas residuales mediante la oxidación anóxica del amonio (anammox), en donde el NH_4^+ actúa como donante de electrones.

El proceso lo llevan a cabo bacterias de crecimiento lento que son autótrofas, como la bacteria anammox. En la biopelícula, existen zonas óxicas y anóxicas, por lo que los nitrificantes aerobios producen el NO_2^- que se convierte en el aceptor de electrones necesario para el proceso. Aquí, el nitrito y amonio se convierten directamente en gas nitrógeno. La reacción catabólica se muestra en la ecuación 8:



Finalmente, la corriente 22 se divide en dos partes:

- La corriente 23 va como recirculación al cárcamo de bombeo.
- La corriente 24 va hacia las corrientes de desinfección.



Ilustración 14. Corrientes del RBT.

En la ecuación 9 se muestra el balance por corrientes para el RBT:

$$F_{10} = F_{11} = F_{22} = F_{24} + F_{23} \quad (9)$$

El cálculo para determinar la cantidad de veces que la corriente 23 debe recircular hacia el cárcamo de bombeo partió de la condición en donde se busca que el **Tiempo de Retención Hidráulico (TRH)** en el RBT sea de 1 h.

En la Ilustración 15 se muestra el diagrama de la recirculación.

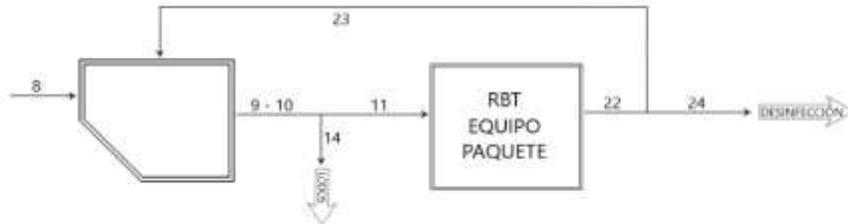


Ilustración 15. Corrientes de la recirculación.

Para que el balance se cumpla, los flujos de la corriente 8 y 22 deben ser iguales, por lo que la resta del flujo de la corriente 11 y 8 será igual al flujo de la corriente 23. Por su parte el TRH se calcula utilizando la ecuación 10.

$$TRH = \frac{(V)(n^{\circ} \text{módulos})}{Q} \quad (10)$$

$$TRH = \frac{(0.25 \text{ m}^3)(4 \text{ módulos})}{1.68 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = 0.595 \text{ h}$$

- En donde Q es el valor del flujo en m³/h.
- Mientras que V es el volumen en m³ de los 4 módulos presentes en el tren de tratamiento.

Debido a que la condición no se cumple, determinamos que una recirculación no es suficiente, sin embargo, con 2 recirculaciones el TRH aumenta al doble:

$$TRH = 0.595 \text{ h} (2) = 1 \text{ h } 12 \text{ min}$$

La condición se cumple y dividiendo el flujo de la corriente 23 sobre el de la 11 podemos saber el porcentaje de recirculación que se calcula a continuación.

$$\left(\frac{1.92 \frac{m^3}{h}}{3.6 \frac{m^3}{h}} \right) (100) = 53.3\%$$

En la Tabla 17 se presentan los datos del balance de materia del cárcamo y el RBT.

Tabla 17. Corrientes del cárcamo y el RBT.

PORCENTAJE DE REMOCIÓN						99%	
NO. CORRIENTE		8	9	10	11	22	23
DESCRIPCIÓN		INFLUENTE CÁRCAMO DE BOMBEO T-002	INFLUENTE BOMBA B-002 A/B	EFLUENTE BOMBA B-002 A/B	INFLUENTE DE AGUA A EQUIPO PAQUETE RBT	EFLUENTE EQUIPO PAQUETE RBT	LÍNEA DE RECIRCULACIÓN A T-002
Fase		LIQUIDO	LIQUIDO	LIQUIDO	LIQUIDO	LIQUIDO	LIQUIDO
Caudal	L/h	1680.00	3600	3600	3600	3600	1920
Densidad	kg/m ³	1000	1000	1000	1000	1000	1000
pH	U.P.	7.74	7.74	7.74	7.74		
Coliformes Totales	UFC/100 mL	1.00E+05	1.00E+05	1.00E+05	1.00E+05	1.00E+05	1.00E+05
DQO	mg/L	400.00	262.26	262.26	262.26	2.62	2.62
NH ₄	mg/L	50.00	32.75	32.75	32.75	0.33	0.33
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Lodos de purga	mg/L	-	-	-	-	-	-
NaClO	mg/L	-	-	-	-	-	-

5.1.2 CORRIENTES DE DESINFECCIÓN:

La ilustración 16 muestra el diagrama de desinfección donde la corriente 24 se divide en otras 3 (25, 27 y 29), las cuales dirigirán el flujo a distintos sistemas de desinfección: Luz UV (U-001), NaClO (M-001) y la tecnología del CIDETEC (E-001), con el objetivo de estudiar cuál de ellas es más conveniente para la planta de tratamiento. Al final del proceso las 3 corrientes se juntan nuevamente en una sola, el balance para este diagrama se establece en la ecuación 11.

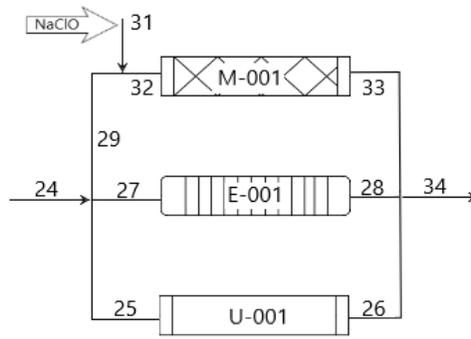


Ilustración 16. Corrientes de desinfección de la 24 a la 34.

$$F_{24} = F_{25} + F_{27} + F_{29} \quad (11)$$

En las ecuaciones 12 y 13 muestran el balance para los sistemas E-001 y U-001:

$$F_{27} = F_{28} \quad (12)$$

$$F_{25} = F_{26} \quad (13)$$

Para el proceso de desinfección M-001 se requiere un mezclador estático que se muestra en la ilustración 17 para homogeneizar las corrientes 31 de NaClO y la 29 de agua.

El flujo necesario de NaClO a utilizar se determina de la siguiente forma (ilustración 17): Se considera que en la corriente 29 la concentración de contaminantes es nula (C_c). La concentración de hipoclorito de sodio (C_h) en la corriente 31 es del 13% y de acuerdo con (CONAGUA, 2019) la concentración máxima de cloro (C_f) en la corriente 32 debe ser de 1.5 mg/L, el balance de estas corrientes se muestra en las ecuaciones 14 y 15.

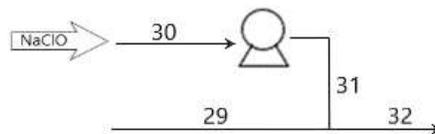


Ilustración 17. Corrientes de ingreso al mezclador estático.

$$F_{29} + F_{31} = F_{32} \quad (14)$$

$$F_{29}C_c + F_{31}C_h = F_{32}C_f \quad (15)$$

Partiendo de ambos balances, se interpreta como un sistema de ecuaciones de 2x2 con dos incógnitas como se muestra a continuación:

$$5.33 \frac{L}{min} + F_{31} = F_{32}$$

$$\left(5.33 \frac{L}{min}\right)(0) + F_{31}(13\%) = F_{32} \left(1.5 \frac{mg}{L}\right)$$

Para convertir el 13% de hipoclorito de sodio a mg/L, se partió de una concentración de 13 g de NaClO por cada 100mL de solución, siendo el porcentaje más común que se comercializa.

$$\left(\frac{13 \text{ g NaClO}}{100 \text{ mL}}\right) \left(\frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}}\right) \left(\frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}}\right) = 130,000 \frac{\text{mg NaClO}}{\text{L}}$$

Sustituyendo la ecuación (14) en la ecuación (15), despejamos el valor de F_{31} :

$$\left(5.33 \frac{L}{min}\right)(0) + F_{31} \left(130,000 \frac{\text{mg NaClO}}{\text{L}}\right) = \left(20 \frac{L}{min} + F_{31}\right) \left(1.5 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)$$

$$F_{31} = \frac{5.33 \frac{L}{min}}{(86666.66 - 1)} = 6.15 \times 10^{-5} \frac{L}{min}$$

Cabe destacar, que a lo largo de los 6 meses de prueba de la tecnología, se desea incrementar el flujo de agua tratada hasta llegar a 20 L/min, en donde F_{31} tendría un valor de 0.00023 L/min. El balance por corrientes para esta etapa se representa con la ecuación 16.

$$F_{31} + F_{29} = F_{32} = F_{30} \quad (16)$$

Finalmente, las corrientes 26, 28 y 33 se unen en la corriente 34 que retorna al canal. En la Tabla 18 y 19 se muestran los balances de materia de las corrientes de desinfección:

Tabla 18. Corrientes de desinfección 24-29.

PORCENTAJE DE REMOCIÓN POR DESINFECCIÓN				100%		100%	
NO. CORRIENTE		24	25	26	27	28	29
DESCRIPCIÓN		LÍNEA DE DESINFECCIÓN	INFLUENTE DESINFECCIÓN U-001	EFLUENTE DE DESINFECCIÓN U-001	INFLUENTE A DESINFECCIÓN E-001	EFLUENTE DE DESINFECCIÓN E-001	INGRESO A MEZCLADOR
Fase		LÍQUIDO	LÍQUIDO	LÍQUIDO	LÍQUIDO	LÍQUIDO	LÍQUIDO
Caudal	L/h	1680	560	560	560	560	560
Densidad	kg/m ³	1000	1000	1000	1000	1000	1000
pH	U.P.						
Coliformes Totales	UFC/100 mL	1.00E+05	1.00E+05	5.00E+02	1.00E+05	5.00E+02	1.00E+05
DQO	mg/L	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
NH ₄	mg/L	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Lodos de purga	mg/L	-	-	-	-	-	-
NaClO	mg/L	-	-	-	-	-	-

Tabla 19. Corrientes de desinfección 30-34.

PORCENTAJE DE REMOCIÓN					100%	
NO. CORRIENTE		30	31	32	33	34
DESCRIPCIÓN		INFLUENTE A BOMBA P-001	INGRESO A LÍNEA DE DESINFECCIÓN	INFLUENTE A DESINFECCIÓN M-001	EFLUENTE DE DESINFECCIÓN M-001	EFLUENTE DE LÍNEAS DE DESINFECCIÓN
Fase		LÍQUIDO	LÍQUIDO	LÍQUIDO	LÍQUIDO	LÍQUIDO
Caudal	L/h	2.30E-04	2.30E-04	560	560	1680
Densidad	kg/m ³	1210	1210	1000	1000	1000
pH	U.P.					
Coliformes Totales	UFC/100 mL	-	-	1.00E+05	5.00E+02	1.01E+05
DQO	mg/L	-	-	2.62	2.62	2.62
NH ₄	mg/L	-	-	0.33	0.33	0.33
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	-	-	5.00	5.00	5.00
Lodos de purga	mg/L	-	-	-	-	-
NaClO	mg/L	2.30E-04	2.30E-04			

5.1.3 CORRIENTES DE LODOS:

Los microorganismos en los reactores, independientemente de si son aerobios o anaerobios, pueden encontrarse de dos formas (Lozano Rivas , 2012): En la Tabla 20 se muestra la clasificación de microorganismos presentes en reactores.

Tabla 20. Clasificación de microorganismos presentes en reactores.

Componentes del agua residual			Reacción		Componentes del lodo			
Orgánicos	Solubles	Disueltos	No biodegradables	Escapan del efluente				
		Disueltos	Biodegradables	Se transforman en biomasa activa		Sólidos sedimentables totales (SST)	Sólidos sedimentables orgánicos volátiles (SSV)	Toda la biomasa en el reactor no suspendida y sedimentable
	Particulados	Suspendidos	No biodegradables	Se incorporan a la masa de lodos				
		Suspendidos	Biodegradables	Se transforman en biomasa activa				
	Sedimentables	No biodegradables	Se incorporan a la masa de lodos					
		Biodegradables	Se transforman en biomasa activa					
Inorgánicos	Particulados	Sedimentables	Se incorporan a la masa de lodos		Sólidos sedimentables inerte (SSI)			
		Suspendidos						
	Solubles	Precipitables	Se transforman en sólidos sedimentables					
		Utilizables biológicamente	Se transfiere a la fase	Sólida		Escapan como un gas		
			Gaseosa					
No precipitables y no utilizables biológicamente	Escapan con el efluente							

- Suspendidos (Cultivo en suspensión), cuando los microorganismos no cuentan con ningún medio de soporte sobre el cual adherirse. De manera simple, estos

reactores son similares a una piscina en la que los microorganismos “nadan” libremente en todas las direcciones posibles.

- Adheridos (Cultivo fijo), se presenta cuando los microorganismos se fijan sobre un medio de soporte (e.g. piedras, piezas plásticas, materiales inertes) formando una zooglea o biopelícula (biofilm).

El uso de oxígeno como el aceptor de electrones es la principal característica del metabolismo aerobio. Los sistemas de tratamiento biológico casi siempre se componen de poblaciones microbianas mixtas y, debido a las interacciones metabólicas de las diversas especies. Los principales productos finales del crecimiento aeróbico heterotrófico y la respiración son nuevas células microbianas, CO_2 y H_2O (Water Environment Federation, 2011).



La nueva masa microbiana se considera como el aumento de sólidos en suspensión o volátiles (SSV) que miden sólo sólidos orgánicos y son más adecuados para describir la biomasa en un reactor (Water Environment Federation, 2011)

Los constituyentes orgánicos biodegradables sean solubles, no sedimentables o sedimentables, pueden ser transformados en organismos heterótrofos ordinarios (OHO, XBH). Cuando estos organismos mueren dejan tras de sí materia orgánica no biodegradable y soluble llamada residuo endógeno (XEH) compuesto de materia no biodegradable de la pared celular. (López Vázquez, Buitrón Méndez, García, & Cervantes Carrillo, 2017)

La fracción de material orgánico particulada (suspendida y sedimentable) no biodegradable (X1) se adhiere junto con la masa de las OHO's y de residuo endógeno. Los 3 (XBH + XEH + X1) forman el componente orgánico de los sólidos sedimentables y los SSV que se acumulan en el reactor. (López Vázquez, Buitrón Méndez, García, & Cervantes Carrillo, 2017)

Los componentes inorgánicos (sedimentables y suspendidos) junto con los componentes inorgánicos solubles precipitados forman la masa de sólidos sedimentable inorgánicos (SSI) (López Vázquez, Buitrón Méndez, García, & Cervantes Carrillo, 2017)

La fracción no biodegradable y particulada de la DBO tiene una influencia considerable en la producción diaria de lodos y en su acumulación en un reactor biológico (López Vázquez, Buitrón Méndez, García, & Cervantes Carrillo, 2017)

Escribir la ecuación (17) en forma de un balance estequiométrico no es posible porque las conversiones están relacionadas con las características de la materia orgánica, las especies de organismos presentes y las características de funcionamiento del sistema de tratamiento, pero es un paso necesario para el diseño del sistema de tratamiento, ya que las estimaciones de oxígeno necesario y la producción de exceso de sólidos deben calcularse (Water Environment Federation, 2011)

Tiempo de Retención de Sólidos o Edad de Lodo (TRS) (Lozano Rivas , 2012):

Es la relación en masa de la cantidad de biomasa existente (microorganismos) en el reactor “Mexis”, por la biomasa eliminada “Melim” y por día.

Considerando que cuando los lodos se purgan directamente del reactor, las concentraciones en la purga y en el reactor son las mismas. Si queremos lograr una edad de 10 días para el lodo con un caudal de purga constante y considerando que la pérdida de sólidos en el efluente es despreciable, la ecuación 18 muestra como se calcula la edad de los lodos.

$$TRS = \frac{X_T V_p}{X_T Q_w} = \frac{V_p}{Q_w} \text{ [día]} \quad (18)$$

En donde:

- V_p es el volumen del reactor biológico [L]
- Q_w es el caudal de purga de lodos del reactor [L/día].

Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) (Lozano Rivas, 2012):

El tiempo de retención hidráulico se puede calcular como se muestra en la ecuación 19, es el cociente entre el volumen del reactor biológico o unidad de tratamiento V_p [L] por el caudal tratado de aguas residuales " Q_i [L/día].

$$TRH = \frac{V_p}{Q_i} \text{ [día]} \quad (19)$$

Cuando el lodo de recirculación del clarificador secundario (Q_s) y cualquier otra recirculación de licor mezclado que ingresa al reactor (Q_a) se incurren en el cálculo, se denomina tiempo de retención hidráulica real y se calcula como se muestra en la ecuación 20.

$$TRH_a = \frac{V_p}{Q_i + Q_s + Q_a} = \frac{TRH_n}{1 + s + a} \text{ [día]} \quad (20)$$

Relación de recirculación de lodos (Q_s/Q_i) y de licor mezclado (Q_a/Q_i) respectivamente. Cuando se incluye la remoción de sólidos en la fase acuosa los tiempos de retención se vuelven independientes y TRS es mayor a TRH_n . Cuando el TRS aumenta, también el TRH_n (Lopéz Vázquez, Buitrón Méndez, García, & Cervantes Carrillo, 2017)

En nuestro caso la remoción biológica de nutrientes es de 10 a 25 días, mientras que el tiempo de retención hidráulico nominal es de 1 a 8 horas.

En casi todas las aplicaciones de tratamiento biológico, una mezcla de compuestos orgánicos está presente, algunos de los cuales son solubles y otros están en forma de partículas. Las poblaciones microbianas mixtas generalmente atacan una amplia variedad de materiales solubles y particulados simultáneamente, por esta razón, es necesario el uso de una variable sustituta de la orgánica y la más común es la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), pero también se utilizan la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y el Carbono Orgánico Total (COT) (Boltz, y otros, 2010).

La DQO mide la capacidad de donación de electrones del material orgánico y, dado que los electrones no se pueden crear ni destruir, proporciona una base conservadora

para estos cálculos. La cuestión de la cantidad de DQO que representa materia orgánica biodegradable se trata caracterizando la DQO en términos de sus diferentes fracciones (Water Environment Federation, 2011)

- Simplificaciones del modelo (Uso completo de la materia orgánica biodegradable):

La diferencia entre la concentración de DQO soluble en el efluente con tiempos de retención de 2 a 3 hrs y de 18 a 24 hrs es muy baja (10 a 20 mgDQO/L).

La materia orgánica biodegradable está presente en concentraciones muy bajas en aguas residuales municipales y se divide en dos grupos: Biodegradable y No Biodegradable.

Con tiempos bajos de retención se remueve toda la materia biodegradable dejando solamente la no biodegradable, el material orgánico lentamente biodegradable (DQO_{lb}) se incorpora a la masa de lodos activados y a los SSV en el reactor. Para la materia orgánica particulada biodegradable no removida es a través de purga de lodos (Q_w) (López Vázquez, Buitrón Méndez, García, & Cervantes Carrillo, 2017)

Ecuaciones del sistema en estado estacionario:

- Para el afluente:

Los flujos máxicos de entrada de:

- Materia orgánica total

$$FS_{ti} = Q_i S_{ti} \quad \left[\frac{mgDQO}{día} \right] \quad (21)$$

- Orgánica biodegradable

$$FS_{bi} = Q_i S_{bi} \quad \left[\frac{mgDQO}{día} \right] \quad (22)$$

- Orgánica suspendida no biológicos

$$FX_{ivi} = Q_i S_{ii} \quad \left[\frac{mgSSV}{día} \right] \quad (23)$$

- Sólidos suspendidos inorgánicos

$$FXI_{ioi} = Q_i S_{ioi} \left[\frac{mgSSI}{día} \right] \quad (24)$$

- Materia orgánica biodegradable

$$FS_{bi} = Q_i S_{ti} (1 - f_{s'us} - f_{s'up}) \left[\frac{mgDQO}{día} \right] \quad (25)$$

$$FS_{bi} = FS_{ti} (1 - f_{s'us} - f_{s'up}) \left[\frac{mgDQO}{día} \right] \quad (26)$$

- Materia orgánica suspendida no biodegradable

$$FXI_{ivi} = \frac{Q_i S_{s'up} S_{ti}}{f_{cv}} \left[\frac{mgSSVI}{día} \right] \quad (27)$$

$$FXI_{ivi} = \frac{FS_{ti} FS_{s'up}}{f_{cv}} \left[\frac{mgSSVI}{día} \right] \quad (28)$$

- Para el sistema:

Masa de SSV en el reactor:

- Masa de SSV de OHOs

$$MX_{BHv} = X_{BHv} V_p \quad [mgSSV] \quad (29)$$

- Residuo endógeno

$$MX_{EHv} = X_{EHv} V_p \quad [mgSSV] \quad (30)$$

- Material orgánico no biodegradable

$$MX_{iv} = X_{iv} V_p \quad [mgSSV] \quad (31)$$

- Sólidos Suspendidos Volátiles

$$MX_v = X_v V_p \quad [mgSSV] \quad (32)$$

Balance de masa de DQO (Balance de electrones) (López Vázquez, Buitrón Méndez, García, & Cervantes Carrillo, 2017)

Los electrones (e^-) de la DQO de la materia orgánica en el efluente son:

- Retenidos en la materia orgánica particulada y soluble no biodegradable.
- Transformada en OHOs y conservando en otro tipo de materia
- Transferidos al O_2 para formar agua.
- S_{te} : Concentración total de DQO soluble en efluente [mgDQO/L]
- X_v : Concentración SSV reactor biológico [mgSSV/L]
- O_c : Tasa de utilización de Oxígeno carbonáceo (degradación de la materia orgánica) en el reactor [mg O_2 /L-hr]

Balance:

$$\left[\begin{array}{c} (e^-) \text{Flujo de} \\ \text{DQO en la salida} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} (e^-) \text{Flujo de} \\ \text{DQO en la entrada} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \text{Flujo de DQO soluble} \\ \text{en el efluente} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Flujo de DQO soluble} \\ \text{en la purga de lodos} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Flujo de DQO particulado} \\ \text{en la purga de lodos} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Flujo de } O_2 \text{ utilizado por} \\ \text{OHO para la degradación de DQO} \end{array} \right] \quad (33)$$

$$Q_e S_{te} + Q_w S_{te} + Q_w X_v f_{cv} + V_p O_c = Q_i S_{ti} \quad (34)$$

Producción diaria de lodos.

La masa de lodos como SST producidos diariamente FX_T está dada por la ecuación 35:

$$FX_T = \frac{MX_T}{TRS} \quad (35)$$

En donde:

- MX_T : Masa de lodos en el sistema [mgSST/día]
- TRS : Edad de lodos [días]

Los lodos producidos por día por mg de DQO en el reactor se representan con la ecuación 36:

$$\frac{FX_T}{FS_{ti}} = \frac{1}{f_i} \left[\frac{(1 - f_{s'us} - f_{s'up}) Y_{HV}}{(1 + b_H TRS)} (1 + f_H b_H TRS) + \frac{f_{s'up}}{f_{cv}} \right] \left[\frac{mgSST}{mgDQO} \right] \quad (36)$$

La masa de lodos disminuye a medida que la edad de los lodos aumenta.

La masa de sólidos suspendidos inorgánicos en el afluente se acumula en el reactor de la misma forma que la materia orgánica particulada no biodegradable.

Concentración de SSI afluente.

$$MX_{io} = FX_{ioi} * TRS * X_{io} \left[\frac{mgSSI}{L} \right] \quad (37)$$

Masa total de sólidos sedimentables (SST)(MX_T) es la suma de sólidos suspendidos orgánicos (volátiles e inorgánicos).

$$MX_T = MX_V + MX_{io} \quad [mgSST] \quad (38)$$

La relación SSV/SST de los lodos (f_i).

$$f_i = \frac{MX_V}{MX_T} \left[\frac{mgSSV}{mgSST} \right] \quad (39)$$

Si no conocemos la concentración de SSI entonces podemos calcular MX_T estimando la relación de SSV/SST (f_i).

$$MX_T = \frac{MX_V}{f_i} \quad [mgSST] \quad f_i: \text{Relación de SSV/SST} \quad (40)$$

En la Ilustración 18 se muestra el diagrama del filtro de lodos.

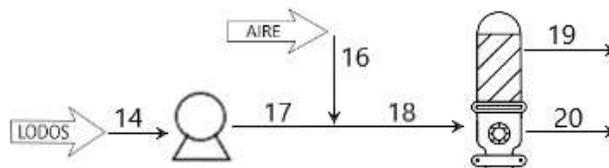


Ilustración 18. Corrientes de lodos 14 - 20.

OPERACIONES:

La Tabla 21 muestra los valores considerados para el cálculo de SSV.

Tabla 21 Valores considerados para el cálculo de SSV.

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Caudal	Q	L/día	40320
DQO afluente	Sti	mgDQO/L	400
Fracción no bio. y particulada DQO	Fs'up		0.15
Fracción no bio. y soluble DQO	Fs'us		0.07
SSV/SST del lodo	f _i	mgSSV/mgSST	0.75
DQO/SSV	F _{cv}	mgDQO/mgSSV	1.48
Rendimiento	YH _v	mgSSV/mgDQO	0.45

Tiempo de retención sólidos	TRS	días	20
Tasa de respiración endógena	bh	1/día	0.24
Fracción de residuo endógeno	fh		0.20

	Valores estándar a 20°C
	Valores característicos del agua a tratar.

Utilizando la ecuación (21) para calcular la materia orgánica total:

$$FS_{ti} = \left(40320 \frac{L}{día}\right) \left(400 \frac{mgDQO}{L}\right) = 1.61 \times 10^7 \frac{mgDQO}{día}$$

Utilizando la ecuación (26) para calcular la materia orgánica biodegradable:

$$FS_{biP} = \left(1.61 \times 10^7 \frac{mgDQO}{día}\right) (1 - 0.07 - 0.15) = 1.26 \times 10^7 \frac{mgDQO}{día}$$

Utilizando la ecuación (28) para calcular la materia orgánica suspendida no biodegradable:

$$FXI_{ivi} = \frac{\left(1.61 \times 10^7 \frac{mgDQO}{día}\right) (0.15)}{\left(1.48 \frac{mgDQO}{mgSSV}\right)} = 1.63 \times 10^6 \left(\frac{mgSSV}{día}\right)$$

Para la estimación de los sólidos suspendidos volátiles de la ecuación (36) despejamos FX_T :

$$FX_T = \left(\frac{1}{0.75 \frac{mgSSV}{mgSST}} \left[\frac{(1 - 0.07 - 0.15) \left(0.45 \frac{mgSSV}{mgDQO}\right)}{\left(1 + \left(0.24 \frac{1}{día}\right) (20 \text{ días})\right)} \left(1 + (0.2) \left(0.24 \frac{1}{día}\right) (20 \text{ días})\right) + \frac{0.15}{1.48 \frac{mgDQO}{mgSSV}} \right] \right) \left(1.61 \times 10^7 \frac{mgDQO}{día}\right)$$

$$FX_T = 4.73 \times 10^6 \frac{mgSST}{día}$$

Posteriormente, considerando las ecuaciones anteriores. Sustituimos para despejar MX_v .

$$MX_v = \left(0.75 \frac{mgSSV}{mgSST}\right) \left(4.73 \times 10^6 \frac{mgSST}{día}\right) (20 \text{ días}) = 7.09 \times 10^7 \text{ mgSS}$$

Utilizando la ecuación (39) para calcular la masa total de sólidos sedimentables.

$$MX_v = \left(0.75 \frac{mgSSV}{mgSST}\right) \left(4.73 \times 10^6 \frac{mgSST}{día}\right) (20 \text{ días}) = 7.09 \times 10^7 \text{ mgSSV}$$

Para estimar los lodos producidos por día por mg de DQO en el reactor, utilizamos la ecuación (36).

$$\begin{aligned} \frac{FX_t}{F_{sti}} &= \frac{1}{0.75 \frac{mgSSV}{mgSST}} \left[\frac{(1 - 0.07 - 0.15) \left(0.45 \frac{mgSSV}{mgDQO}\right)}{\left(1 + \left(0.24 \frac{1}{día}\right) (20 \text{ días})\right)} \left(1 + (0.2) \left(0.24 \frac{1}{día}\right) (20 \text{ días})\right) + \frac{0.15}{1.48 \frac{mgDQO}{mgSSV}} \right] \\ &= 0.26 \frac{mgSST}{mgDQO} \end{aligned}$$

Para la producción diaria de lodos utilizamos la ecuación (35).

$$FX_t = \frac{9.46 \times 10^7 \text{ mgSST}}{20 \text{ días}} = 4.73 \times 10^6 \frac{mgSST}{día}$$

Finalmente, para la masa de SSV producidos/purgados por día, utilizamos la siguiente ecuación:

$$FX_v = f_i FX_t \left[\frac{mgSSV}{día} \right] \quad (41)$$

$$FX_v = \left(0.75 \frac{mgSSV}{mgSST}\right) \left(4.73 \times 10^6 \frac{mgSST}{día}\right) = 3.55 \times 10^6 \left[\frac{mgSSV}{día} \right]$$

Una vez conocida la cantidad de SST, para conocer el flujo de lodos por hora, es necesario calcular el porcentaje de agua en kg/h para sumar el flujo de lodo y de agua, para estos cálculos se utilizó un valor de densidad 1000 kg/m³, corresponde a la densidad del agua. De acuerdo con lo indicado en la tesis (Limón Macías, 2013), los lodos están compuestos por un 99.2% de agua.

Los kgSST/h los determinamos utilizando la relación FXt/Fsti, fórmula (41), el DQO afluente y el caudal. El resultado representará el 0.8% de la línea de lodos y con este

valor es posible calcular la cantidad de agua representante del otro 99.2% de la corriente.

$$\left(0.260 \frac{\frac{mgSST}{día}}{\frac{mgDQO}{día}}\right) \left(40320 \frac{L}{día}\right) \left(400 \frac{mgDQO}{L}\right) \left(\frac{1kgDQO}{1 \times 10^6 mgDQO}\right) \left(\frac{1día}{24hr}\right) = 0.175 \frac{kgSST}{h}$$

$$\frac{\left(0.175 \frac{kgSST}{h}\right) (0.992)}{0.008} = 21.67 \frac{kgH_2O}{h}$$

Finalmente, para conocer el flujo en L/h de la corriente multiplicamos los kgH₂O/h y los kgSST/h por sus respectivas densidades y realizamos el cambio de unidades para pasar los m³ a L:

$$\left[\left(0.175 \frac{kgSST}{h}\right) \left(600 \frac{kgSST}{m^3}\right)^{-1} + \left(21.67 \frac{kgH_2O}{h}\right) \left(1000 \frac{kgH_2O}{m^3}\right)^{-1}\right] \left[\frac{1000 L}{1 m^3}\right] = 21.92 \frac{L}{h}$$

La corriente 14 y 17 son iguales porque sólo pasan por la bomba (B-003) y a partir de allí, el flujo se dirige a la corriente 18 en donde el lodo pasa por un filtro de malla (F-001). De esta forma la corriente se divide en 2; una parte con los lodos deshidratados al 40% (corriente 17) y la otra con el 60% del agua recuperada (corriente 16) por lo que el agua filtrada continúa hacia la corriente 20 y el lodo se mantiene en 19, el balance se muestra en la ecuación 42.

$$F_{14} = F_{17} = F_{18} = F_{19} + F_{20} \quad (42)$$

Para el cálculo del flujo en las corrientes de sólidos, se utilizó una densidad de 600 kg/m³ correspondiente a lodos secos de acuerdo con lo reportado por el Gobierno de España en un estudio realizado en sus Estaciones de Depuración de Aguas Residuales (España, 2020).

Así mismo, para garantizar que no queden residuos de lodo en la línea de tuberías una corriente de aire comprimido se hará pasar por las corrientes al finalizar cada ciclo de filtrado (Corrientes 15 y 16).

En la Tabla 22 se muestra el balance de materia de las corrientes de lodos.

Tabla 22. Corriente de lodos 14 a la 20.

PORCENTAJE DE REMOCIÓN						60%
NO. CORRIENTE		14	17	18	19	20
DESCRIPCIÓN		INFLUENTE BOMBA B-003	LÍNEA DE PURGA	INFLUENTE FILTRO F-001	EFLUENTE SÓLIDO F-001	EFLUENTE LÍQUIDO F-001
Fase		LÍQUIDO	LÍQUIDO	LÍQUIDO	SÓLIDO	LÍQUIDO
Caudal	L/h	21.91	21.91	21.91	8.94E-03	21.91
Densidad	kg/m ³	1000	1000	1000	600	1000
pH	U.P.					
Coliformes Totales	UFC/100 mL	1.00E+05	1.00E+05	1.00E+05	1.00E+05	1.00E+05
DQO	mg/L	-	-	-	-	-
NH ₄	mg/L	-	-	-	-	-
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	-	-	-	-	-
Lodos de purga	mg/L	103.80	103.80	103.80	103.80	-
NaClO	mg/L					

5.1.4 CORRIENTES DE AIRE:

En la Ilustración 19 se muestra el diagrama del soplador y el RBT equipo paquete.

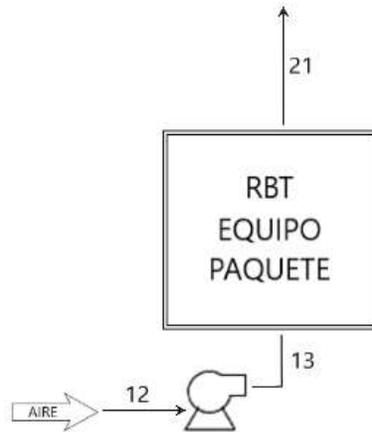


Ilustración 19. Corrientes del soplador 12, 13, 21.

Las corrientes de aire del soplador 12, 13 y 21 son necesarias para mantener oxigenado el interior del RBT, algo esencial considerando que el sistema es aerobio.

I. Factores que afectan a la transferencia de oxígeno.

- Temperatura:

- a. Saturación de Oxígeno:

C_{∞}^* : Es una función de la concentración de oxígeno en la fase gas respecto a la constante de Henry.

$$C_{\infty}^* = \frac{C_G}{H} \quad (43)$$

Para sistemas abiertos, tanto superficial como difuso, la presión de vapor (P_v) se asume como saturada a la temperatura del líquido, con la temperatura del gas no teniendo efecto en P_v o C_G .

La constante de Henry incrementa con el aumento de la temperatura y las concentraciones de sólidos disueltos, provocando una reducción en el valor de saturación de oxígeno. Al especificar el rendimiento del soplador, se utiliza un valor de

C_{s20}^* de 9.09 mg/L a condiciones estándar, sin embargo, si se necesita el valor en una temperatura diferente, existe un factor de corrección:

$$\tau = \frac{C_{st}^*}{C_{s20}^*} \quad (44)$$

b. Coeficientes de transferencia de oxígeno:

Con el aumento de temperatura, el valor de los coeficientes, el efecto de la difusividad t , el coeficiente de película líquida también incrementan su valor. Es por lo que se introduce un factor de corrección θ , sin embargo, como éste es dimensionalmente no homogéneo y requiere una temperatura en ($^{\circ}\text{C}$), se introduce el factor κ .

$$K_L \alpha_t = K_L \alpha_{20} e^{\kappa(t-20)} \quad (45)$$

$$\kappa = \ln \theta \quad (46)$$

De esta forma, Müller señala que, para mezcladores estáticos y difusores de domo con un flujo de gas bajo el valor de $\theta=1.028$.

- Aguas residuales:

c. Saturación de Oxígeno:

Los sólidos totales disueltos (STD) repercuten en el valor de la saturación de oxígeno en el agua, es por esto por lo que, con el objetivo de tomar en cuenta el efecto de los componentes del agua residual, se introduce el factor β , el cual indica la proporción entre la saturación en el agua residual respecto a la del agua del grifo.

$$\beta = 1 - 5.7 \times 10^{-6} (STD) \quad (47)$$

d. Coeficientes de transferencia de oxígeno:

La presencia de compuestos orgánicos disueltos afecta de forma significativa este coeficiente, reduciendo el coeficiente de la película líquida con un incremento en el área

de superficie, debido a la reducción de la tensión superficial. De esta forma α° , es definido para tomar en cuenta el efecto del agua residual.

$$\alpha^\circ = \frac{K_L \alpha_{\text{agua residual}}}{K_L \alpha_{\text{agua del grifo}}} \quad (48)$$

- Sumersión:

A condiciones estándar de temperatura y presión (20°C y 1atm), el efecto de la inmersión del difusor en la saturación del oxígeno ésta dado por:

$$\delta = \frac{C_{\infty 20}^*}{C_{S20}^*} = \frac{P_S + P_{de} - P_V}{P_S - P_V} \quad (49)$$

En donde P_S es la Presión barométrica estándar, con un valor de 101.325 kPa.

Desde que δ es un valor medido, la presión efectiva (P_{de}) puede definirse como:

$$P_{de} = (\delta - 1)(P_S - P_V) = \gamma_w d_e \quad (50)$$

En donde (γ_w) es el peso específico del agua en N/m³, mientras que (d_e) representa la profundidad efectiva, típicamente dada como la fracción de la profundidad de sumersión (d). Las ecuaciones 51 y 52 correspondientes a sopladores de chorro y poro fino:

$$d_e = 0.4d \quad (51)$$

$$\delta = 1.00 + 0.03858d \quad (52)$$

- Presión barométrica:

El impacto de la presión barométrica sobre la saturación está dado por el factor Ω .

$$\Omega = \frac{C_{pb}^*}{C_{\infty p_S}^*} = \frac{P_b + P_{de} - P_V}{P_S + P_{de} - P_V} \approx \frac{P_b}{P_S} \quad (53)$$

En donde (P_b) es la presión barométrica en kPa. De igual forma. Como P_b disminuye con la altura, podemos utilizar esta relación.

$$P_b = P_{b0} \left[1 - \frac{\text{altura en m}}{9100} \right] \quad (54)$$

- Concentración de oxígeno disuelto en el líquido:

Para que la nitrificación proceda a tasas óptimas, se requieren valores de oxígeno disuelto (OD) mayores a 2.5 mg/L. Stenstrom y Sang, indicaron que la concentración de OD para la nitrificación varía de 0.5 – 2.5 mg/L, dependiendo de los parámetros operativos y la resistencia al transporte de masa. Para permitir la variación en la demanda de oxígeno debido a cargas cambiantes, a menudo se usa un valor de $C_L=2$ mg/L.

II. Ecuaciones de diseño.

La ecuación básica para el cálculo de la transferencia de oxígeno es la siguiente:

$$\frac{dC_L}{dt} = K_L \alpha (C_\infty^* - C_L) \quad (55)$$

En donde:

$K_L \alpha$: Es el coeficiente de transferencia de oxígeno. El primer término se refiere al coeficiente en la película líquida, mientras que el segundo se refiere al área interfacial expuesta a la transferencia en un volumen líquido dado.

C_∞^* : Es la concentración de saturación de oxígeno en el equilibrio.

- Tasa de transferencia de oxígeno estándar (SOTR)

Es la masa de oxígeno transferida por unidad de tiempo dentro de un volumen de agua dado y reportado a condiciones estándar (Capacidad de oxigenación), ecuación 56:

$$SOTR = K_L \alpha_{20} C_\infty^* V \quad (56)$$

- Capacidad específica de oxigenación (oc).

Es utilizado en la literatura europea para designar la tasa de cambio de la concentración de oxígeno en un tanque de aereación.

$$oc = K_L \alpha_{20} C_{\infty 20}^* = \frac{SOTR}{V} = SOTR_V \quad (57)$$

- Eficiencia de aireación estándar (SAE).

Es la tasa de transferencia de oxígeno por unidad de entrada de energía, la cual puede basarse en la alimentación suministrada (DP) o cableada (AP).

$$SAE = \frac{SOTR}{DP} \quad (58)$$

$$SAE = \frac{SOTR}{WP} \quad (59)$$

La eficiencia total (e) del equipo de aireación es el producto de las eficiencias individuales de los equipos mecánicos. La eficiencia típica para sopladores nuevos es del 80%. Este valor es utilizado para relacionar la potencia consumida con la que se entrega el aire para aireación difusa o al líquido para aireación mecánica.

$$WP = \frac{DP}{e} \quad (60)$$

$$DP = AP = \frac{wRT_a}{K} \left[\left(\frac{P_d}{P_a} \right)^K - 1 \right] \quad (61)$$

El valor de K es de 0.283 para el aire en Estados Unidos. Debido a que el caudal másico de aire (w) está relacionado con la densidad del aire y el caudal volumétrico, al utilizar la constante de los gases ideales (R) en condiciones estándar, podemos obtener la siguiente ecuación:

$$AP = 0.1G_s \left[\left(\frac{P_d}{P_a} \right)^K - 1 \right] \quad (62)$$

(Pd) es la presión absoluta de salida del soplador en kPa, incluye la profundidad del agua en la inmersión del difusor, así como todas las pérdidas en la tubería de aire y del sistema de difusores.

$$P_d = P_s + \gamma_w d + \Delta P_d \quad (63)$$

Mientras tanto, la presión absoluta de entrada al soplador (P_a) en kPa, es un poco menor a la atmosférica debido a pérdidas en el sistema de filtrado de aire y la entrada a la tubería.

$$P_a = P_s + \gamma_w d + \Delta P_d \quad (64)$$

- Eficiencia estándar de transferencia de Oxígeno (SOTE).

Es la fracción de oxígeno suministrada al tanque de aireación, que en realidad es transferida o disuelta en el líquido a condiciones estándar. Es un parámetro de diseño importante en los sistemas de aireación difusa.

- Condiciones de proceso.

Bajo condiciones de proceso la tasa de transferencia de oxígeno debe satisfacer la demanda de biomasa en el tanque de aireación. Podemos obtener la tasa de transferencia de oxígeno en condiciones de proceso (OTR_f):

$$OTR_f = K_L \alpha_f (C_{\infty f}^* - C_L) V \quad (65)$$

Si dividimos la ecuación (65) entre la ecuación (56) obtendremos la relación entre lo real y la tasa de transferencia de oxígeno estándar.

$$\frac{OTR_f}{SOTR} = \frac{K_L \alpha_f (C_{\infty f}^* - C_L)}{K_L \alpha_{20} C_{\infty 20}^*} \quad (66)$$

III. Cálculos.

Para obtener el valor de ΔP_d se utilizó la gráfica de operación del difusor FLEXAIR T-SERIES (ANEXO B) que se muestran en las Tablas 23 y 24.

Tabla 23. Datos del soplador.

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
C^*_{st}	mg/L	7.1
SDT	mg/L	12000
$altura$	m	2.400
γ_w	N/m ³	9.810
d	m	2.400
PV	kPa	4.240
V	m ³	1.000
P_d	kPa	123.262
P_a	kPa	100.635
PS	kPa	101.325
C^*_{s20}	mg/L	9.090

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
P_{bo}	kPa	101.325
$K_{L\alpha_F}$	1/h	8.000
$W_{agualimpia}$	kg/h	25.200
K		0.283
e		0.800
Columna de agua	cm H ₂ O	200.000
V	kPa	19.613
ΔP_a	kPa	0.690
θ		1.028
T	°C	25

*Los datos con fondo morado, fueron tomados de un ejemplo de cálculo en el libro (Mueller, Boyle, & Pöpel, 2002). Las condiciones de este ejemplo asumían un agua residual industrial.

Tabla 24. Resultados soplador.

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
τ	0.781	---
β	0.932	---
P_b	101.298	kPa
de	0.960	m
δ	1.093	---
P_{de}	9.418	NkPa/m ³
Ω	0.9997	---
$C^*_{\infty 20}$	9.932	mg/L
$C^*_{\infty f}$	7.225	mg/L
α°	0.450	

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
CL	2.000	mg/L
$\rho_s (20^\circ\text{C})$	1.204	kg/m ³
G_s	20.930	m ³ /h
$DP=AP$	0.124	kW
WP	0.155	kW
WP	0.207	HP
$SOTR$	0.079	kg/h
$OTRf/SOTR$	0.169	
$OTRf$	0.013	kg/h
$SOTE$	0.013	kg/m ³

Por otra parte, las corrientes 15 y 16 que se muestran en el diagrama de la ilustración 20, ayudan a limpiar la línea de lodos una vez que la purga de estos finaliza, evitando así, la aglomeración. En la tabla 26 se muestra el balance de materia de las corrientes del compresor

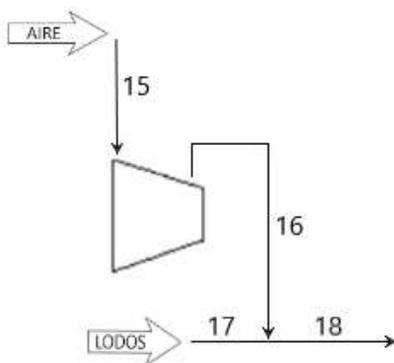


Ilustración 20. Corrientes del compresor 15, 16, 17, 18.

Tabla 25. Corrientes de aire 12, 13, 15, 16 y 21.

NO. CORRIENTE		12	13	15	16	21
DESCRIPCIÓN		INFLUENTE SOPLADOR S-001	INFLUENTE AIRE RBT	INFLUENTE COMPRESOR C-001	INFLUENTE AIRE A LÍNEA DE LODOS	EFLUENTE AIRE DE RBT
Fase		GAS	GAS	GAS	GAS	GAS
Caudal	L/h	21000	21000	16.72	16.72	21000
Densidad	kg/m ³	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
pH		U.P.				
Coliformes Totales	UFC/100 mL	-	-	-	-	-
DQO	mg/L	-	-	-	-	-
NH ₄	mg/L	-	-	-	-	-
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	-	-	-	-	-
Lodos de purga	mg/L	-	-	-	-	-
NaClO	mg/L					

CONCLUSIONES

En conclusión, el presente proyecto ha logrado alcanzar los objetivos establecidos para el diseño y construcción de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en San Lorenzo Xochimilco, utilizando la tecnología del Reactor Biológico Tubular. A continuación, se resumen las principales conclusiones obtenidas:

1. Se ha realizado una exhaustiva recopilación de información mediante la consulta de informes técnicos, bibliografía especializada y fuentes hemerográficas, lo que ha permitido identificar de manera precisa la problemática relacionada con las descargas de aguas residuales en los canales de Xochimilco. Este paso inicial ha proporcionado una línea base sólida para el desarrollo del proyecto.
2. A través del diseño conceptual en un diagrama de bloques del proceso, se ha planteado un tren de tratamiento basado en la tecnología del Reactor Biológico Tubular. Este enfoque se ha seleccionado debido a su eficiencia en la remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales, garantizando el cumplimiento de la normativa ambiental establecida por la NOM-003-SEMARNAT-1997.
3. Mediante el uso de herramientas como AutoCAD, se ha elaborado el Diseño de Flujo de Proceso (DFP), el Diagrama de Tuberías e Instrumentación (DTI) y el LayOut correspondientes a la PTAR propuesta. Estos documentos son fundamentales para establecer la disposición y ubicación de los equipos principales del sistema de tratamiento, asegurando una operación eficiente y cumpliendo con los requisitos normativos.
4. Se han realizado cálculos detallados de los equipos de proceso que conforman el tren de tratamiento, utilizando bibliografía especializada. Estos cálculos han permitido determinar el balance de materia del proceso y asegurar la correcta selección y dimensionamiento de los equipos necesarios para alcanzar los objetivos de tratamiento establecidos.

En resumen, el diseño y balance de materia de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales propuesta, basada en la tecnología del Reactor Biológico Tubular,

demuestra ser una solución eficaz para abordar la problemática de las descargas de aguas residuales en los canales de Xochimilco. Este proyecto contribuye significativamente a la protección del medio ambiente y a la preservación de este importante ecosistema. Se recomienda seguir adelante con la implementación y puesta en marcha de la PTAR, teniendo en cuenta las consideraciones prácticas y los aspectos financieros necesarios para su éxito a largo plazo.

Bibliografía

- Agencia Andaluza de Voluntariado. (2002). *Manual de proyectos*. España: Junta de Andalucía.
- Amezquita Quiñonez, C. T. (2005). *Chinampas y chinamperos: los horticultores de San Juan Tezompa*. México: Universidad Iberoamericana.
- AZUD. (2020). *AZUD LUXON LCZ. 18/02/2020* . Obtenido de De AZUD: <https://azud.com/producto/riego/filtros/equipos-automaticos-de-malla-riego/azud-luxon-lca-para-riego/>
- Bojórquez Castro, L. (2017). *Contaminación química y biológica en la zona lacustre de Xochimilco*. Ciudad de Mexico: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Castro, L. B. (2017). *Contaminación Química y Biológica en la Zona Lacustre de Xochimilco*. México: UAM.
- Cheremisinoff, N. P. (2018). *Handbook of water and wastewater treatment technology*. New York: Routledge.
- CONAGUA. (2019). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado*. México.
- CONAGUA. (2019). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Desinfección para Sistemas de Agua Potable y Saneamiento*. México.
- García González, S. A. (2019). Estudio de un reactor biológico de biopelícula fija a escala laboratorio con el uso de materiales no tejidos para la fijación de la biomasa.
- Instituto Mexicano del Petróleo . (04 de Diciembre de 2019). *Gobierno de México*. Obtenido de Ingeniería Conceptual : <https://www.gob.mx/imp/articulos/ingenieria-conceptual>
- López López, J. L. (2021). *Simulación y Modelación De Un Reactor Biológico Tubular Para El Tratamiento De Aguas Residuales Mediante La Estimación De Parámetros En AQUASIM*. México.
- López Vázquez, C. M., Buitrón Méndez, G., García, H. A., & Cervantes Carrillo, F. (2017). *Tratamiento biológico de aguas residuales: Principios, modelación y diseño*. USA: IWA Publishing.
- Lozano Rivas , W. (2012). *Fundamentos de diseño de plantas depuradoras de aguas residuales* . Colombia: Universidad Piloto de Colombia.

- Luis Zambrano, V. C.-H.-A. (2009). Spatial Heterogeneity of Water Quality in a Highly Degraded Tropical Freshwater Ecosystem. *Environmental Management* , 43: 249-463.
- Macias, J. (2013). *Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿Problema o recurso?* México: Academia de Ingeniería México.
- Metcalf & Eddy. (1995). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. España: McGraw-Hill.
- Morote, A. M. (Febrero de 2013). *OCW UPCT*. Obtenido de Tema 4. Ingeniería de Detalle: <https://ocw.bib.upct.es/course/view.php?id=140&topic=3>
- Morote, A. M. (Febrero de 2013). *Proyectos de Ingeniería*. Obtenido de OCW UPCT: <https://ocw.bib.upct.es/course/view.php?id=140&topic=3>
- Nandini, S., Ramirez García, P., & Sarma , S. (2016). Water quality in Lake Xochimilco, Mexico: zooplankton indicators and *Vibrio cholerae*. *Journal of Limnology*, 91-100.
- Nemer E. Narchi, B. C. (2016). Percepciones de la degradación ambiental entre vecinos y chinamperos de Lago de Xochimilco, México. *Sociedad y Ambiente*, 5-29.
- NOM-003-SEMARNAT-1997. (s.f.). *NOM-003-SEMARNAT-1997. QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES*. Obtenido de Normas Oficiales Mexicanas: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAA-15-13.pdf>
- Quiroz Flores, A., Miranda Arce, M. G., & Lot Helgueras, A. (2008). Estudio comparativo de algunas variables fisicoquímicas del agua en canales secundarios de Xochimilco con y sin *Eichhornia crassipes* (Martius) Solms-Laubach. *Polibotánica*, 127-133.
- SACMEX . (2018). *Diagnóstico, logros y desafíos* . Ciudad de México: RAF.
- Salles, V. (1992). Xochimilco: perdurabilidad de la tradición en un contexto de cambio. *Estudios Sociológicos* , 341-362.
- Saputeli, L. (2013). Front-End-Loading (FEL) Process Supporting Optimum Field Development Decesion Making. *SPE International*, 1-12.
- Tchobanoglous, G. (2013). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. McGraw-Hill Education.

- UNAM. (2014). *Análisis del estado de conservación ecológica del sistema lacustre chinampero de la superficie reconocida por la UNESCO como Sitio Patrimonio de la Humanidad en Xochimilco, Tláhuac y Milpa Alta*. México.
- UNAM. (2017). *Análisis del estado de conservación ecológica del sistema lacustre chinampero de la superficie reconocida por la UNESCO como Sitio Patrimonio de la Humanidad en Xochimilco, Tláhuac y Milpa Alta*. CDMX: UNAM.
- UNAM. (02 de mayo de 2017). *Reciben canales de Xochimilco descargas de aguas negras*. Obtenido de IIUNAM: <http://www2.iingen.unam.mx/es-mx/difusion/Lists/EIIIUNAMEnPrensa/DispForm.aspx?ID=491#:~:text=En%2016%20kil%C3%B3metros%20de%20canales,Serrano%2C%20Guillermina%20P%C3%A9rez%20Casimiro%20y>
- United States Environmental Protection Agency. (8 de Febrero de 2020). *Wastewater Treatment Technologies*. Obtenido de Learn about Small Wastewater Systems: <https://www.epa.gov/small-and-rural-wastewater-systems/learn-about-small-wastewater-systems>
- Water Environment Federation. (2011). *Biofilm reactors, WEF Manual of Practice No. 35*. New York: McGraw-Hill.

ANEXO 1

Elaboración de un anteproyecto técnico de la instalación de una pequeña planta de tratamiento de aguas residuales utilizando la tecnología RBT, en los canales de Xochimilco

Sergio Adrián García González ^{1*}, Grecia Carolina Ramón-Montejo ¹ y Alfonso Durán-Moreno ¹

^{1*} Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), laboratorio 301 edificio "E", Ciudad universitaria, Cp.04510, México, Ciudad de México, Tel.: 015556225293 – Fax: 015556225303, e-mail: cheko29@hotmail.com *.

Desarrollo sustentable (Desarrollo de procesos sustentables), Ponencia Presencial

Recibido: Aceptado: Publicado:

Resumen: En este trabajo se plantea el uso de un sistema denominado Reactor Biológico Tubular (RBT), para tratar descargas de aguas residuales que contaminan los canales de Xochimilco el enfoque principal es tratar las descargas de aguas residuales antes de que desemboquen en los canales, para esto se propone utilizar sistemas de tratamiento de aguas residuales a pequeña escala denominados Small Waste Water system el RBT es un sistema novedoso que podría encajar en esta modalidad, se hace uso de la metodología FEL para generar el anteproyecto técnico de la implementación de esta tecnología y verificar si técnicamente es posible el uso de este sistema, esto permitió desarrollar una herramienta que permitirá establecer esta tecnología en diferentes zonas de los canales de Xochimilco.

Palabras clave: pequeña planta de tratamiento de agua residual; FEL aplicado a tratamiento de aguas residuales; reactor biológico tubular.

Preparation of a technical blueprint for the installation of a small wastewater treatment plant using RBT technology, in the Xochimilco canals

Abstract: In this article the use of a system called Tubular Biological Reactor (RBT) is proposed, to treat wastewater discharges that contaminate the channels of Xochimilco. The main focus is to treat wastewater discharges before they end up in the Canals. For this reason it is proposed to use small-scale wastewater treatment systems called Small Waste Water system. The RBT is a novel system that could fit into this modality. It makes use of the methodology Front-End - Loading FEL to generate the technical preliminary draft of the implementation of this technology and verify if it is technically possible to use this system. This allowed the development of a tool that will allow the establishment of this technology in different areas of the Xochimilco canals.

Keywords: small wastewater treatment plant; FEL applied to wastewater treatment; tubular biological reactor.

Introducción

Xochimilco es una zona medio rural donde la mayoría de sus asentamientos se catalogan como irregulares por lo cual no cuentan con drenaje proporcionado por la delegación, la posibilidad de instalar red de saneamiento es casi nula, ya que sería muy costosa y de difícil acceso debido a los predios ya habitados. (Castro, 2017)

En el 2016 se llevó a cabo un Censo de descargas de aguas negras y grises en los canales de Xochimilco coordinado por la UNAM II donde se reportó que, en 116 kilómetros de canales, se detectó que en sus márgenes hay un total de 1374 descargas, de las cuales 603 son de aguas negras y 771 de grises pertenecientes a 917 predios. (IINGEN, 2017)

Bojórquez en el 2017 presentó un libro donde se menciona que la contaminación en los canales de Xochimilco presenta graves afectaciones en la calidad del agua, se han detectado concentraciones de 201-199 mg/l DQO y hasta 2000 NMP/100mL estos valores se encuentran fuera de norma.

La contaminación se ve mayormente afectada en la zona lacustre de los canales, también, se han muestreado diversas zonas de los canales encontrando en el ecosistema presencia de hidrocarburos, plásticos, pesticidas, detergentes, derivados del azufre, nitritos y NOx, fosfatos y metales pesados ocasionados por las múltiples descargas a los canales. (Castro, 2017)

Una posible solución a la problemática detectada en Los canales de Xochimilco; es tratar las descargas de aguas residuales antes de que desemboquen en los canales para esto se propone utilizar sistemas de tratamiento de aguas residuales a pequeña escala denominados Small Waste Water system SWWS por sus siglas en inglés.

Según la EPA (United States Environmental Protection Agency) se considera que un sistema de aguas residuales es pequeño si atiende a una comunidad con una población de 10,000 o menos y un flujo diario promedio de aguas residuales de menos de 3786 m³. (EPA, 2021)

Para lograr y mantener sistemas sostenibles de tratamiento de aguas residuales en comunidades pequeñas se enfrentan diversos desafíos que incluyen limitaciones económicas/financieras, incapacidad para atraer y mantener operadores de sistemas, topografía y condiciones climáticas extremas y lejanía.

La tecnología principal de este proyecto es el Reactor Biológico Tubular (RBT), este reactor 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. (García-González, Durán-Moreno, 2017).

Los anteproyectos de ingeniería sirven para identificar posibles desventajas y desafíos permitiendo visualizar las problemáticas asociadas a la instalación de la tecnología, existen varias herramientas metodológicas para este fin una de las más importantes es la metodología

Front-End-Loading (FEL por sus siglas en inglés) (Saputeli 2013) la cual se utilizó en este trabajo.

El anteproyecto de instalación de la tecnología para el tratamiento de las descargas de aguas residuales de Xochimilco nos brinda una solución práctica y viable que apoyará los objetivos enmarcados en el punto 6. Agua y Saneamiento de la agenda de los Objetivos y metas del desarrollo sostenible, principalmente lograr el acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados y accesibles para todos, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación y reducir a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar. (ONU, 2021)

El objetivo de este trabajo es generar ante proyecto de ingeniería basado en la tecnología RBT mediante la metodología Front-End-Loading, FEL para el tratamiento de las descargas de aguas residuales que se vierten en los canales de Xochimilco y así generar un sistema generalizado que permita replicar este tipo de sistemas dentro de la zona de canales.

Materiales y Métodos

Para llevar a cabo la Ingeniería del proyecto se decidió utilizar la metodología FEL Front-End-Loading , esta metodología tiene como objetivo aumentar la eficacia e intentar minimizar los posibles riesgos y errores técnicos del proyecto.

Esta metodología se asevera en la revisión de entregables asegurando que cumplan con la calidad requerida y que la información proporcionada sea fidedigna, se encarga de controlar de una manera muy eficaz y estructurada el tiempo en que se realizan las actividades ya programadas y que los alcances y objetivos ya establecidos se cubran por completo.

La metodología FEL consiste en un sistema de “compuertas” imaginarias, donde para poder avanzar a la siguiente etapa del proyecto es necesario que todos los entregables sean aceptados y que todas las actividades propias de esa etapa estén concluidas con éxito.

En la Ingeniería del Proyecto se abarco las tres etapas fundamentales que son:

- Ingeniería conceptual
- Ingeniería básica
- Ingeniería de detalle

Cada una de estas etapas contienen entregables específicos y actividades que van dando cuerpo al proyecto.

La Ingeniería conceptual es la primera etapa, donde se realizó una investigación previa sobre la contaminación documentada en Xochimilco, tecnologías aplicadas, y parámetros que se tomaran en cuenta para el diseño del proceso.

En esta etapa de la ingeniería se fijaron objetivos, se estudiaron las tecnologías más eficaces para el proyecto, se define el marco normativo, los requerimientos del espacio y se establecieron las especificaciones técnicas conceptuales por lo cual se fija una línea base

Al concluir la etapa conceptual se inicia la Ingeniería básica, que tiene por objetivo definir las líneas básicas del proyecto, se seleccionó la solución más conveniente mientras se desarrolla y se va definiendo, entre los entregables de esta etapa se encuentran el LayOut (define como estará conformada la planta), DFP (Diagrama de flujo de proceso) y DTI (Diagrama de Tuberías e Instrumentación) los planos ya mencionados son de gran importancia ya que en conjunto conformaran la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

La Ingeniería de Detalle fue la fase en la que quedan definidos todos y cada uno de los subsistemas, componentes o partes que integran el proyecto, de tal manera que los documentos que se desarrollan han de ser suficientes para llevarlo a la práctica. (Morote, 2013).

Se consideró que el agua del efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales deberá cumplir con la NOM-003-SEMARNAT-1997 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público, para lograr esto el proceso elegido es un tren de tratamiento; que constará de tratamiento primario, tratamiento secundario (tratamiento biológico) y tratamiento terciario (etapa de desinfección).

El sistema de tratamiento principal (RBT) está conformado por 8 tubos de 6" de PVC cedula 80 lo que les 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 de la agua residual a tratar. El sistema contempla un sistema de pretratamiento y un sistema de desinfección.

Resultados y Discusión

Se tomaron como base 2 puntos de descarga de aguas residuales que provienen de las calles que conforman el Barrio de San Lorenzo en Xochimilco, estas dos tomas se eligieron por ser el conducto final de varias descargas. Para el diseño del tren de tratamiento se tomaron en cuenta valores comúnmente reportados para aguas residuales domesticas los valores se describen en la tabla 1 y se tomó como base un flujo total de 28 L/min. (que es el flujo que puede tratar el RBT por día).

Tabla 1. Parámetros iniciales tomados para realizar el diseño del tren de tratamiento

PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR
DQO	mg/L	400
SST	mg/L	500
N-NH ₄	mg/L	0.085

Densidad	kg/m ³	1000
----------	-------------------	------

Valores obtenidos de la literatura (Tchobanoglous 1991) "Tratamiento y depuración de las aguas residuales" 1991.

Dadas estas condiciones se planteó el siguiente tres de tratamiento que consiste en:

Tratamiento de agua.

1. Cárcamo de recolección con bomba sumergible de las corrientes a tratar
2. Hidrociclón
3. Criba estática
4. RBT
5. Desinfección

Tratamiento de lodos biológicos.

1. Filtrado a presión (filtros malla)

Como se muestra en el diagrama de bloques de la figura 1



Figura 1. Diagrama de bloques del proceso.

Descripción del proceso

Se estableció un flujo de 28 L/min de aguas residuales la cual llega a un pequeño tanque llamado tanque de recolección, donde una bomba sumergible la traslada al hidrociclón, la función de este equipo es separar las arenas para evitar daños a equipos electromecánicos, posteriormente el agua entra a la criba estática parabólica que separa sólidos mayores a 1 mm que descarga a un recipiente de donde es bombeada al reactor biológico tubular (RBT) que es la parte medular del tren de tratamiento esto es debido a que en este se realiza el tratamiento biológico principal reduciendo considerablemente la carga orgánica de agua cruda, así como el nitrógeno amoniacal, además, un modelo en Aquasim que es un software especializado en

simular este tipo de procesos (López-López 2021) ha demostrado ser una opción factible para aguas residuales domesticas a pequeña escala, aunado a esto hay pruebas experimentales que demuestran que el sistema biológico permite tratar aguas residuales de una manera eficiente y cumpliendo la Norma NOM-003-SEMARNAT-1997 (García y Durán, 2010). El agua tratada se dirige a la zona de desinfección donde se encuentran una lampara de luz UV, cloración y tecnología Electro-Fenton.

Para concluir la ingeniería básica se realizaron los diseños del Diagrama de Flujo del Proceso (DFP) (Figura 2) que incluye todos los equipos electromecánicos y de proceso, el Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI) que muestra la instrumentación requerida para cada equipo el cual se muestra e la Figura 3.

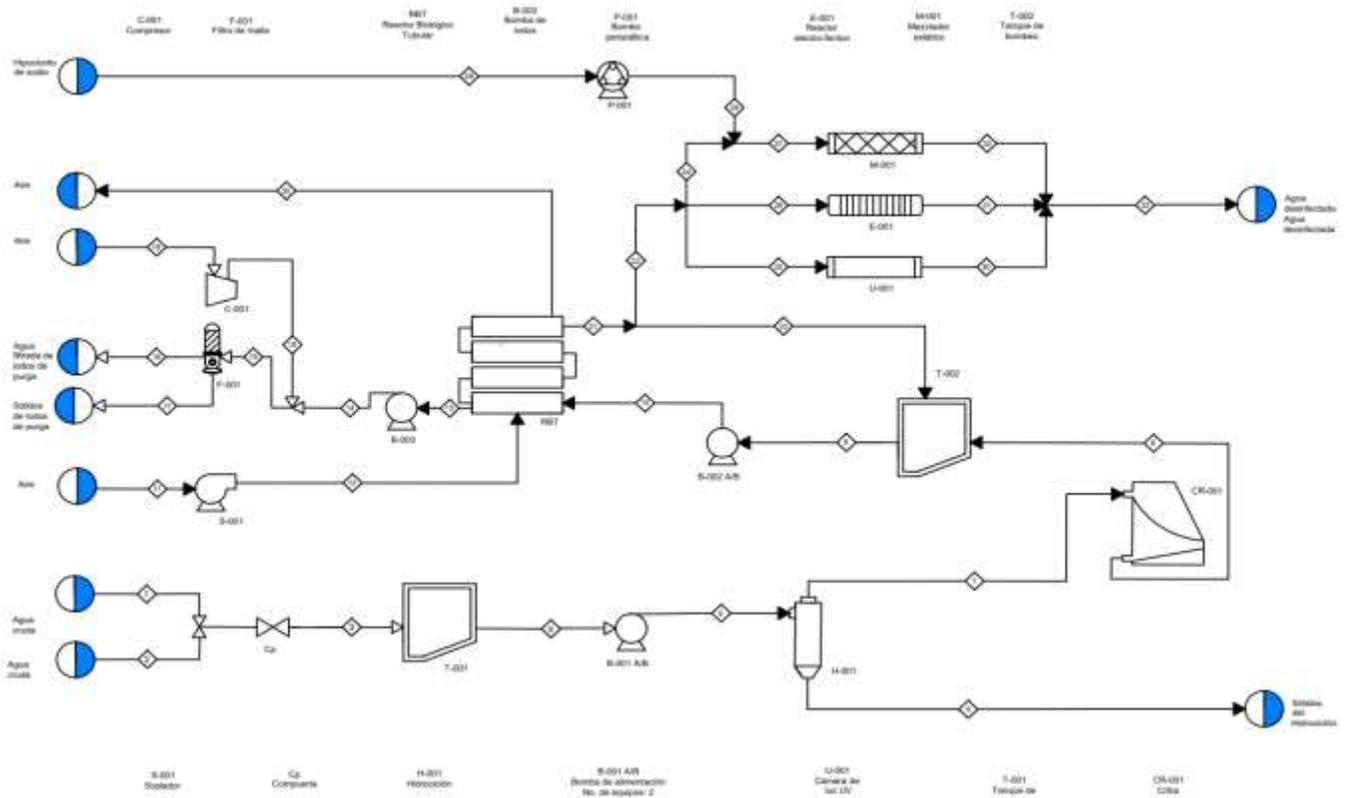


Figura 2. Diagrama de Flujo de Proceso

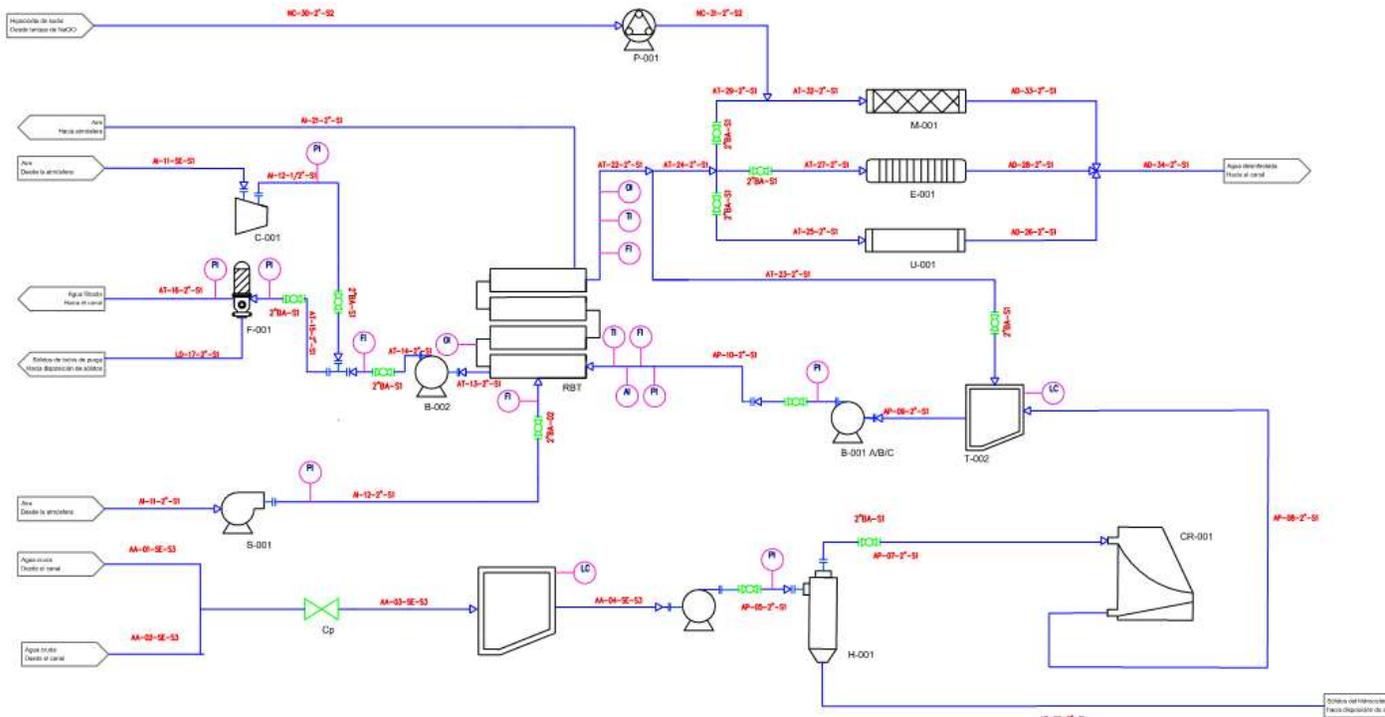


Figura 3. Diagrama de Tuberías e Instrumentación.

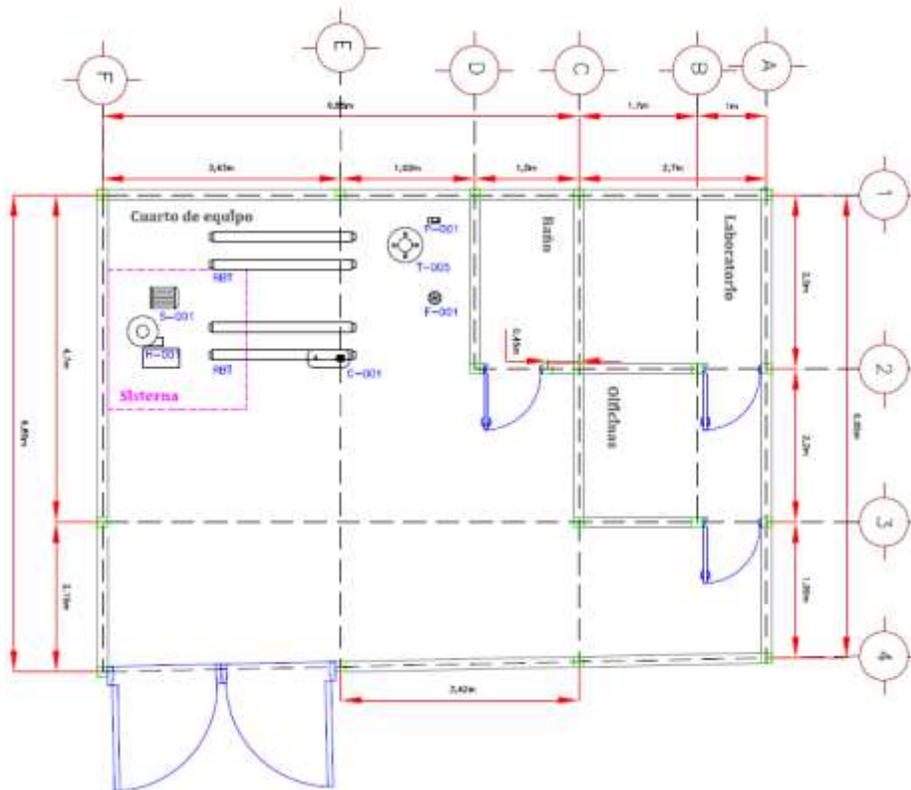


Figura 4. Lay-Out

Cumpliendo la metodología se dio por concluida la Ingeniería básica cuando la revisión de DFP y DTI, proceso y diseño de la planta cumplió con los estándares buscados. Una vez planteado el DFP y el DTI, se procedió a plantear el balance de masa, se tomaron en cuenta los valores más representativos para agua residual (Tabla 1) , se calculó cada unidad que conforma el proceso tomando en cuenta los criterios de diseño encontrados en manuales y bibliografía especializadas (López Vázquez et al 2017, WEF 2011, Wiesmann, 2007), toda la información se concentró en una Hoja de Excel que permitió definir rápidamente el tamaño o la especificación del equipo necesario de cada elemento para así validar el tren de tratamiento propuesto, esta herramienta permitirá una ágil selección e implementación de la tecnología en la tabla 1 se muestran los valores arrojados la entrada y salida del tren de tratamiento.

Tabla 1 resumen de balance de masa Entradas y Salidas

Descripción	Ingreso al sistema	Salida del sistema
Fase	Líquido	Líquido
Caudal (m ³ /h)	1.68	1.68
Componentes	kg/h	kg/h
Agua	1007.16	953.2716
DQO	672	6.72
NH ₄	0.1428	0.001428
Sólidos	0.84	0.0084

La metodología FEL acepta un proyecto cuando los objetivos que se plantearon desde la Ingeniería conceptual se cumplen, tomando en cuenta la normativa correspondiente, en este caso la normativa correspondiente es la NOM-003-SEMARNAT-1997, el balance de masa es la base para aceptar el diseño del tren de tratamiento que se planteó, los valores que se muestran entran en los límites permisibles que nos señala la norma, esto quiere decir que el diseño se realizó correctamente y que la ingeniería está terminada.

Con esto se puede diseñar el lay out de la instalación la Figura 4 muestra el acomodo de la instalación esta se tiene que acoplar a los espacios proporcionados por la Alcaldía.

Conclusiones

Los valores obtenidos en el balance de masa indican que el tren de tratamiento cumple con su objetivo, cumpliendo con la NOM-003-SEMARNAT-1997 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público indica que el agua que de servicio al público con contacto indirecto u ocasional

Los documentos y herramientas generadas en el anteproyecto permitirán la implementación de la tecnología en el sitio de una manera más certera evitando las problemáticas asociadas a la instalación de la tecnología

Este anteproyecto es una propuesta técnica que permitirá en un futuro próximo el de saneamiento de dos descargas a los canales de San Lorenzo Xochimilco, evitando la descarga de aguas residuales domésticas directamente al canal, se busca que, en un tiempo corto, se vea un cambio significativo en el ecosistema.

Agradecimientos

Al proyecto 9125c19 (SECTEI/259/2019). Entre la Facultad de Química y la SECTEI. "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"

Bibliografía

1. Castro, L. B. (2017). Contaminación Química y Biológica en la zona lacustre de Xochimilco. México: UAM.
2. EPA. (22 de agosto de 2021). Learn about Small Wastewater Systems. Obtenido de United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/small-and-rural-wastewater-systems/learn-about-small-wastewater-systems>
3. García González, S.A Durán Moreno . A (2017). Biological tubular reactor, new technology for small wastewater treatment plants.
4. IINGEN. (02 de Mayo de 2017). Reciben canales de Xochimilco descargas de aguas negras. Obtenido de El IUNAM en Prensa: <http://www2.iingen.unam.mx/es-mx/difusion/Lists/EIUNAMenPrensa/DispForm.aspx?ID=491>
5. López Vázquez, C., Buitrón Méndez, G., García, H., & Cervantes Carrillo, F. (2017). Tratamiento Biológico de Aguas Residuales: Principios Modelación y Diseño. U.S.A: Cambridge University Press.
6. López-López José Luis, (2021), Simulación Y Modelación De Un Reactor Biológico Tubular Para El Tratamiento De Aguas Residuales, Mediante La Estimación De Parámetros En AQUASIM Facultad De Química Universidad Nacional Autónoma De México Tesis de licenciatura,
7. Lozano Rivas, W. (2012). Fundamentos de diseño de plantas depuradoras de aguas residuales. Colombia: Universidad Piloto de Colombia.
8. Tchobanoglous, F. L. and Stensel, H. D., 1991. Metcalf and Eddy, Inc.; Wastewater engineering treatment, disposal and reuse. New York: Mc Graw Hill.
9. Morote, A. M. (Febrero de 2013). OCW UPCT. Obtenido de Tema 4. Ingeniería de Detalle: <https://ocw.bib.upct.es/course/view.php?id=140&topic=3>
10. NOM-003-SEMARNAT-1997. (s.f.). Nom-003-semarnat-1997. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes. obtenido de Normas Oficiales Mexicanas:
11. ONU. (10 de Mayo de 2021). Objetivos De Desarrollo Sostenible. Obtenido de ONU: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
12. Quiroz Flores Agustin, M. G. (2008). Estudio comparativo de algunas variables fisicoquímicas del agua en canales secundarios de Xochimilco con y sin Eichhornia Crassipes (Martius) Solms-Laubach. Polibotánica, 127-133.
13. SACMEX . (2018). Diagnóstico, logros y desafíos . Ciudad de México: RAF.

14. Saputeli, L. (2013). Front-End-Loading (FEL) Process Supporting Optimum Field Development Decision Making. SPE International , 1-12.
15. Sarma Nandini, P. R. (2016). Water quality indicators in Lake Xochimilco, Mexico: zooplankton and *Vibrio cholerae*. J. Limnol, 91-100.
16. UNAM. (2017). Análisis del estado de conservación ecológica del sistema lacustre chinanpero de la superficie reconocida por la UNESCO como Sitio Patrimonio de la Humanidad en Xochimilco, Tláhuac y Milpa Alta. CDMX: UNAM.
17. Water Environment Federation, 2011. Biofilm reactors, WEF Manual of Practice No. 35. New York: McGraw-Hill.