



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

***PROPUESTA DE MODERNIZACIÓN DE
UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE
AGUA RESIDUAL DE UNA REFINERÍA***

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA:

JUANA ISABEL GIRÓN CRUZ



MÉXICO, D.F.

AÑO 2015



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: ALFONSO DURÁN MORENO

VOCAL: DE ANDA AGUILAR OSCAR

SECRETARIO: ALEJANDRO ZANELLI TREJO

1er. SUPLENTE: SERGIO ADRIÁN GARCÍA GONZÁLEZ

2° SUPLENTE: RUBÉN PELÁEZ ZAPATA

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

**UNIDAD DE PROYECTOS Y DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL (UPIIA),
FACULTAD DE QUÍMICA, TORRE DE INGENIERÍA 3ER. PISO ALA SUR, UNAM.**

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Alfonso Durán Moreno

SUPERVISOR TÉCNICO:

Ing. José Arturo Moreno Xochicale

SUSTENTANTE:

Juana Isabel Girón Cruz



CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Justificación.....	2
1.2	Objetivo General	3
1.3	Objetivos particulares.....	3
2	MARCO TEÓRICO	4
2.1	Distribución del agua en México	4
2.2	Agua en la industria de Refinación.....	6
2.3	Contaminación del agua en la Refinación	8
2.4	Marco normativo en materia del agua	10
2.5	Caracterización del agua.....	13
2.5.1	Parámetros físicos.....	13
2.5.2	Parámetros químicos.....	13
3	ESQUEMA GENERAL DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL	16
3.1	Conformación de una Planta de Tratamiento de Agua Residual.....	16
3.2	Tecnologías de tratamiento de agua residual industrial	19
3.3	Tecnologías para el tratamiento de agua residual	21
4	ESTADO ACTUAL DEL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN EL SISTEMA NACIONAL DE REFINACIÓN	27
4.1	Origen del agua residual en la refinería	27
4.2	Tecnologías implementadas en las Plantas de Tratamiento de Agua Residual en las distintas refinerías del país.....	28
5	TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE REFINACIÓN EN EL MUNDO	35
6	CASO DE ESTUDIO.....	42
6.1	Antecedentes	42
6.1.1	Descripción del tren de tratamiento de aguas residuales	44
6.2	Estado actual del caso de estudio.....	48



6.2.1	Tecnologías implementadas en la PTAR.....	48
6.2.2	Calidad del efluente del agua de Refinería	57
6.3	Problemáticas	60
6.4	Propuestas de solución	64
7	ANÁLISIS MULTICRITERIO	66
7.1	METODOLOGÍA	66
7.2	Planteamiento y análisis de alternativas	72
7.2.1	Proceso AOP	73
7.2.2	Tratamientos secundarios	83
7.2.3	Tratamiento terciario.....	93
7.3	ANÁLISIS MULTICRITERIO	98
8	SIMULACIÓN DEL ESQUEMA DE TRATAMIENTO SELECCIONADO.....	109
9	ESTIMADO DE INVERSIÓN	115
10	RESULTADOS	117
11	CONCLUSIONES.....	123
12	RECOMENDACIONES.....	126
13	BIBLIOGRAFÍA.....	128
14	Mesografía.....	131
15	ANEXOS.....	133
15.1	Anexo I.....	133
15.1.1	TRATAMIENTOS PRIMARIOS	133
15.1.2	TRATAMIENTOS SECUNDARIOS	142
15.1.3	TRATAMIENTOS TERCARIOS O AVANZADOS.....	152
15.2	Anexo II.....	172



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Usos del Agua en México	4
Figura 1.2	Grado de presión sobre el recurso hídrico, por RHA, 2009	5
Figura 1.3	Reúso del agua residual en México, 2009.....	6
Figura 1.4	Esquema del uso general del agua en Refinería.....	7
Figura 1.5	Contaminantes en Pemex Refinación 2000-2008.....	9
Figura 1.6	Afluentes-Efluentes en un sistema de tratamiento de agua residual .	10
Figura 1.7	Normatividad en materia de descargas de aguas residuales	11
Figura 1.8	Esquema general de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de una Refinería.....	16
Figura 1.9	Tecnologías aplicadas para el tratamiento de aguas residuales industriales.....	20
Figura 1.10	Uso de agua cruda 2011 177.1 MMm ³ (%).....	29
Figura 1.11	Uso de agua cruda 2005-2011 (m ³)	29
Figura 1.12	Plantas de tratamiento de aguas residuales en las refinerías del SNR.	32
Figura 1.13	Tratamiento Primario Refinerías PEMEX	33
Figura 1.14	Tratamiento Secundario Refinerías PEMEX	33
Figura 1.15	Tratamiento Terciario Refinerías PEMEX.....	34
Figura 1.16	Uso del agua en el periodo de 1900-2025 a nivel mundial.....	35
Figura 1.17	Típico sistema de tratamiento de agua residual en Japón	39
Figura 1.18	Mejores Técnicas en el manejo del agua.	40
Figura 1.19	Balance general de agua en la Refinería “Ing. Antonio Dovalí Jaime”	43
Figura 1.20	Sistema de Tratamiento primario	45
Figura 1.21	Sistema de tratamiento secundario	46
Figura 1.22	Sistema de tratamiento terciario.....	47
Figura 1.23	Sistema de tratamiento de lodos	48
Figura 1.24	Sistema de coagulación-floculación	49
Figura 1.25	Sediflotazur	50



Figura 1.26	Proceso de desnitrificación con recirculación de lodos	53
Figura 1.27	Clarificador-Espesador Densadeg.....	54
Figura 1.28	Sistema de filtración a presión	55
Figura 1.29	Sistema de filtros banda	56
Figura 1.30	Áreas de mejora o modernización de la Planta de Tratamiento de Agua Residual.....	62
Figura 1.31	Áreas de mejora o modernización del Sistema de Tratamiento de Lodos	63
Figura 1.32	Objetivos de la evaluación multicriterio	66
Figura 1.33	Metodología para la evaluación de propuesta.....	68
Figura 1.34	Información general de la zononización	74
Figura 1.35	Información general de ozonización con peróxido de hidrógeno....	75
Figura 1.36	Información general de oxidación con O ₃ /UV.....	77
Figura 1.37	Información general de oxidación con H ₂ O ₂ /UV	78
Figura 1.38	Información general del reactor MBR.....	84
Figura 1.39	Sistema MBR	84
Figura 1.40	Distribución de costos en el sistema MBR	85
Figura 1.41	Información general del sistema PACT	87
Figura 1.42	Sistema PACT.....	87
Figura 1.43	Información general del sistema de lodos activados	89
Figura 1.44	Costo de inversión del sistema de lodos activados convencional ..	89
Figura 1.45	Información general del sistema de ósmosis inversa	94
Figura 1.46	Información general del sistema de tratamiento por electrodiálisis	95
Figura 1.47	Costo de inversión de los tratamientos terciarios	97
Figura 1.48	Propuestas a evaluar en el análisis multicriterio.....	98
Figura 1.49	Matriz de comparaciones	100
Figura 1.50	Asignación del peso a cada criterio técnico.....	100
Figura 1.51	Resultado del análisis técnico de las propuesta.....	101
Figura 1.52	Resultaos del análisis ambiental de las propuestas	101
Figura 1.53	Resultado del análisis económico de las propuestas	102
Figura 1.54	Análisis técnico.....	103



Figura 1.55	Resultado de la evaluación técnica	104
Figura 1.56	Resultado de la evaluación ambiental	104
Figura 1.57	Análisis técnico del tratamiento terciario	105
Figura 1.58	Análisis ambiental del tratamiento terciario	106
Figura 1.59	Propuesta de modernización y rehabilitación de la PTAR.....	108
Figura 1.60	Afluente de la refinería	110
Figura 1.61	Ingreso de la calidad del agua proveniente de la Refinería	111
Figura 1.62	Dimensionamiento del Sediflotazur® en GPS-X	111
Figura 1.63	Modelado del Tratamiento de Oxidación Avanzada.	112
Figura 1.64	Modelado del sistema MBR en GPS-X.....	112
Figura 1.65	Modelado de la osmosis inversa	113
Figura 1.66	Modelado del tren de tratamiento GPS-X.....	113
Figura 1.67	Simulación del tren de tratamiento	114
Figura 1.68	Caracterización del afluente de la PTAR.....	115
Figura 1.69	Especificación de tecnologías	115
Figura 1.70	Modelado del sistema de tratamiento de agua residual en Capdetworks®.....	116
Figura 1.71	Actualización de los índices de precios Capdetworks®	116
Figura 1.72	Adecuación de costos unitarios	117
Figura 1.73	Costos de construcción	119
Figura 1.74	Distribución de costos en el material de repuestos y refacciones	120
Figura 1.75	Distribución de costos de químicos	120
Figura 1.76	Distribución de costos en el consumo energético	121
Figura 1.77	Costo del tratamiento de agua residual de la PTAR.....	122
Figura 1.78	Separador API.....	134
Figura 1.79	Separador de placas corrugadas (CPI)	135
Figura 1.80	Desarenador.....	136
Figura 1.81	Sedimentador circular.....	137
Figura 1.82	Sistema de Floración por Aire Disuelto (DAF).....	139
Figura 1.83	Sistema IAF.....	140
Figura 1.84	Diagrama del proceso de coagulación y floculación.....	142



Figura 1.85	Filtros percoladores	143
Figura 1.86	Lodos activados	144
Figura 1.87	Diagrama Sistema PACT	146
Figura 1.88	Zanja de oxidación	148
Figura 1.89	Secuencia de operación del reactor SBR.....	150
Figura 1.90	Reactores Biológicos de Membranas	151
Figura 1.91	Sistema del proceso de adsorción	154
Figura 1.92	Ósmosis inversa.....	157
Figura 1.93	Esquema de electrodiálisis.....	159
Figura 1.94	Sistema de desinfección UV compacta con lámparas de alto flujo	162
Figura 1.95	Sistema de desinfección con Ozono	167
Figura 1.96	Resinas de intercambio iónico.....	169

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Contaminantes regulados por la normatividad ambiental mexicana..	12
Tabla 1.2	Etapas de tratamiento de aguas residuales industriales, 2009.....	18
Tabla 1.3	Tabla resumen ventajas y desventajas de sistemas de tratamiento primario	21
Tabla 1.4	Tabla resumen de ventajas y desventajas de los sistemas de tratamiento secundario.....	22
Tabla 1.5	Tabla resumen de ventajas y desventajas de los sistemas de tratamiento terciario	23
Tabla 1.6	Remoción de contaminantes por tecnología.....	24
Tabla 1.7	Eficiencias de remoción sistemas de tratamiento primario	25
Tabla 1.8	Eficiencias de remoción sistemas de tratamiento secundario	25
Tabla 1.9	Eficiencias de remoción sistemas de tratamiento terciario	26



Tabla 1.10	Contaminación del agua en los procesos de refinación	27
Tabla 1.11	Concentraciones de tópicos de efluentes en procesos de refinación	28
Tabla 1.12	Agua empleada en el proceso de refinación en instalaciones de la Refinería de Salina Cruz, Oaxaca.....	30
Tabla 1.13	Tecnologías de tratamiento de agua residual de refinería a nivel mundial	36
Tabla 1.14	Balance másico de agua (2009).....	43
Tabla 1.15	Sistema de deshidratación de lodos.....	56
Tabla 1.16	Calidades de afluente y efluente de la PTAR (Diseño y actual)	57
Tabla 1.17	Calidad de agua de repuesto a torres de enfriamiento.....	59
Tabla 1.18	Problemas ocasionados por distintos contaminantes en el sistema de enfriamiento de la refinería.....	60
Tabla 1.19	Peso de los distintos criterios en el Análisis multicriterio.....	69
Tabla 1.20	Escalas de evaluación de subcriterios.....	71
Tabla 1.21	Costos de tratamiento de oxidación avanzada	79
Tabla 1.22	Procesos de Oxidación Avanzada (Ventajas-Desventajas).....	80
Tabla 1.23	Cuestiones ambientales de los Tratamientos de Oxidación avanzada	82
Tabla 1.24	Costos sistema MBR.....	85
Tabla 1.25	Costos sistema PACT	88
Tabla 1.26	Características técnicas de los sistemas de tratamiento secundario	90
Tabla 1.27	Criterios ambientales de los sistemas biológicos.	92
Tabla 1.28	Información técnica de los sistemas terciarios	96
Tabla 1.29	Criterios ambientales de los sistemas de tratamiento terciario.....	97
Tabla 1.30	Resultado del Análisis técnico-Ambiental.....	102
Tabla 1.31	Resultado global del análisis multicriterio.....	102
Tabla 1.32	Evaluación multicriterio sistema secundario.....	105
Tabla 1.33	Evaluación multicriterio sistema terciario.....	106
Tabla 1.34	Calidad del agua residual en la PTAR.....	118



Tabla 1.35	Resultados costos Capdetworks	121
Tabla 1.36	Resultados costos generales del proyecto	122
Tabla 1.37	Sistemas de filtración convencional.	152
Tabla 1.38	Tecnologías de membrana.....	155
Tabla 1.39	Tabla comparativa de desinfección con cloro y desinfección por UV.	162
Tabla 1.40	Costos unitarios para el D.F.	172

ÍNDICE DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

DBO.- Demanda Bioquímica de Oxígeno

DQO.- Demanda Química de Oxígeno

PTAN.- Planta de Tratamiento de Aguas Negras.

PTAR.- Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

SDT.- Sólidos Disueltos Totales.

SNR.- Sistema Nacional de Refinación.

SST.- Sólidos Suspendidos Totales.

INEGI.- Instituto Nacional de Estadística y Geografía

PEMEX.- Petróleos Mexicanos

H₂S.- Ácido Sulfúrico

TOC.- Carbón Orgánico Total

NH₃.- Amoniac

NH₄⁺.-Ion amonio

CN⁻.- Ion cianuro

NOM.- Norma Oficial Mexicana

NMX.- Noma Mexicana

LEFRA.- Ley Federal de Responsabilidad Ambiental



1 INTRODUCCIÓN

En el siguiente trabajo se desarrollaron alternativas para la rehabilitación y modernización de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) que trata los efluentes provenientes de una refinería y posteriormente es recirculada para su reúso. Actualmente la planta se encuentra en un 50% de su capacidad de diseño (100 L/s) por lo que no está cumpliendo con su objetivo que es restituir la calidad de agua residual de la refinería, recircular le máximo de aguas tratadas generando un menor volumen de residuos de descarga y por lo tanto reducir el uso de agua cruda proveniente de la presa “Benito Juárez”, evitando disminuir su disponibilidad y comprometiendo su uso en el sector agrícola de la zona.

Se llevó a cabo una recopilación de información de las tecnologías utilizadas en la industria de refinación para el tratamiento de aguas residuales y se plantearon distintas alternativas para cada etapa del tren de tratamiento de la PTAR (pretratamiento, tratamiento secundario y tratamiento terciario) cada etapa se consideró un escenario que no son mutuamente excluyentes

Con información recabada de históricos de calidades y una inspección actual de la planta se determinó la situación actual en la que se encuentra operando la planta y la calidad de agua que llega a la planta y la calidad que entrega a la refinería, con esa información se llegó a un diagnóstico y se propusieron distintas alternativas para mejorar la situación actual de la planta.

Las alternativas de modernización se evaluaron utilizando un análisis multicriterio con la ayuda de la herramienta Mindecider®, tomando en cuenta criterios económicos, técnicos y ambientales para la selección de la opción técnica y económicamente factible y así llevar a una operación de la planta del 100% y mejorando la eficiencia de operación con la implementación de nuevas tecnologías, posteriormente se simuló el tren de tratamiento propuesto con el software GPS-X® para verificar que la PTAR cumpla cualitativamente y cuantitativamente con el flujo requerido por la refinería para torres de enfriamiento.



1.1 Justificación

El agua es un recurso elemental para el desarrollo de la vida, el 70% de la superficie del mundo está cubierta de agua, donde el 3% es agua dulce, de esta parte el 1% está al alcance para el consumo humano, se prevé que este porcentaje disminuya debido al crecimiento de la demanda del sector industrial y por el creciente aumento de la población en los próximos años. En los países en desarrollo, entre el 90-95% de las aguas residuales (municipales e industriales) y el 70% del agua residual industrial se vierten sin tratar y contaminan los cuerpos de agua comprometiendo este recurso para las personas y dañando el medio ambiente (Cumbre de Johannesburgo, 2002).

Como solución a este problema, se ha restringido el vertido de contaminantes a los cuerpos de agua, además se han desarrollado tecnologías para la remoción de los distintos contaminantes e implementación de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR's). El tratamiento de las aguas residuales es una cuestión prioritaria a nivel mundial, ya que es importante disponer de agua de calidad y en cantidad suficiente, lo que permitirá una mejora del ambiente, la salud y la calidad de vida.

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales deben de tener una capacidad efectiva para la remoción de contaminantes alta, se tiene como meta el generar la mínima cantidad de residuos y el uso de energía e insumos sea el mínimo para que sea factible y su impacto al medio ambiente no sea negativo.

Es importante promover un desarrollo sustentable para mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas, en el caso de los recursos hídricos, la sustentabilidad se garantiza por medio de las medidas necesarias para la preservación del equilibrio, aprovechamiento y protección de los recursos hídricos de manera que se no comprometa el uso de este recurso para las generaciones futuras.



1.2 Objetivo General

Plantear propuestas de rehabilitación y modernización de una planta de tratamiento de agua residual de una Refinería mediante una simulación y análisis de nuevas tecnologías en el tratamiento de aguas residuales para garantizar el suministro de agua para su reuso.

1.3 Objetivos particulares

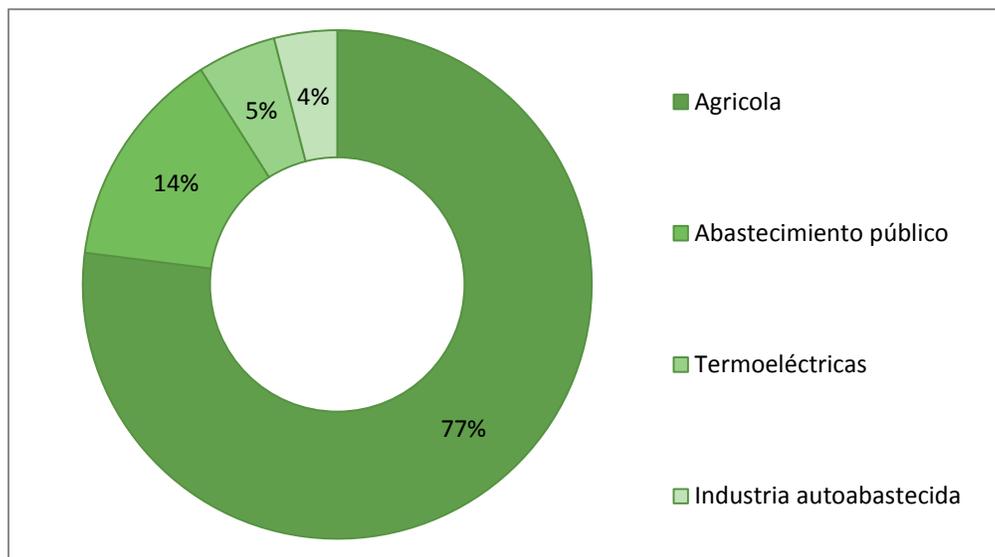
- Recopilar y analizar información sobre las tecnologías de tratamiento de efluentes acuosos implementadas en la Industria de Refinación a nivel mundial.
- Analizar la situación actual de la Planta de Tratamiento de Agua Residual de una Refinería y ver áreas de mejora en el ámbito de implementación de nuevas tecnologías.
- Modelar el tren de tratamiento con las mejoras propuestas para verificar que cumpla con las calidades requeridas para su reuso en la Refinería.
- Estimar los costos de inversión, operación y mantenimiento del esquema de la planta de Tratamiento de Agua Residual con las mejoras operativas.



2 MARCO TEÓRICO

2.1 Distribución del agua en México

Cerca del 0.002% del agua total en el planeta es agua dulce accesible para el ser humano con fines para consumo y como recurso para realizar actividades para el desarrollo de una población como son la agricultura, ganadería e industria. (Fernández Cirelli, 2012). En México el 4% el agua disponible es utilizada en la industria autoabastecida (INEGI, 2011) como se muestra en la Figura 1.1.



(INEGI). Estadísticas del agua en México 2011.

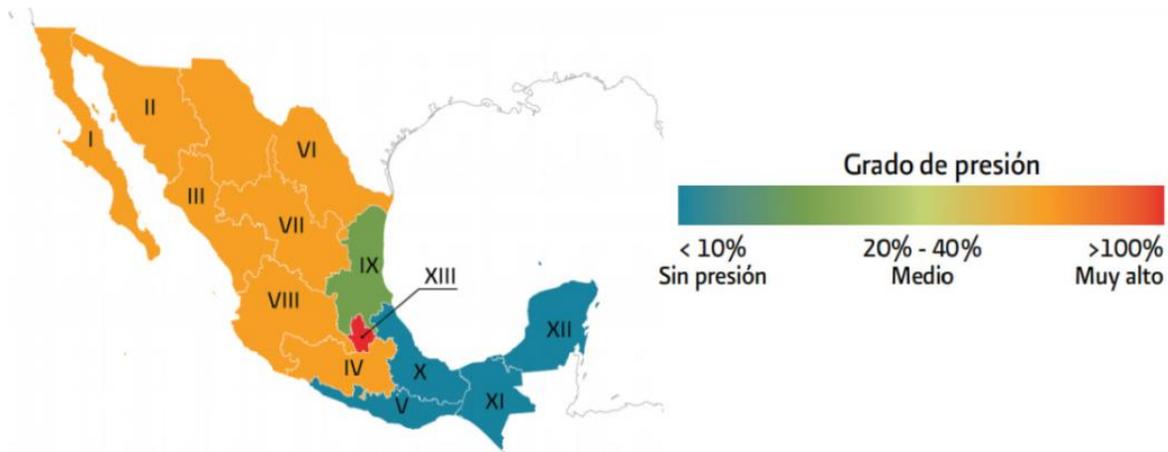
Figura 1.1 Usos del Agua en México

Tras la evaluación de la calidad del agua para el periodo 1974-2000, se obtuvo como resultado que el 70% de los cuerpos de agua están altamente contaminados (Sistema Nacional de Información del Agua, 2012).

El porcentaje que representa el agua empleada respecto a la disponibilidad, es un indicador del grado de presión que se ejerce sobre el recurso hídrico en un país, cuenca o región, en la Figura 1.2 se puede observar que la mayor parte norte y



centro del país está bajo una presión de este recurso en un 50% debido a la escasez del agua en aquellas regiones hidrológicas administrativas, mientras que en la parte sur (RHA V, X, XI, XII) se tiene un grado de presión menor al 10%.

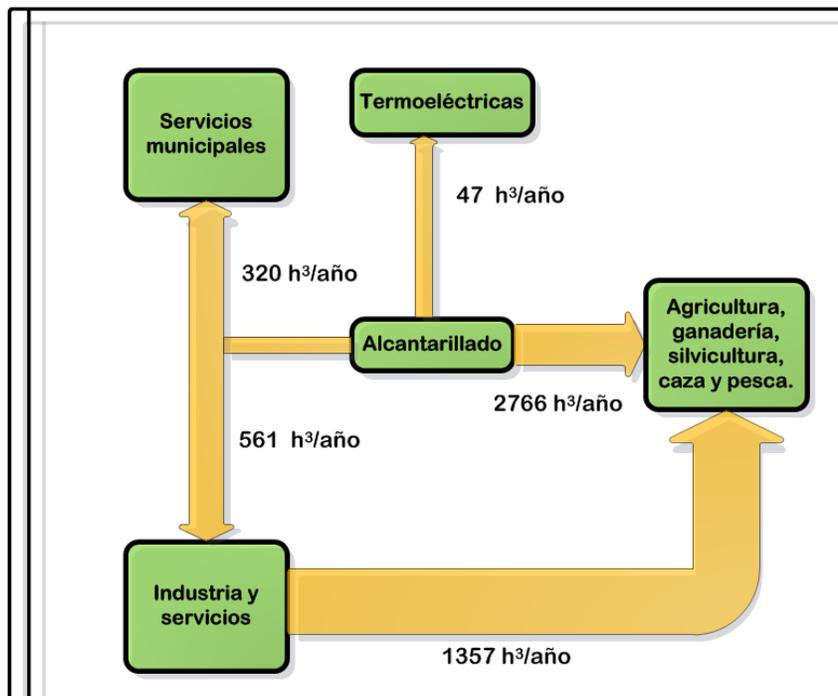


Fuente: Conagua, Subdirección General de Programación. 2010

Figura 1.2 Grado de presión sobre el recurso hídrico, por RHA, 2009

La calidad del agua está afectada por diversos factores como resultado de la producción industrial y agrícola, el tratamiento que se le da antes de ser vertida nuevamente a los cuerpos de agua, y la calidad misma del agua de los ríos y lagos, ya que de ésta depende su capacidad de purificación (SEMARNAT).

Con la infraestructura hidráulica con la que México contaba en el año 2009, gran parte del agua residual era reutilizada en la agricultura, ganadería y actividades afines, mientras que para la industria se disponía cerca de un 15% del agua como se muestra en la Figura 1.3. Pero los efluentes que salen del sector industrial contienen mayores concentraciones de contaminantes siendo más nocivos y tóxicos tanto para el medio ambiente como para las poblaciones cercanas a dichos complejos.



CONAGUA (2010) Infraestructura hidráulica. Cuencas del Agua, 2010.

Figura 1.3 **Reúso del agua residual en México, 2009.**

Dentro del Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2007-2012 destaca el Desarrollo Humano Sustentable como premisa para el desarrollo integral del país. Entre los ejes que conforman el PND la sustentabilidad ambiental destaca la importancia de proteger las aguas superficiales y los mantos acuíferos, así como la calidad de los cuerpos de agua.

2.2 Agua en la industria de Refinación

La industria de la Refinación del petróleo está constituida por una serie de procesos físicos y químicos para la obtención de los diversos hidrocarburos o familias de hidrocarburos. Esta transformación se logra mediante los siguientes procesos:

- Destilación atmosférica



- Destilación al vacío
- Hidrodesulfuración
- Desintegración térmica
- Desintegración catalítica
- Alquilación
- Reformación catalítica

Los efluentes de una refinería provienen de los siguientes sistemas:

- Condensado de vapor
- Agua de separación
- Descarga procedente de la purga de torres de enfriamiento y calderas
- Agua de lavado
- Aguas procedentes del proceso de desalación del crudo (Salmuera)
- Agua de neutralización de residuos ácidos y alcalinos
- Agua amarga

El objetivo de una planta de tratamiento de aguas residuales industriales es cumplir con las normas de descarga (NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996, NOM-003-SEMARNAT-1997, NOM-004-SEMARNAT-2002), evitar el vertido de contaminantes a los cuerpos receptores naturales y evitar daños al entorno ecológico, el agua reusada a la refinería, se usa para los servicios que se muestran en la Figura 1.4.

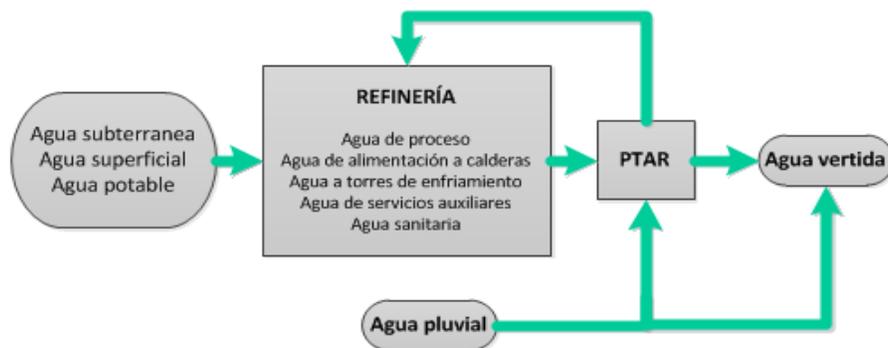


Figura 1.4 Esquema del uso general del agua en Refinería.



La implementación de una PTAR para una refinería representa cumplir con las normas ambientales de descarga (Marco normativo en materia del agua) y evitar posibles daños a cuerpos de agua cercanos a la refinería, además de tener la posibilidad de reusar el agua y disminuir el consumo de agua cruda, sin perjudicar el consumo de agua de las ciudades aledañas a la refinería.

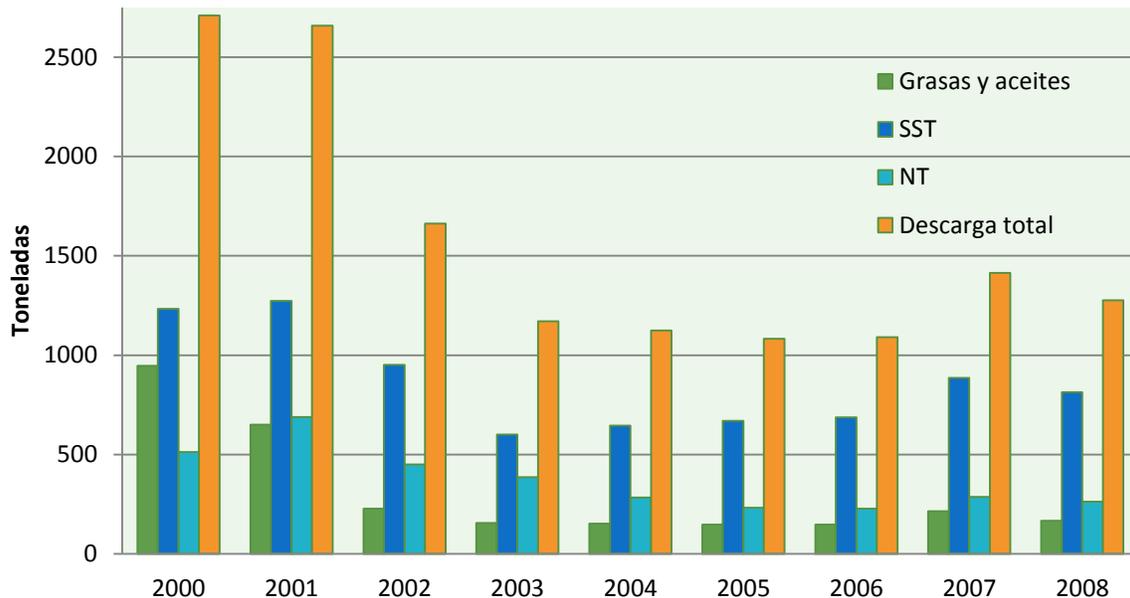
2.3 Contaminación del agua en la Refinación

Para la transformación del petróleo en sus derivados, se requiere de agua y vapor de agua. El vapor y/o agua entra en contacto con el petróleo y se mezcla con hidrocarburos y otras sustancias del petróleo, tales como compuestos sulfurados, oxigenados y nitrogenados.

El agua residual proveniente de refinerías comúnmente contiene un gran número de contaminantes de los cuales algunos son:

- Metales pesados
- Compuestos fenólicos
- Sulfuros
- Amonio
- Materiales disueltos
- Sólidos en suspensión
- Fenoles

En la Figura 1.5 se observa cómo ha cambiado la calidad en las descargas totales de los efluentes de Pemex Refinación debido a la implementación y mejora de los sistemas de tratamiento de efluentes.



Fuente: (Jiménez Cisneros, 2012). Calidad del Agua

Figura 1.5 Contaminantes en Pemex Refinación 2000-2008

Entre los logros más notables de PEMEX en materia del agua entre el período de 2000-2008 está la disminución en un 53% de las descargas totales de aguas residuales, debido al reúso del agua residual tratada en las distintas Plantas del SNR. Se disminuyó la descarga de grasas y aceites en un 82%, y los Sólidos Suspendedos Totales disminuyeron a un 34% (Jiménez, 2012)

Una planta de tratamiento de agua residual tiene diversas repercusiones ambientales debido a los distintos efluentes como se ilustra en la Figura 1.6, tiene potencial de verter de contaminantes en el suelo como son los lodos productos del tratamiento biológico y fisicoquímico, al aire se libera CO₂ y metano como producto de la descomposición de la materia orgánica en el proceso secundario de la PTAR, además se puede llevar a cabo la contaminación del agua vertiendo corrientes con altas concentraciones de contaminantes a cuerpos de aguas naturales cerca de la planta. Actualmente existe una gran gama de opciones tecnológicas para disminuir



estos problemas para que los beneficios ambientales en la implementación de una PTAR sean mayores que sus efectos negativos.



(Ministry of the Environment, government of Japan, 2003)

Figura 1.6 Afluentes-Efluentes en un sistema de tratamiento de agua residual

La calidad y cantidad del agua residual de una refinería depende en mayor parte de la configuración de los procesos que conforman la misma, debido a esto la combinación de métodos para el tratamiento del agua residual es distinta de una a otra refinería.

2.4 Marco normativo en materia del agua

México cuenta con un marco normativo en materia de contaminantes en aguas residuales que se descargan a los cuerpos receptores a través de las normas descritas en la Figura 1.7.

Descargar aguas residuales con altas concentraciones de contaminantes son acciones que traen mayores efectos negativos por lo que el objetivo de las normas es adoptar medidas de control de los vertidos industriales, proteger los recursos hídricos, la salud y fomentar un desarrollo sostenible en el uso del agua.

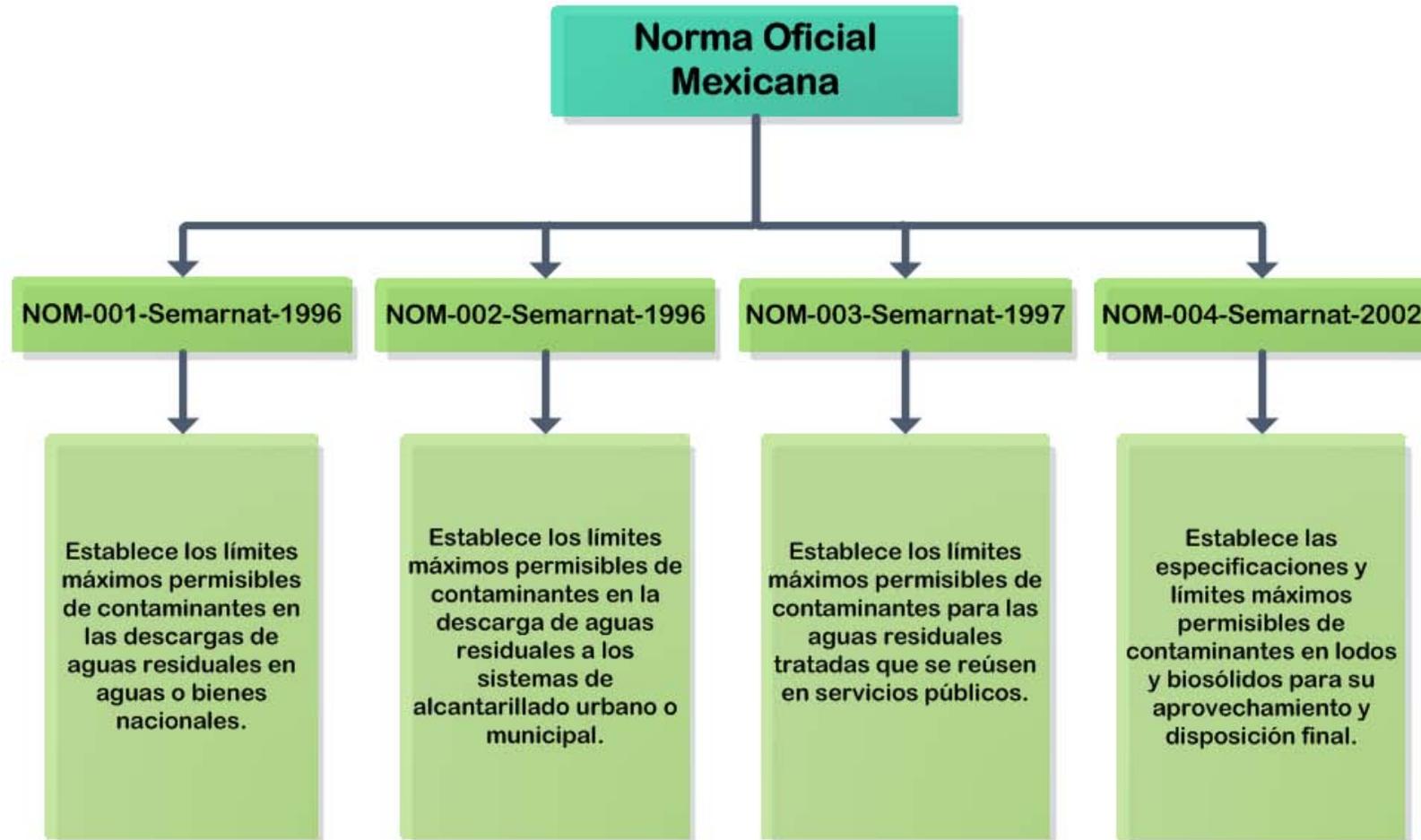


Figura 1.7 Normatividad en materia de descargas de aguas residuales



Estas normas son de carácter obligatorio a nivel federal. Las condiciones particulares de descarga son condiciones específicas que se establecen en una concesión de descarga para una industria o empresa en particular, de acuerdo a su ramo y características de los contaminantes que generan, con parámetros y límites basados a la normatividad, de acuerdo a las Normas Oficiales Mexicanas los parámetros son los siguientes:

Tabla 1.1 Contaminantes regulados por la normatividad ambiental mexicana.

Parámetros básicos	Contaminantes básicos.	Metales pesados y cianuros
<ul style="list-style-type: none"> ○ pH ○ Temperatura 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Grasas y aceites ○ Materia flotante ○ Sólidos Sedimentables ○ Sólidos suspendidos totales ○ Demanda Bioquímica de Oxígeno ○ Nitrógeno total ○ Fósforo total 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Arsénico ○ Cadmio ○ Cianuros ○ Cobre ○ Cromo ○ Mercurio ○ Níquel ○ Plomo ○ Zinc

La Ley Federal de Derechos (CONAGUA, 2014), menciona las disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales como los derechos por el uso o aprovechamiento de los bienes hídricos en el país, las cuotas por dicho uso y las sanciones por la contaminación de este recurso. Se menciona que se disminuirá el pago por derechos de explotación en diferentes casos, por ejemplo cuando se lleve a cabo el uso o aprovechamiento de aguas residuales tratadas o aguas que provengan de colectores de áreas urbanas o industriales, y por las aguas que regresen a su fuente original o que sean vertidas en cualquier otro sitio previamente



autorizado por la Comisión Nacional de Agua cumpliendo con la calidad de agua que en la ley mencionan, en los que se mencionan distintos parámetros inorgánicos, orgánicos, físicos y microbiológicos de acuerdo al uso que se le vaya a dar al agua, sin excluir el cumplimiento de los límites máximos permisibles establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas.

En Ley Federal de responsabilidad ambiental es una ley que se aprobó en junio del 2013 como respuesta a los daños ocasionados al ambiente, donde se establece criterios para evaluar si alguna empresa, institución, contratistas, por mencionar algunos ejemplos, está ocasionando daños al medio ambiente e indica la sanción que corresponde a dicho acto y compensación de dichos daños, además exhorta al uso de tecnologías limpias y aplicación de buenas prácticas ambientales para un desarrollo sustentable considerando factores económicos, sociales y ambientales.

2.5 Caracterización del agua

2.5.1 Parámetros físicos

Color. Se debe a la presencia de sustancias orgánicas disueltas o coloidales, sustancias inorgánicas disueltas, así como cuerpos vivos presentes, tales como algas. Las medidas de color se hacen en una escala de unidades de Pt-Co (Unidades Hazen).

Temperatura. Es un parámetro muy importante por su efecto en la vida acuática, reacciones químicas y velocidades de reacción.

Turbidez. Es una medida de la capacidad del agua para transmitir la luz debido a materiales insolubles en suspensión, coloidales o muy finos, microorganismos entre otros

2.5.2 Parámetros químicos



DBO. Es una medida de la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para degradar la materia orgánica en el agua y se mide en mO_2/L .

DQO. Es una medida de la concentración de sustancias en el agua que pueden ser atacados por un oxidante, y se expresa en miligramos de O_2 por litro.

pH: El pH es una medida de la concentración de iones hidrógeno, es indicativo de la naturaleza ácida o alcalina de la solución. A pH extremos el agua residual es difícil de tratar por medios biológicos.

Alcalinidad: Es la capacidad del agua para neutralizar ácidos. Sin embargo, aniones de ácidos débiles (bicarbonatos, carbonatos, hidróxido, sulfuro, bisulfuro, silicato y fosfato) pueden contribuir a la alcalinidad.

Gases: Los gases que con mayor frecuencia se encuentran en las aguas residuales son el nitrógeno (N_2), el oxígeno (O_2) y dióxido de carbono (CO_2), además de sulfuro de hidrógeno (H_2S), metano (CH_4), amoníaco (NH_3), que son generados de la descomposición de la materia orgánica.

Dureza: Debida a la presencia de sales disueltas de calcio y magnesio, mide la capacidad de un agua para producir incrustaciones. Se puede expresar como meq/L , o en mg deCaCO_3 por litro.

Conductividad (debido a las sales). Es una expresión numérica de la actividad iónica de una solución en términos de su capacidad para conducir la electricidad.

Cloruros y sulfatos. Presentes normalmente en el agua y en residuos generados por humanos. Cloruros en altas concentraciones aceleran la corrosión debido al pequeño tamaño del ión que puede penetrar la capa protectora en la interface +óxido-metal y reaccionar con el hierro estructural. El ión cloruro Cl^- , forma sales en general muy solubles se separa por intercambio iónico, aunque es menos retenido que los iones polivalentes.

Nitrógeno y Fósforo. Son nutrientes o bioestimulantes que son esenciales para el crecimiento de algas y organismos biológicos. Si el agua residual no contiene



suficiente nitrógeno pueden ocurrir problemas por deficiencia de nutrientes durante el tratamiento secundario. Sin embargo, concentraciones elevadas de fósforo y nitrógeno contribuyen al agotamiento del oxígeno y promueve la eutrofización del agua.

Carbonatos y bicarbonatos. Normalmente presentes en el agua y en los residuos como sales de calcio y magnesio.

Fenoles: Los fenoles o compuestos fenólicos son compuestos orgánicos que causan problemas de sabor en el agua. Concentraciones altas de fenoles hacen poco viable el uso de procesos biológicos para el tratamiento de estas aguas residuales debido a que existe inhibición de los microorganismos. Los procesos de eliminación de los fenoles en el tratamiento de agua incluyen la supercloración, la ozonización y adsorción con carbón activado. Los tratamientos mecánicos o por coagulación no tienen efectos sobre los fenoles.

Grasas y aceites: Las grasas son compuestos orgánicos estables por lo que es difícil su descomposición por la acción de las bacterias y su presencia en niveles elevados dificulta el tratamiento del agua residual en diversos procesos.

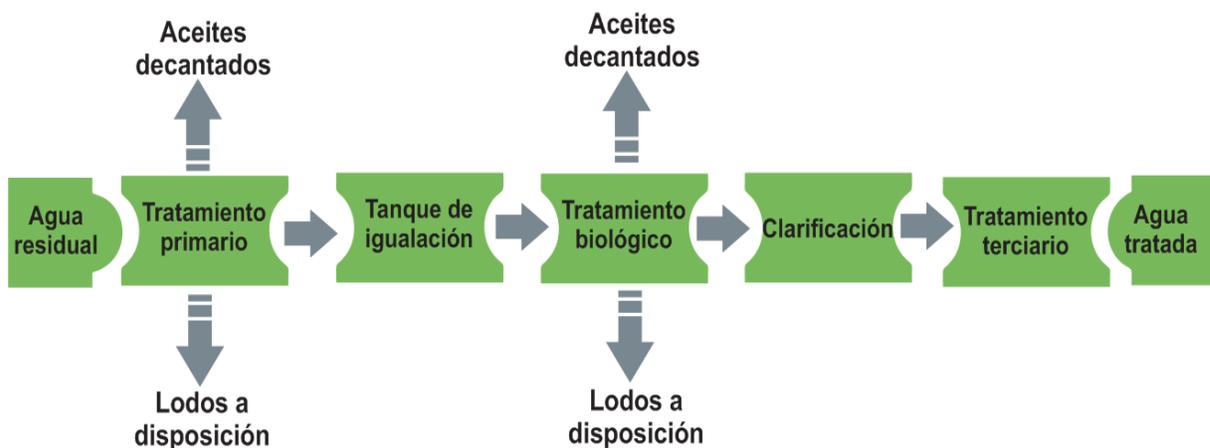


3 ESQUEMA GENERAL DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

3.1 Conformación de una Planta de Tratamiento de Agua Residual

Las diferentes combinaciones de procesos y operaciones unitarias de una planta de tratamiento funcionan como un sistema, por lo que la elección del tren de tratamiento a utilizar se debe abordar desde una perspectiva global, tomando en cuenta todas las variables involucradas para que el agua que entre a la planta, cumpla con las características requeridas al final del tratamiento.

Una planta de tratamiento principalmente consiste en una sección de tratamiento primario y secundario, dependiendo de la calidad requerida del efluente, se implementará un tratamiento terciario como se ilustra en la Figura 1.8.



Fuente: (BP Refinery Kwinana)

Figura 1.8 Esquema general de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de una Refinería



En la actualidad, se han desarrollado diferentes tecnologías para el tratamiento de aguas. La aplicación de una tecnología u otra depende en gran medida de la concentración de contaminantes, del caudal del afluente y del fin último del agua tratada.

En resumen, los principales elementos que intervienen en la selección de tecnologías en los procesos de tratamiento son:

- a) Calidad del agua residual
- b) Requerimientos de la calidad del agua residual tratada
- c) Selección y análisis de las operaciones y procesos unitarios.
- d) Compatibilidad con las instalaciones existentes.
- e) Costo de la tecnología.
- f) Operación y mantenimiento.
- g) Consideraciones ambientales.
- h) Características del sitio.
- i) Emisión de gases.
- j) Emisión de ruidos.
- k) Generación de residuos.

En la Tabla 1.2 se muestran los tipos de tratamiento implementados en el país según los datos recabados por la CONAGUA divididos de acuerdo a la etapa y tipo de tratamiento.



Tabla 1.2 Etapas de tratamiento de aguas residuales industriales, 2009.

Etapa de tratamiento	Propósito	Número de plantas	Gasto de operación (m ³ /s)	Porcentaje
Primario	<ul style="list-style-type: none"> • Eliminación de sólidos en suspensión y de la DBO contenida o adsorbida en ellos mediante decantación por gravedad. • Eliminación de flotantes. • Adición de coagulantes y floculantes para mejorar la separación. • Neutralización del pH. 	731	14.64	33.44
Secundario	<ul style="list-style-type: none"> • Eliminación de la carga orgánica y partículas coloidales. • Proceso aerobio de lodos activos, en sus diferentes variantes. • Decantación secundaria tras el proceso biológico. • Recirculación de parte de los lodos para asegurar la continuidad del proceso. 	1193	18.39	54.57
Terciario	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento de la calidad del efluente, eliminando sólidos en suspensión residuales, nutrientes y contaminación microbiológica. • Eliminación de N y P vía biológica o físico- química. • Filtración en medio granular para eliminar sólidos en suspensión residuales y DBO. • Adición de reactivos químicos para eliminar la carga orgánica residual. • Desinfección para eliminar microorganismos patógenos. 	88	1.26	4.03
No especificado		174	2.41	7.96
TOTAL		2186	36.70	100

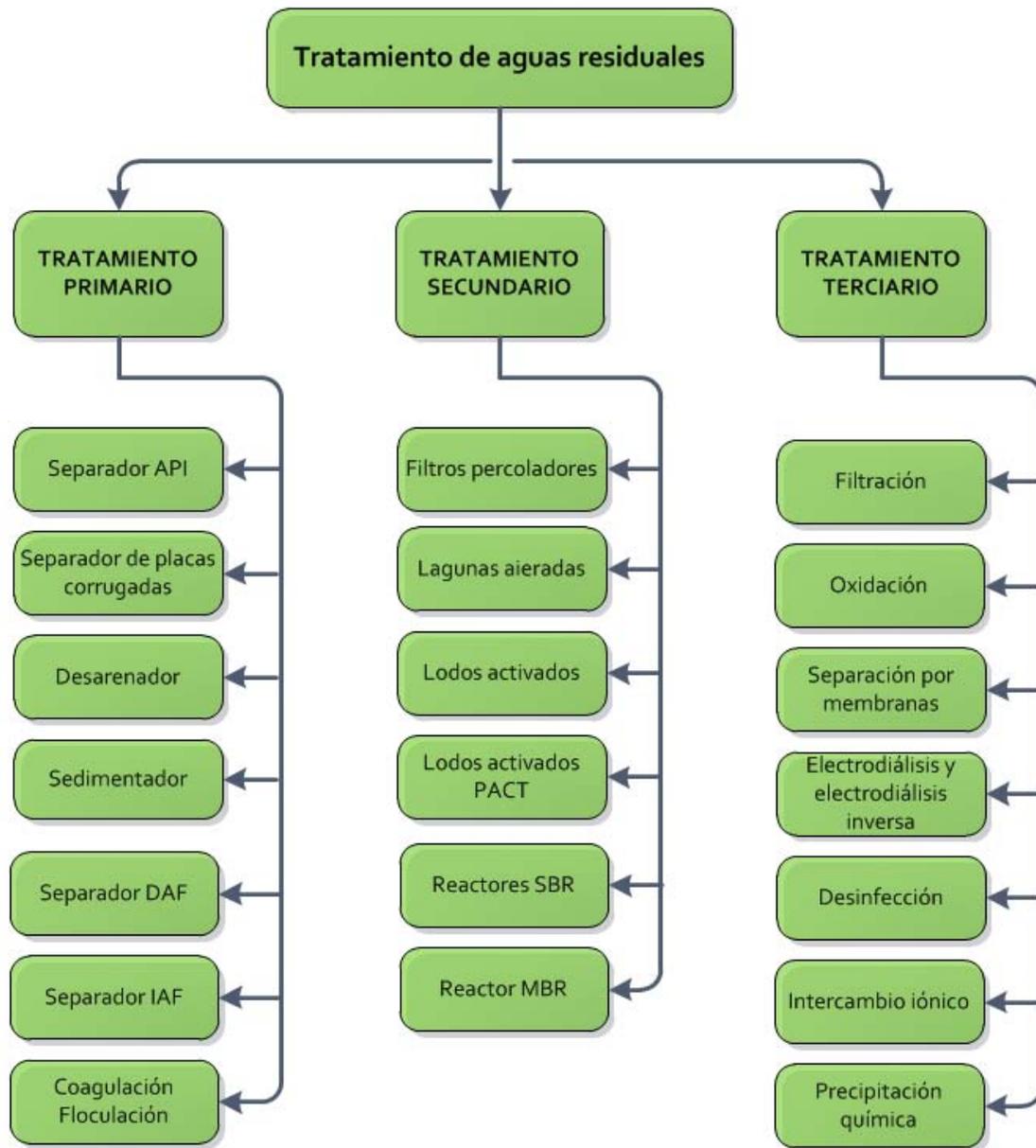
Fuente. CONAGUA. Subdirección General Técnica, 2010.



3.2 Tecnologías de tratamiento de agua residual industrial

El agua residual del proceso de refinación contiene principalmente hidrocarburos y diversos compuestos químicos de diferentes características, composición, estructura, toxicidad y biodegradación, por lo que debe aplicarse un tren de tratamiento específico para el tipo de aguas en particular.

En la Figura 1.9 se muestran las diferentes tecnologías desarrolladas e implementadas para el tratamiento de aguas residuales industriales, están clasificadas de acuerdo a la etapa y los contaminantes que remueven como tratamiento primario, secundario y terciario y se describen con más detalle en el Anexo I.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.9 Tecnologías aplicadas para el tratamiento de aguas residuales industriales



3.3 Tecnologías para el tratamiento de agua residual

De acuerdo a la información recopilada de las diferentes tecnologías de tratamiento de agua residual, se realizaron las siguientes tablas con las ventajas y desventajas más significativas, esta información será importante a tomar en cuenta en el momento de seleccionar la tecnología más adecuada y para comprobar que las tecnologías existentes se encuentren operando de forma adecuada.

	Ventaja
	En algunos casos desventaja
	Desventaja

Tabla 1.3 Tabla resumen ventajas y desventajas de sistemas de tratamiento primario

Característica \ Tecnología	Costo de instalación	Costo de operación	Costo de mantenimiento	Área requerida	Fácil operación	Insumos requeridos	Alto rango de operación	Eficiencia	Flexibilidad	Tiempo de remoción	Fácil mantenimiento	Residuos generados	Sensibilidad a variaciones
Separador API													
Separador CPI													
Desarenador													
Sedimentador													
Separador DAF		1											
Separador IAF													
Coagulación-Floculación													

1. Costos operacionales elevados cuando existe un control automático de parámetros



Tabla 1.4 Tabla resumen de ventajas y desventajas de los sistemas de tratamiento secundario

Característica	Tecnología												
	Costo de instalación	Costo de operación	Costo de mantenimiento	Área requerida	Fácil operación	Insumos requeridos	Residuos generados	Alto rango de operación	Eficiencia	Flexibilidad	Fácil mantenimiento	Sensibilidad a variaciones	Proceso previo o posterior
Reactor UASB	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Filtro percolador	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Lodos activados	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Lodos activados PACT	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Reactores SBR	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Reactor MBR	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

1. Remoción de patógenos bajo
2. Mayor mantenimiento
3. No necesita sistema de clarificación

La mayoría de las tecnologías para el tratamiento biológico requieren áreas grandes, el tamaño depende del tiempo de retención para que se lleve a cabo la degradación orgánica, además del reactor es necesario un tratamiento posterior como la sedimentación para separar los lodos generados. Muchas de las ventajas y desventajas de cada tecnología se describen en el Anexo I.



Tabla 1.5 Tabla resumen de ventajas y desventajas de los sistemas de tratamiento terciario

Característica	Tecnología													
	Costo de instalación	Costo de operación	Costo de mantenimiento	Área requerida	Fácil operación	Insumos requeridos	Tiempo de retención	Alto rango de operación	Eficiencia	Flexibilidad	Fácil mantenimiento	Residuos generados	Sensibilidad a variaciones	Proceso previo o posterior
Filtración	Green	Yellow 1	Red	Green				Green					Yellow	
Adsorción		Green	Yellow 2		Green			Green	Yellow 3			Red		Red
Ósmosis Inversa	Yellow	Red		Green				Yellow	Green		Green	Yellow		Red
Electrodialisis		Red		Green					Green					Red
Ultrafiltración	Yellow	Green		Green		Green		Green	Yellow			Yellow		
Oxidación	Yellow	Red		Green		Green		Green	Yellow			Yellow		
Desinfección UV	Red	Yellow	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow			Green	Yellow	Red
Desinfección Cloro				Green	Green	Yellow		Green	Green			Red	Yellow	
Desinfección Ozono		Red	Yellow		Yellow		Green		Green			Green		
Intercambio Iónico		Red		Green	Green	Yellow		Green		Green		Green		Red
Precipitación química		Yellow				Red		Green			Red	Yellow		

1. Requerimiento de energía eléctrica moderado
2. Mantenimiento frecuente
3. No destruye los contaminantes

La implementación de tecnologías con alta eficiencia en la remoción de contaminantes (Tabla 1.3, Tabla 1.4 y Tabla 1.5) es indispensable para garantizar la calidad requerida para su reúso en la refinería, además es importante tomar en cuenta la calidad del agua a tratar ya que dependiendo de los contaminantes a remover (Tabla 1.6) se seleccionarán los procesos de tratamiento adecuados.



Tabla 1.6 Remoción de contaminantes por tecnología

	DQO	DBO ₅	Sólidos Suspendedos Totales	Sólidos Sedimentables	Material Coloidal	Materia orgánica disuelta	Dureza (Ca ²⁺ Mg ²⁺)	Metales	Grasas y aceites	Hidrocarburos	Índice de fenol	Compuestos org. halogenados	Compuestos inorgánicos (1)	Nitrógeno, Fósforo	Turbidez	Cationes y aniones	Sales (2)	Agentes patógenos	Metales pesados	Bacterias y virus
Separador API			●	●					●						●					
Separador CPI			●	●					●						●					
Desarenador				●											●					
Sedimentador			●	●											●					
Separador DAF			●	●	●				●						●					
Separador IAF			●	●	●				●						●					
Coagulación-Floculación	●	●	●		●	●			●			●		●	●	●				
Reactor UASB	●	●				●								●						
Filtros percoladores	●	●	●			●								●						
Lodos activados	●	●	●	●		●								●						
Lodos activados PACT	●	●	●	●		●				●	●									
Reactores SBR	●	●	●	●		●				●	●			●						
Reactor MBR		●	●	●	●	●								●						
Filtración		●	●	●																
Adsorción	●		●	●					●	●	●	●	●							
Ósmosis Inversa		●	●	●	●	●	●										●	●		●
Electrodialisis					●						●	●					●	●		
Ultrafiltración		●	●	●														●		
Oxidación											●									
Desinfección UV																				●
Desinfección Cloro																				●
Desinfección Ozono																				●
Intercambio Iónico											●					●	●			
Precipitación química							●	●												

1. Compuestos orgánicos como cloro libre y bromo
2. Sales como fosfato, nitrato y sulfato



Eficiencias de Remoción de contaminantes

Tabla 1.7 Eficiencias de remoción sistemas de tratamiento primario

Tecnología	General	SST	SSED	GYA	DQO	Fenol	Cationes-aniones
Separador API	----	----	----	----	----	----	----
Separador CPI	----	----	----	----	----	----	----
Desarenador	----	----	----	----	----	----	----
Sedimentador	----	60-90%	90-95%	60-90%	----	----	----
Separador DAF	----	----	----	----	----	----	----
Separador IAF	90%	----	----	----	----	----	----
Coagulación-Floculación		>90%	99.9%	----	----	----	----

Tabla 1.8 Eficiencias de remoción sistemas de tratamiento secundario

Tecnología	General	DBO ₅	DQO	SSED	PO ⁴ -P	N. org	N-NH ₄	SST	Fenol
Reactor UASB	90%	----	----	----	----	----	----	----	----
Filtros percoladores	-----	65-80%	60-85%	60-85%	8-12%	15-50%	-----	----	----
Lodos activados	95-99%	90-95%	----	-----	10-25%	15-50%	8-15%	80-90%	-----
Lodos activados PACT	-----	95%	80%	----	----	----	----	77%	99%
Reactores SBR	95-99%	85-90%	-----	-----	10-25%	15-50%	8-15%	80-90%	-----
Reactor MBR	-----	99%	95%	-----	-----	-----	82%	99%	-----

**Tabla 1.9 Eficiencias de remoción sistemas de tratamiento terciario**

Tecnología	General	SST	G y A	DBO	Bacterias
Filtración	-----	90-99%	85%	-----	-----
Adsorción	85-95%	-----	-----	90%	-----
Ósmosis Inversa	70-85%	-----	-----	-----	-----
Electrodialisis	90%	-----	-----	-----	-----
Ultrafiltración	70-80%	-----	-----	-----	-----
Oxidación	-----	-----	-----	-----	-----
Desinfección UV	-----	-----	-----	-----	-----
Desinfección Cloro	-----	-----	-----	-----	-----
Desinfección Ozono	-----	-----	-----	-----	-----
Intercambio Iónico	99.90%	-----	-----	-----	-----
Precipitación química	-----	80-90%	-----	70-80%	80-90%



4 ESTADO ACTUAL DEL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN EL SISTEMA NACIONAL DE REFINACIÓN

4.1 Origen del agua residual en la refinería

La industria de la refinación del petróleo, es uno de los procesos que más contamina agua y vierte grandes cantidades de residuos en los cuerpos naturales en distintos puntos del país. Desde un punto de vista general el agua residual de una refinería, está compuesta por el agua proveniente de las torres de enfriamiento, agua de proceso, agua de servicios generales y agua de lluvia. La calidad del agua residual generada en refinería y sus características dependen de la configuración del proceso, en la Tabla 1.10 se muestran los contaminantes principales que están presentes en las aguas residuales provenientes de distintos procesos de refinación.

Tabla 1.10 Contaminación del agua en los procesos de refinación

Proceso de refinación	Contaminantes
Destilación	Efluentes con amonio, ácido sulfhídrico y fenoles
Desalación	Cloruro de Sodio, fenoles, sulfuros y ácido sulfhídrico.
Destilación al vacío	Fenol y aceites
Hidrotratamiento con nafta	Condensado amargo
Hidrotratamiento catalítico	Ácido sulfhídrico, aceites y fenoles.
Craqueo catalítico o térmico	Fenoles, ácido sulfhídrico y cianuros
Hidrocraqueo	Amonio
Alquilación catalítica	Bases del lavado y ácidos de los drenes
Procesos con solventes	Solventes como fenoles, sulfatos
Procesos de tratamiento	Contaminantes orgánicos e inorgánicos (sulfatos, fenoles)

Fuente: (Mahajam, 2008)



En la Tabla 1.11 se muestra el grado en el que estos contaminantes se encuentran en el agua después de la etapa en el proceso de refinación.

Tabla 1.11 Concentraciones de típicos de efluentes en procesos de refinación

Proceso	Aceite	H ₂ S (RSH)	NH ₃ (NH ₄ ⁺)	Fenoles	DBO DQO TOC	CN ⁻	SST
Destilación	XX	XX	XX	X	XX		XX
Hidrotratamiento	XX	XXX	XXX		XX		
Craqueo Catalítico	XX	XXX	XXX	XX	XX	X	X
Hidrocraqueo	XX	xxx	xxx		X		
Sosa	XX	xx		xxx	xxx	x	x
X=<50 mg/L		XX=50-500 mg/L		XXX=>500 mg/L			

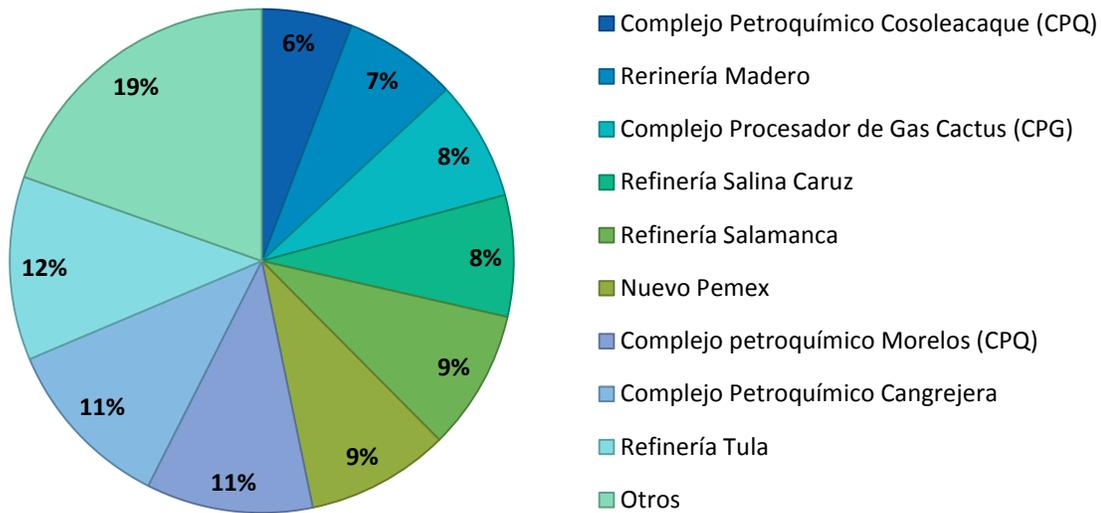
Fuente: (IPPC, 2003)

Los procesos que aportan importantes cantidades de fenoles a las aguas residuales de las refinerías son la destilación, el craqueo catalítico y el agua que entra en contacto con la sosa cáustica.

4.2 Tecnologías implementadas en las Plantas de Tratamiento de Agua Residual en las distintas refinerías del país

El abastecimiento de agua en la industria de Refinación está compuesto principalmente de agua superficial seguido de agua subterránea (PEMEX, 2011) y su uso en las distintas plantas. Siendo la refinería de Tula uno de los complejos que más consumen agua para las distintas plantas que la conforman con un total de 21.25 MMm³, seguida por la refinería de Salamanca con 15.9 MMm³ y la refinería de Salina Cruz con 4.16 MMm³ en el año 2011.¹

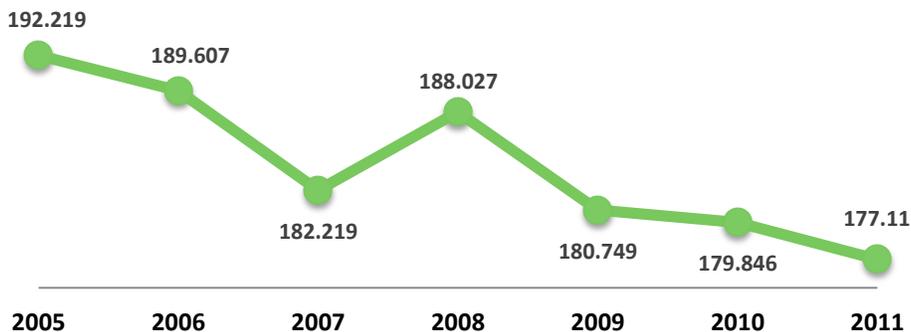
¹ MMm³. Millones de metros cúbicos



Fuente: PEMEX. Informe de responsabilidad social. 2011

Figura 1.10 **Uso de agua cruda 2011 177.1 MMm³ (%)**

En los últimos años ha disminuido el uso de agua cruda en el sector de Refinación ya que se ha incrementado la infraestructura para el tratamiento de aguas residuales con el propósito de reutilizarlas en los procesos, alcanzando en el año 2011 una disminución del uso de agua cruda del 1.5% con respecto al año 2010 como se muestra en la Figura 1.11 .



Fuente: PEMEX. Informe de responsabilidad social. 2011

Figura 1.11 **Uso de agua cruda 2005-2011 (m³)**



PEMEX, como empresa de carácter mundial y con el reto de crear una cadena de valor sustentable, se ha comprometido al desarrollo e implementación de prácticas de gestión ambiental que contribuyan a la competitividad y al crecimiento económico. Entre estas prácticas se encuentra el uso eficiente del agua y ahorro de energía (PEMEX, 2009). En el contexto anterior, es importante señalar que la disminución en el consumo de barriles de agua cruda respecto a los barriles de petróleo procesado (índice de consumo) en la industria petrolera es un gran desafío para PEMEX.

Particularmente el sistema Nacional de Refinación (SNR) ha implementado varias acciones para el reúso de aguas residuales y disminuir el impacto negativo a los cuerpos receptores con el propósito de reducir el consumo de agua de primer uso.

En la Tabla 1.12 se muestran las acciones que se realizaron en uno de los seis complejos y como ha disminuido el consumo de agua fresca a partir de la implementación de una PTAR.

Tabla 1.12 Agua empleada en el proceso de refinación en instalaciones de la Refinería de Salina Cruz, Oaxaca.

Año	Agua LPS		Acción
	Fresca	Tratada	
1998	752	45	Consumo de la Refinería
1999	717	80	Entrada en operación de la PTAR al 45%
2000	667	130	Entrada de Ósmosis Inversa 45%
2001	577	220	PTAR y Ósmosis al 100%
2002	523	274	Integración de la PTAN a capacidad de diseño
2003	478	319	Se sostiene el proceso de tratamiento
2004	425	372	Se mantiene la operación con 40% de agua tratada
2005	370	427	Estabilización de la Operación del tratamiento de agua

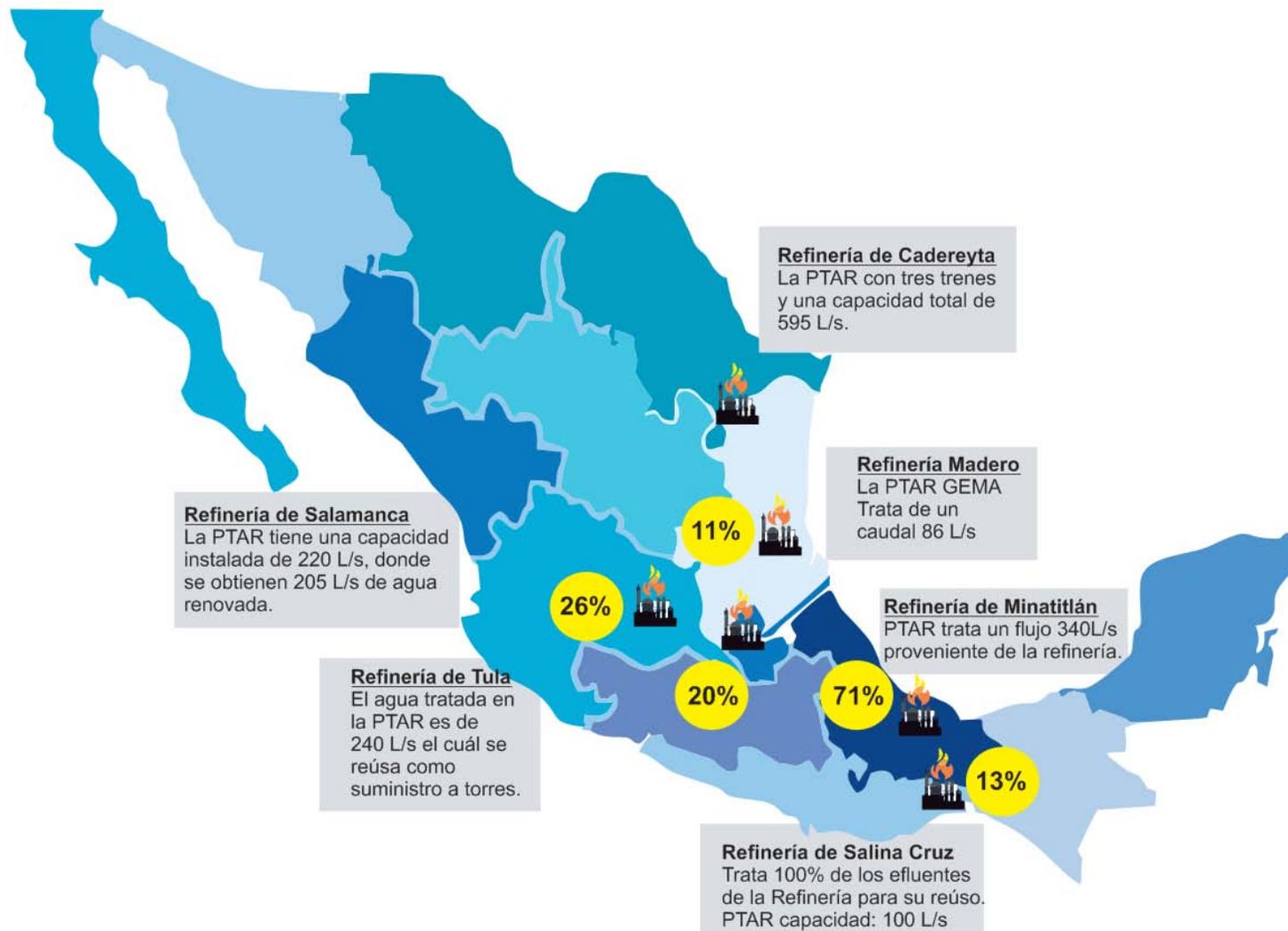
Fuente: PEMEX. Gerencia de Protección Ambiental.



En la refinería de Salina Cruz, Oaxaca, al entrar en operación la PTAR a la capacidad de diseño se disminuyó un 30.5% del agua fresca requerida por la Refinería y al ser estabilizado el tren de tratamiento el consumo de agua fresca por parte de la refinería se redujo a un 50% de acuerdo a datos publicados por PEMEX en el año 2005.

El Sistema Nacional de Refinación (SNR) cuenta con seis refinerías y están distribuidos como se muestra en la Figura 1.12, las cuales cuentan con un Tren de Tratamiento de Aguas residuales para el tratamiento del agua residual de cada sistema de refinación para su posterior reúso o descarga a los cuerpos receptores cumpliendo con la normatividad.

En la figura se muestra la comparativa del agua total requerida por las refinerías y el porcentaje que representa el agua reutilizada tratada en las distintas PTAR's. En la Figura 1.12, la refinería de Minatitlán tiene un 71% del agua utilizada en la refinería proveniente del tratamiento de la PTAR, este valor alto se debe a que la planta está conformada por dos sistemas que se integran a la PTAR, uno de ellos trata el agua proveniente de la refinería y el otro trata agua residual urbana.



Fuente: PEMEX, UNAM (2014)

Figura 1.12 Plantas de tratamiento de aguas residuales en las refinerías del SNR.



Actualmente el sistema nacional de refinerías realiza trabajos de mantenimiento y cambio de equipos en las plantas de tratamiento de aguas residuales, en donde está considerando el cambio de tecnologías por unas más eficientes.

De acuerdo a información recopilada de las distintas plantas de tratamiento de agua residual instaladas en el SNR, se realizaron las siguientes gráficas sobre el tipo de tecnologías implementadas.

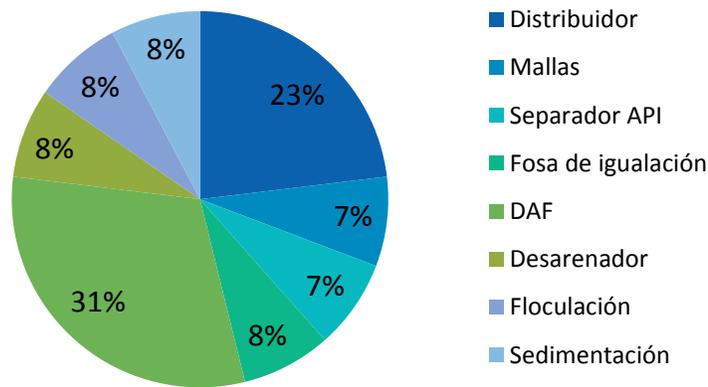


Figura 1.13 Tratamiento Primario Refinerías PEMEX

En el tratamiento primario destaca el uso del separador de grasas y aceites DAF como una de las tecnologías con mayor aplicabilidad para los efluentes de la refinería en el país por sus características técnicas y económicas.

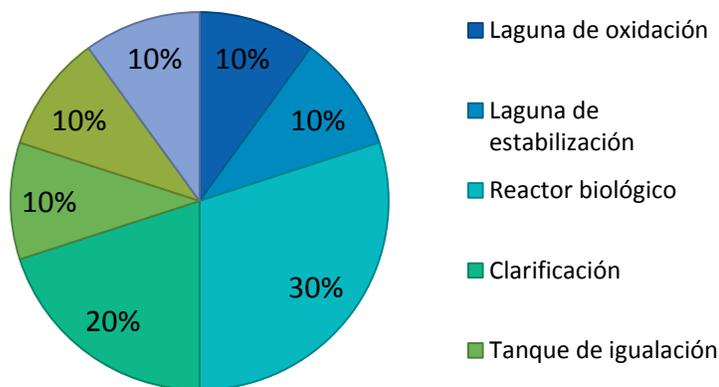
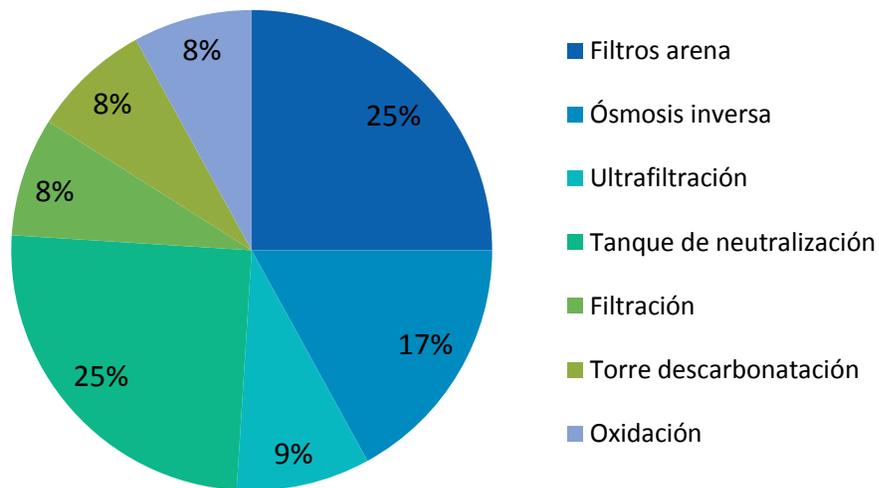


Figura 1.14 Tratamiento Secundario Refinerías PEMEX



Para el tratamiento secundario se hace uso del reactor biológico y en casi todas las plantas el tanque de clarificación está presente, ya sea como tratamiento precedente al reactor o como un tratamiento posterior.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.15 Tratamiento Terciario Refinerías PEMEX

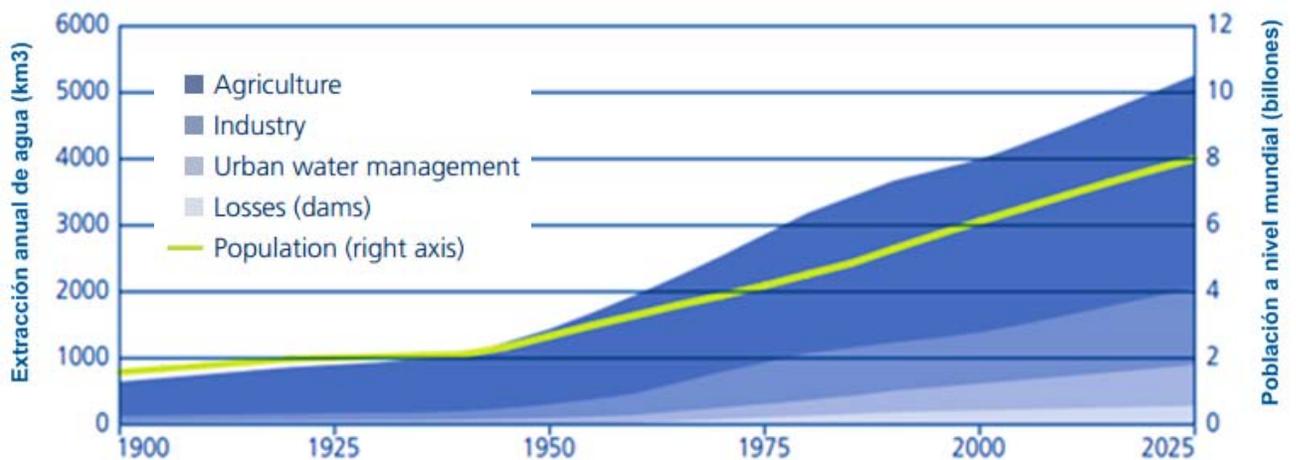
El tratamiento terciario es necesario sólo en el caso de que se requiera cierta calidad del efluente de la PTAR. En el SNR se usan en gran medida los filtros arena, la ultrafiltración y la osmosis inversa.



5 TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE REFINACIÓN EN EL MUNDO

Hay diferencias en el uso del agua entre regiones, por ejemplo en países desarrollados aproximadamente el 50% del uso del agua está destinado para uso industrial, mientras que para países en desarrollo, la agricultura es la actividad que más agua usa, cerca de un 80%.

El aumento en la demanda del agua en la industria aumentará principalmente por el aumento de la población a nivel mundial, trayendo como consecuencia un aumento en la demanda de este recurso y por parte del sector industrial como se muestra en la Figura 1.16, por lo que será necesario contar con las tecnologías y programas para una buena distribución, uso y reúso de este recurso.



Fuente: (SAM Sustainable Asset Management AG, 2007)

Figura 1.16 Uso del agua en el periodo de 1900-2025 a nivel mundial



Cada refinería alrededor del mundo tiene su propio tratamiento de agua residual y está conformada de distinta forma y se emplean distintas tecnologías debido a factores como la calidad del agua residual, la calidad del agua a entregar, el desarrollo en materia del tratamiento de aguas residuales y la disponibilidad de espacio y recursos de inversión, algunas de las PTAR's se mencionan en la Tabla 1.13 y el año de construcción donde se puede observar que no tienen una antigüedad mayor a diez años.

Tabla 1.13 Tecnologías de tratamiento de agua residual de refinería a nivel mundial

PAÍS	REFINERÍA	OBJETIVOS DE LA PTAR	TECNOLOGÍAS IMPLEMENTADAS EN LA PTAR	REFERENCIA
CHINA Sinopec Jiujiang	Refinería Petroquímica	Cumplir con los requerimientos de descarga Su reúso en la refinería	Sistema PACT para el tratamiento biológico. Sistema WAR Sistema Hydro-Clear filter Sistema Zimpro wet air oxidation (WAO)	(SIEMENS, 2014)
ARABIA SAUDITA Sitra	Bapco refinery	Cumplir con los requerimientos de descarga Implementar tecnología innovadora para el tratamiento de efluentes	Sistema API seguido por un IAF en el tratamiento primario En el sistema secundario un sistema MBR	(Bizbahrain, 2013)
INDIA Orissa	Paradip Refinery	Reúso del agua tratada en la Refinería	Sistema API para la remoción de grasas y aceites. Se implementó un DAF En el tratamiento terciario se cuenta con ultrafiltración (UF) y ósmosis inversa (OI).	(WABAG, 2010)



PAÍS	REFINERÍA	OBJETIVOS DE LA PTAR	TECNOLOGÍAS IMPLEMENTADAS EN LA PTAR	REFERENCIA
ITALIA	Taranto Refinery	Segregación de corrientes *Reciclar-Reusar	Reactor de Biomembrana (MBR) Electrodialisis inversa (EDR) Osmosis inversa (RO)	(AECOM, 2008)
RUSIA	Bashneft Refiney	*Cumplimiento con los requerimientos de descarga *Reúso del agua tratada	Reactor de Biomembrana (MBR) Electrodialisis inversa (EDR) Osmosis inversa (RO)	(PennEnergy , 2013)
ALEMANIA	Gelsenkirchen Refinery	*Cumplir con los entandares de descarga de agua residual	*Remoción de aceites DCI como tratamiento primario *Tratamiento DAF	(Degrémont, 2008)
BRASIL São Paulo	Refinaria do Planalto Paulista	Abastecimiento de agua ultrapura	Clarificación Ultrafiltración Ósmosis Inversa y pulido por lecho mixto.	(Degrémont, 2008)

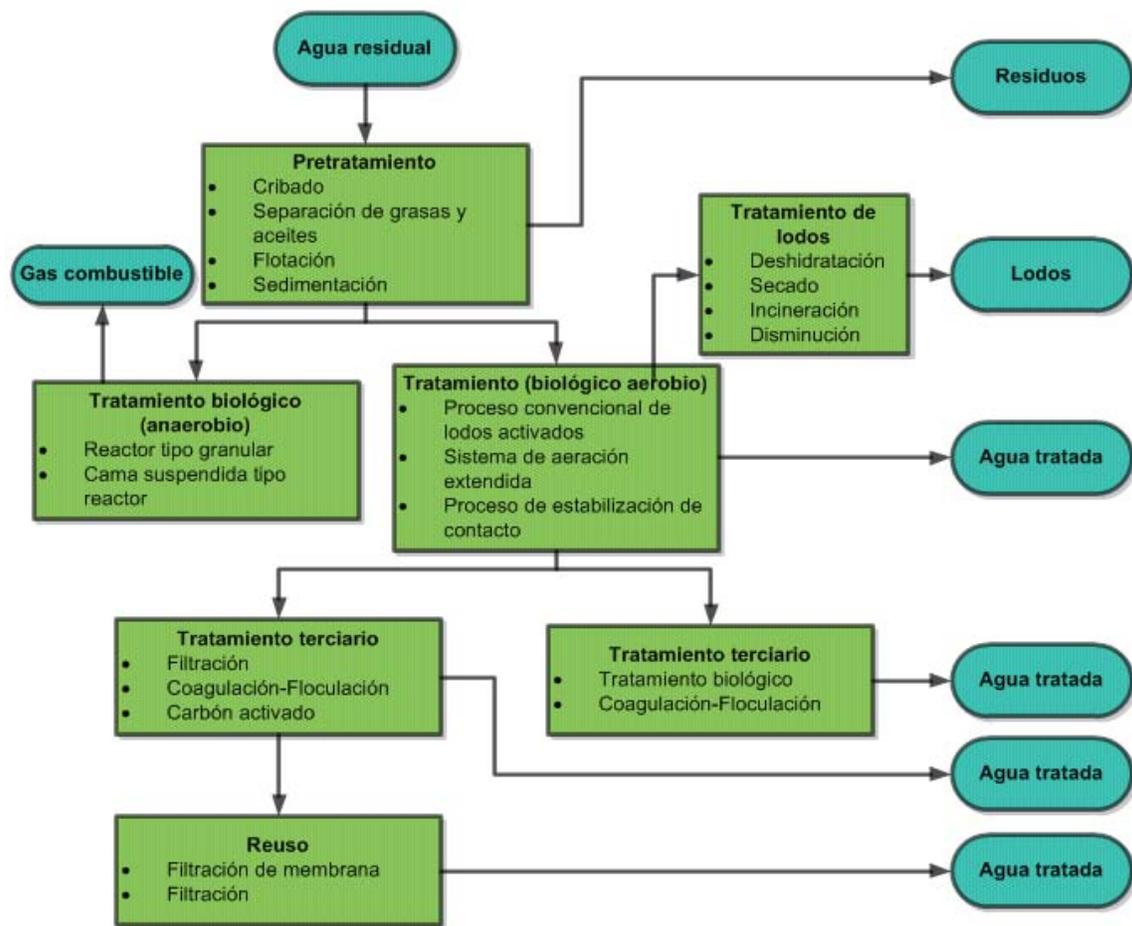


Con el fin de cumplir con las leyes establecidas en los distintos países con lo referente a la disposición del agua residual de las refinerías. Los distintos complejos procuran la implementación de tecnologías con alta eficiencia de remoción y aplican la práctica de segregación de corrientes para una mejor disponibilidad del agua residual.

En los últimos años la remoción de contaminantes no es el único objetivo en el Tratamiento de Aguas residuales, sino que además son necesarias las siguientes características en un sistema de tratamiento (Reardon, 2013)

- Remoción: De acuerdo a la calidad de los efluentes permitidos por las normas establecidas en cada país, se deberá de cumplir con los valores de contaminantes del agua tratada, además del tratamiento y disposición de los residuos generados.
- Energía: El aumento en el costo de energía prevé que las Plantas de Tratamiento deberán de tomar en cuenta suministro de energía alternativos, además de la posibilidad de conservar y generar energía.
- Sustentabilidad. Una mejor administración del agua para la protección de este recurso para las futuras generaciones.
- Tecnología: La aplicación de tratamientos avanzados para la remoción de contaminantes.

En países como Japón el esquema de una planta de tratamiento toma en cuenta el aprovechamiento o reúso de los residuos generados en la planta como se muestra en la Figura 1.17, donde además de usar tecnologías más eficientes que requieran de menos insumos como químicos y sean más fáciles y económicos de operar, también se preocupan con cumplir la normatividad establecida para verter residuos y cuidar los recursos con los que cuenta el país.



(Overseas Environmental Cooperation Center, Japan, 2003)

Figura 1.17 Típico sistema de tratamiento de agua residual en Japón

Durante un tiempo, gran parte de los esfuerzos fueron enfocados en el tratamiento de aguas debido a los distintos problemas ocasionados por la contaminación ambiental como resultado del vertimiento de las aguas residuales a los distintos cuerpos de agua. Se han adoptado medidas tecnológicas y de gestión enfocadas a la reducción de materiales y energía como se muestra en la Figura 1.17.

Una acción para la disminución del consumo de agua cruda es la Guía de Mejores Técnicas Disponibles “Plan Maestro de Agua”, donde su principal objetivo es el reciclado y la reutilización del agua (Figura 1.18).



Figura 1.18 Mejores Técnicas en el manejo del agua.

Una de las prácticas recomendadas para el diseño de procesos limpios es la segregación de corrientes ya que facilita el diseño de sistemas de tratamiento de acuerdo a las características específicas de cada línea. La segregación permite reducir los costos de capital de los sistemas de tratamiento y vertido, debido a la disminución del volumen de desechos que requieren atención. Es frecuente encontrar líneas residuales cuyas características físico-químicas les permiten ser utilizadas en otras áreas del proceso, dichas líneas pueden ser reutilizadas directamente, mientras que en otras situaciones se requiere su condicionamiento a través de una operación relativamente simple y de bajo costo como por ejemplo eliminación de sólidos suspendidos, neutralización, enfriamiento, por mencionar algunos ejemplos (Claudio, 2002).



Una gestión apropiada de las distintas corrientes residuales provenientes de una refinería, trae consigo varios efectos positivos como son:

- Reducción del caudal final vertido. Disminuye el tamaño de la planta de tratamiento, bajo consumo de energía y químicos usados además de que repercute en la disminución de descarga de contaminantes al medio ambiente.
- Mejor consumo de agua fresca. Es un recurso valioso que en muchas partes de Europa se está convirtiendo en escaso. Aquí entra el concepto de “la descarga cero” que consiste en reciclar y reusar el agua y por ende disminuir el consumo de agua fresca, esta práctica la aplican en su mayoría los países en aquel continente, reduciendo la contaminación y promoviendo el reúso de este recurso.
- Mejor funcionamiento de la PTAR.



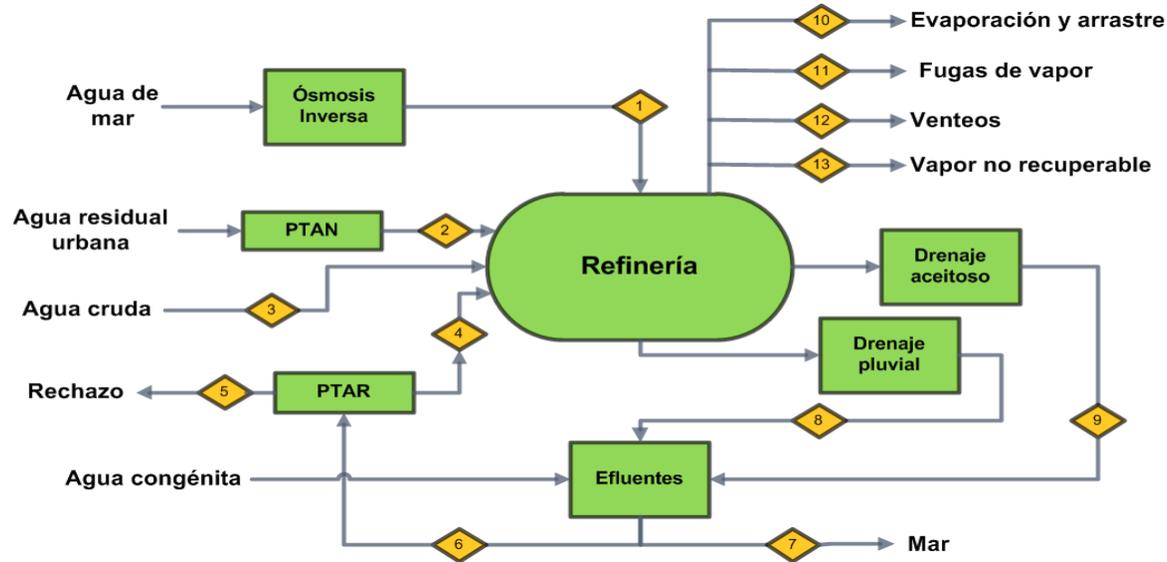
6 CASO DE ESTUDIO

6.1 Antecedentes

La Refinería que se abordó como caso de estudio se encuentra en Salina Cruz, Oaxaca; donde la disposición del agua compromete la administración de este recurso para otras actividades tales como la agricultura, y para suministro de las poblaciones cercanas a la refinería.

Con el objetivo de reducir los consumos de agua de primer uso de la refinería y con la implementación de programas de reúso de agua en este centro de trabajo, se construyó la PTAR.

El abastecimiento de agua para la refinería es para la generación de vapor, sistema de enfriamiento, agua para proceso y servicios generales; sus distintas fuentes se muestran en la Figura 1.19, el agua proveniente de la PTAR representa un 12.5% del total requerido por la refinería, mientras que el 61% es suministrada por agua cruda. El balance de agua correspondiente al diagrama antes se mencionado se presenta en la Tabla 1.14.



Fuente: UPIIA.UNAM 2009

Figura 1.19 Balance general de agua en la Refinería “Ing. Antonio Dovalí Jaime”

Tabla 1.14 Balance volumétrico de agua (2009)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
DESCRIPCIÓN	Agua de ósmosis	Agua de PTAN	Agua cruda	Agua de PTAR	Rechazo de la PTAR	Emisor a PTAR	Emisor al mar	Drenaje pluvial a área de efluentes	Drenaje aceitoso a área de efluentes	Evaporación y arrastre en torres de enfriamiento	Fugas de vapor	Venteos	Vapor no recuperable
Flujo (m³/h) 2009	547.7	145.83	1630	333.37	12.50	345.8	² S/D	² S/D	² S/D	1247.6	69.05	33.00	113.81

Fuente: UPIIA. UNAM 2009

² S/D: Sin datos



6.1.1 Descripción del tren de tratamiento de aguas residuales

La planta de tratamiento de agua residual tiene una capacidad de diseño de 100 L/s y está dividido en tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario y se describe a continuación.

Antes de que de enviar los efluentes a la PTAR, dentro de la refinería se somete el efluente a tratamientos físicos donde se separan grasas y aceites, partículas flotantes y lodos.

6.1.1.1 TRATAMIENTO PRIMARIO

La línea de agua residual proveniente de la refinería recibe una dosificación de SOSA antes de entrar al tanque de afluente T-301 para posteriormente ser enviada hacia el tanque de oxidación catalítica de sulfuros (T-302) donde se inyecta cloruro férrico en la línea de entrada del tanque, el objetivo de esta etapa es la eliminación de sulfuros para proteger el proceso biológico posterior.

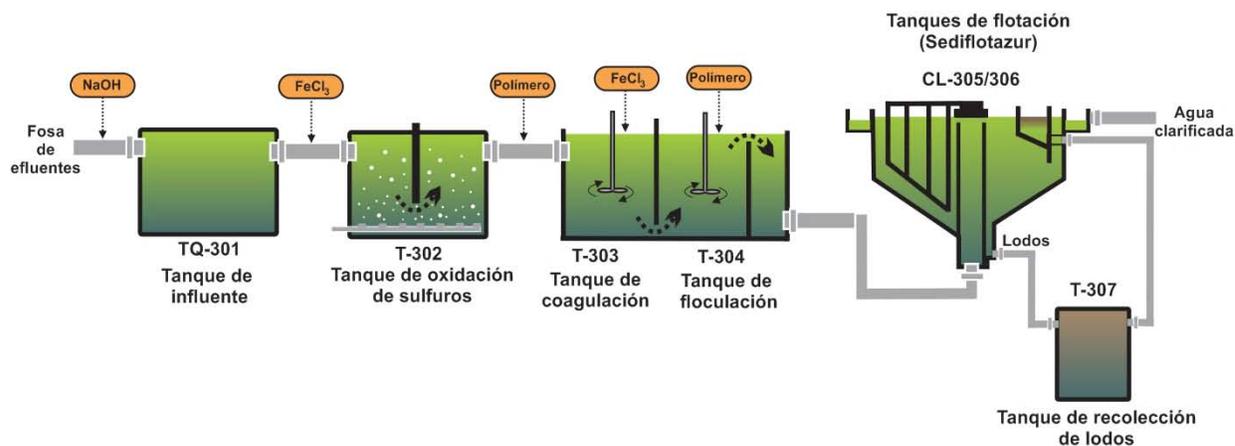
La reacción de oxidación de iones sulfuros a tiosulfatos y sulfatos se realiza por inyección de aire en presencia de un catalizador (sosa), la eliminación se realiza precipitándolos como sales de hierro.

Después el flujo se envía al tanque T-303 donde se lleva a cabo la coagulación por medio de la adición de un coagulante orgánico con una agitación rápida para un mayor contacto, además se agrega cloruro férrico para asegurar la disminución de la concentración residual de sulfuros en el agua, posteriormente pasa el tanque T- 304 donde se realiza la floculación, por medio de la adición de un floculante aniónico (polímero) y con agitación lenta para favorecer la formación de los flóculos.

El agua es enviada el tanque de Flotación Sediflotazur CL-305/306 dónde los sólidos previamente aglomerados por la coagulación-floculación son retirados por flotación inducida o forzada y son enviados al tanque de recolección de lodos



(T- 307) y posteriormente enviarlos al tanque de almacenamiento T-351. La materia en suspensión se fija a las microburbujas, reduciendo su densidad aparente relativa a un valor inferior a la del líquido y suben a la superficie para su posterior evacuación por barrido superficial en una canaleta de recuperación de lodos.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.20 Sistema de Tratamiento primario

6.1.1.2 TRATAMIENTO SECUNDARIO

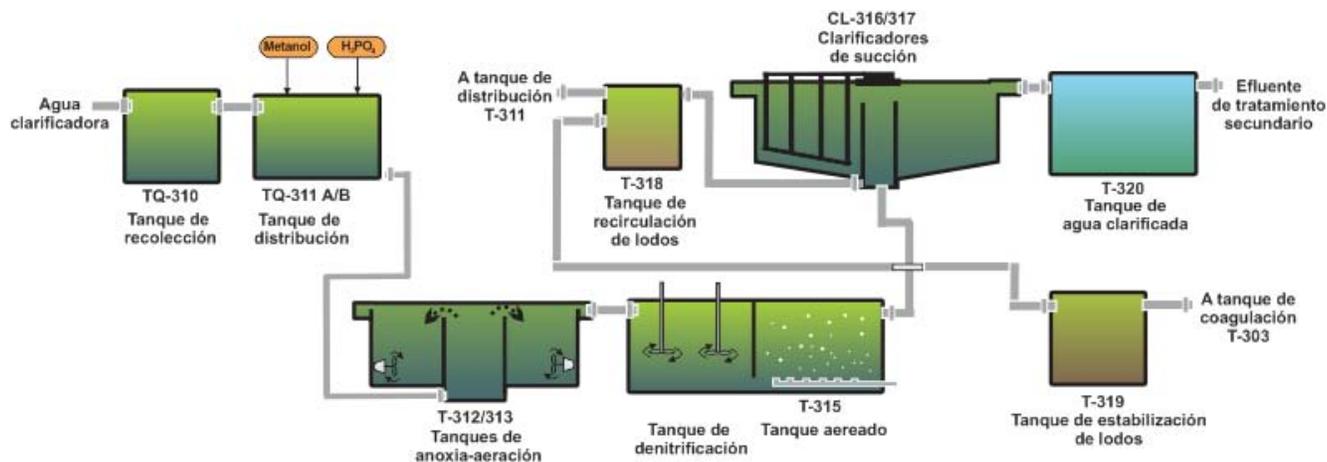
El efluente proveniente de los sediflotazur es recibido en el tanque de recolección T-310 y después enviada al tanque de distribución T-311 A/B donde la corriente se distribuye y se adiciona metanol y ácido fosfórico para posteriormente alimentar a los tanques de anoxia - aeración T-312/313 donde se realiza las depuraciones biológicas eliminando el nitrógeno amoniacal ($N-NH_4$) mediante el proceso de nitrificación-desnitrificación por lodos activados, utilizando un tanque de anoxia-aeración con recirculación interna de licor mezclado.

La desnitrificación tiene como objetivo la disminución de la concentración de nitritos que se obtienen después de la nitrificación



El efluente de los tanques T-312/313 es recibido al tanque de desnitrificación T-314 donde los nitratos producidos provenientes de la zona de aeración son reducidos a nitrógeno molecular, el licor mezclado se desnitrifica en condiciones de anoxia y agitación lenta. Se elimina la posibilidad de desnitrificación en los clarificadores. El efluente proveniente del proceso de desnitrificación pasa al tanque de reactivación T-315 donde se le es suministrado oxígeno con el fin de evitar la fermentación de los lodos en el fondo de los clarificadores.

El siguiente proceso en el tren de tratamiento se lleva a cabo en los clarificadores de succión CL-317/316 donde por medio de la decantación del agua se separan los lodos contenidos en la corriente proveniente del proceso de reactivación. El agua proveniente de los clarificadores es recolectada en el tanque de agua clarificada T-320 para su disposición de diversos servicios, por otra parte los lodos extraídos de los clarificadores son enviados al tanque de recirculación de lodos T-318 para ser enviados al tanque de distribución, los lodos en exceso son recolectados en el tanque de estabilización de lodos biológicos y recirculados al tanque de coagulación T-303.



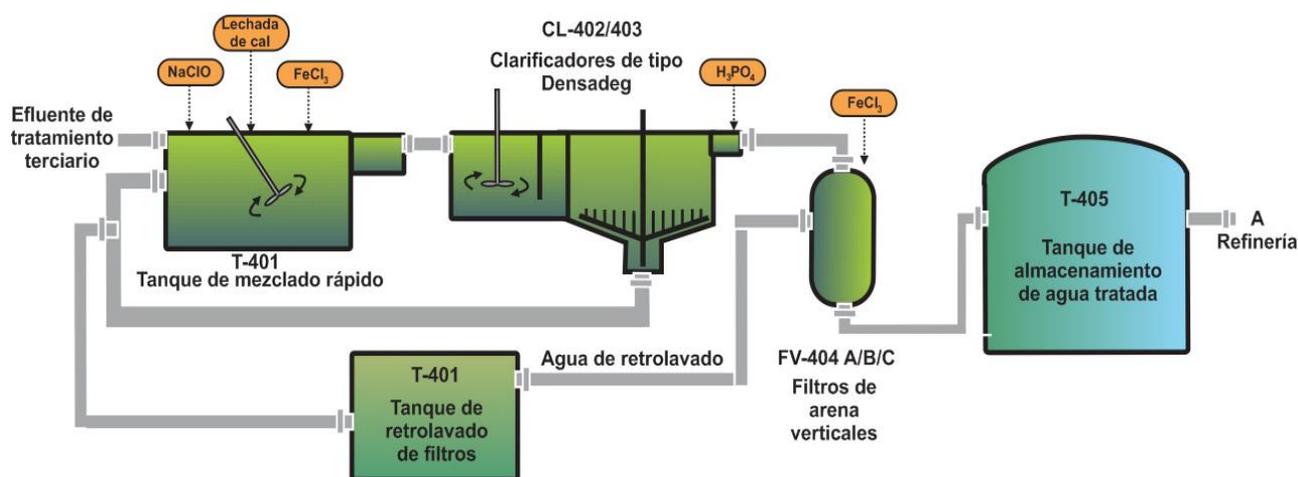
Fuente: Elaboración propia

Figura 1.21 Sistema de tratamiento secundario



6.1.1.3 TRATAMIENTO TERCIARIO

El agua proveniente del tanque de agua clarificada llega al tanque de mezclado rápido T-401 donde se mezcla con carbonato de sodio, lechada de cal, cloruro férrico, los lodos recirculados del densadeg y la recirculación de agua de retrolavado, después se envía a los clarificadores de tipo Densadeg donde los carbonatos y una parte del calcio y el magnesio son reducidos, el efluente del sistema de Densadeg pasa a los filtros de arena FV-404 A/B/C donde se elimina la turbidez especialmente los flóculos ligeros que pudiesen quedar después de los clarificadores secundarios, el efluente del sistema terciario es almacenado temporalmente en el tanque de agua tratada T-405 para su posterior disposición de diversos servicios y envío hacia la refinería.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.22 Sistema de tratamiento terciario

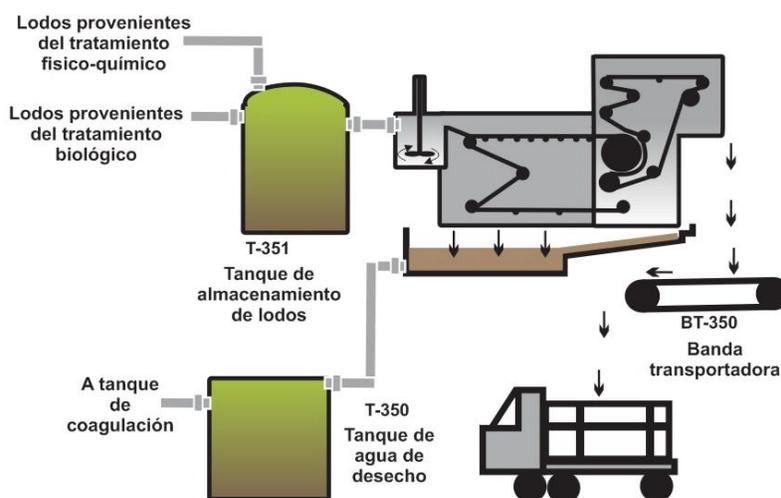
6.1.1.4 TRATAMIENTO DE LODOS

Los lodos provenientes del tratamiento biológico y del tratamiento fisicoquímico es depositado al tanque de almacenamiento de lodos T-351, posteriormente pasa al



sistema de deshidratación (Superpressed) FB-350 donde se elimina el agua presente en los lodos extraídos del tratamiento fisicoquímico y biológico de la PTAR.

El sistema de tratamiento de lodos está conformado por un tanque de agua de desecho T-350 el cual contiene el agua recuperada de lavado de las bandas así como el agua filtrada proveniente de los lodos para que sea recibida hacia el tanque de coagulación.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.23 Sistema de tratamiento de lodos

6.2 Estado actual del caso de estudio

6.2.1 Tecnologías implementadas en la PTAR

OXIDACIÓN DE SULFUROS

Objetivo: Garantizar el buen funcionamiento del tratamiento biológico (Sulfuros inhibidores de actividad biológica).

Funcionamiento: Oxidación de iones sulfuros a tiosulfatos y sulfatos por inyección de aire en presencia de un catalizador (SOSA), la eliminación se realiza precipitándolos como sales de hierro.



Estado actual: Fuera de operación

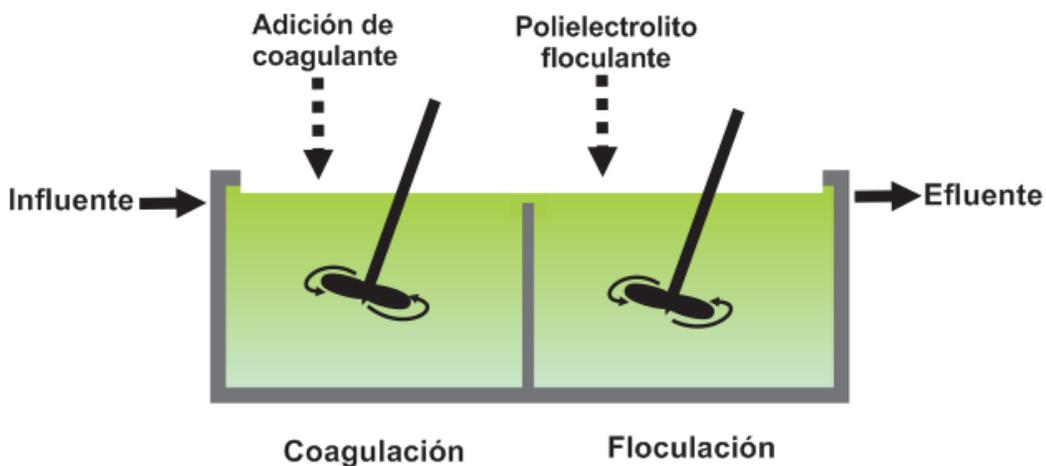
TAG	Información	Dimensiones	Equipo adicional
T-302	-----	Largo: 8 m Ancho: 8 m Altura total: 6.5 m Volumen útil: 316 m ³ Construcción: concreto	Sopladores Capacidad: 2500 Nm ³ /h Potencia motor: 93.2 kW

Fuente: (AQUA SISTEMA, 2000)

COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN

Objetivo: Se dosifica cloruro férrico para disminuir la concentración residual de sulfuros en el agua.

Funcionamiento: Se realiza la coagulación dosificando un polímero como coagulante orgánico y polímero para favorecer la floculación.



Estado actual: Los agitadores no funcionan por lo que no se lleva a cabo la formación de floculos de forma adecuada.

Fuente: Elaboración propia

Figura 1.24 Sistema de coagulación-floculación



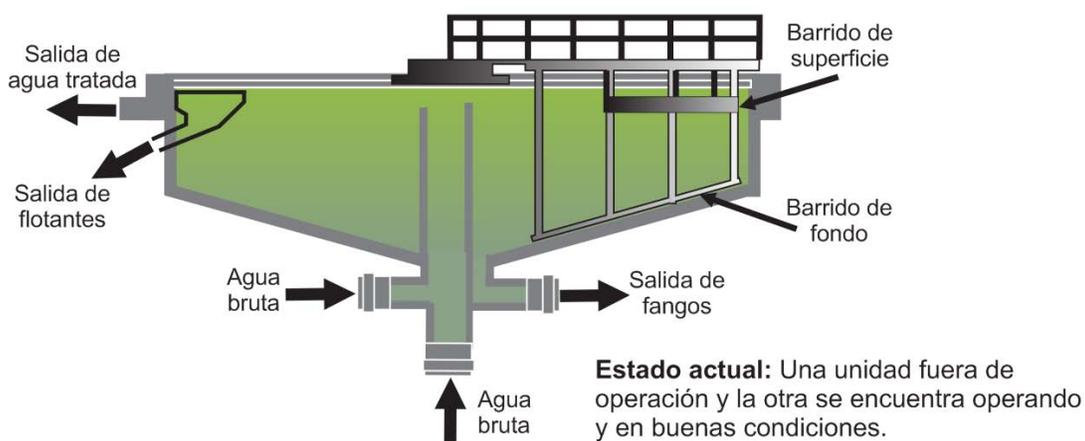
TAG	Información	Dimensiones	Equipo adicional
T-303	Tanque agitado con un tiempo de residencia de 6 minutos.	Largo: 5 m Ancho: 3 m Altura total: 3.2 m Volumen útil: 40m ³ Construcción: concreto	Diámetro hélice 1997/432 mm Potencia motor 2.23 kW Velocidad 68 r.p.m.
T-304	Tanque agitado con tiempo de residencia de 5 minutos	Largo 3.8 m Ancho 3 m Altura total 3.2 m Volumen útil 36.5 m ³ Construcción: concreto	Agitador vertical Diámetro de hélice: 1219/660 mm Potencia de motor: 0.75 kW Velocidad 68 r.p.m.

Fuente: (AQUA SISTEMA, 2000)

FLOTADORES (SEDIFLOTAZUR)

Objetivo: Remoción de materia en suspensión

El sediflotazur es un flotador circular, tiene un doble dispositivo de barrido de lodos, en la superficie y en el fondo. Por lo tanto, se adapta perfectamente al tratamiento de aguas que producen al mismo tiempo lodos separables por flotación y lodos pesados, únicamente sedimentables



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.25 Sediflotazur



TAG	Información	Dimensiones	Equipo adicional
CL-305/306	Asegura el proceso de flotación a una velocidad ascensorial de 3.5 m/h Tiempo de residencia: 40 minutos	Diámetro: 8 m Altura cilíndrica: 2.25 m Volumen útil: 156.5 m ³ Construcción: concreto	Compresor Capacidad 25 Nm ³ /h Presión 7-9 Kg/cm ² Potencia motor: 3.73 kW

Fuente: (AQUA SISTEMA, 2000)

TANQUE DE ANOXIA-AERACIÓN

Objetivo: Eliminación de nitrógeno amoniacal

Funcionamiento: El proceso consiste en una desnitrificación y nitrificación por lodos activados

Estado actual: Operando

TAG	Información	Dimensiones	Equipo adicional
A-312/313	El tiempo de residencia es de 91 minutos	Diámetro: 13.5 m Altura total: 4.58 m Volumen útil: 546 m ³ Construcción: concreto	Agitadores sumergibles Diámetro hélice: 350 mm Potencia de motor: 3kW Velocidad: 860 r.p.m.

Fuente: (AQUA SISTEMA, 2000)

DESNITRIFICACIÓN

Objetivo: Remover el nitrógeno presente en el agua a tratar.

Funcionamiento: El licor mezclado se desnitrifica en esta etapa del proceso en condiciones anóxicas y agitación lenta

Estado actual: Operando



TAG	Información	Dimensiones	Equipo adicional
T-314	En condiciones anoxia y agitación lenta. Tiempo de residencia 43 minutos	Largo: 16 m Ancho: 8.5 m Altura total: 4.87 m Volumen útil: 521 m ³ Construcción: concreto	Agitadores verticales Diámetro hélice: 2524 mm Potencia motor: 7.45 kW Velocidad 45 r.p.m.

Fuente: (AQUA SISTEMA, 2000)

TANQUE DE REAERACIÓN

Objetivo: Para evitar la producción de sedimentos anaerobios en el fondo de los clarificadores

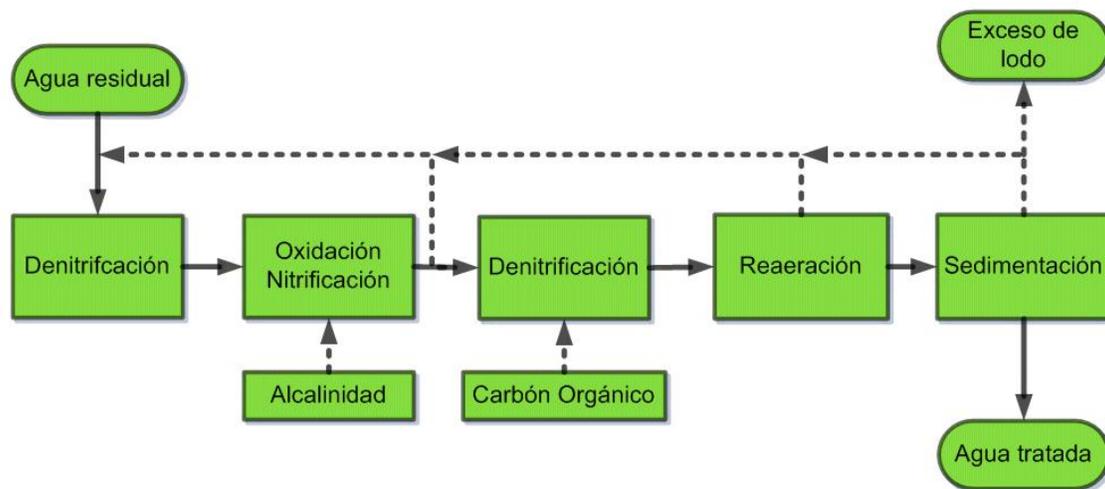
Funcionamiento: Se realiza mediante un soplador y los difusores ubicados a lo largo del tanque

Estado Actual: Operando

TAG	Información	Dimensiones	Equipo adicional
T-315	Tanque aerado mediante un soplador	Largo : 8.5 m Ancho: 3.8 m Altura total: 4.87 m Volumen útil: 123 m ³ Construcción: concreto	Tanque aerado mediante un soplador

Fuente: (AQUA SISTEMA, 2000)

Remueve DBO y se realiza el proceso de desnitrificación. El proceso desarrollado se muestra en la Figura 1.26, donde el agua re alimentada para promover la denitrificación utilizando la DBO para maximizar la remoción de nitrógeno llegando a una eficiencia del 90% (Overseas Environmental Cooperation Center, Japan, 2003).



(Overseas Environmental Cooperation Center, Japan, 2003)

Figura 1.26 Proceso de desnitrificación con recirculación de lodos

CLARIFICADOR DENSADEG

Objetivo: Reducir los carbonatos y parte de calcio y magnesio presentes en el agua a tratar.

Funcionamiento: Se mezclan las siguientes corrientes: Efluente del tratamiento secundario, lodos recirculados de los Densadeg, los reactivos como cloruro férrico y cal. Se lleva a cabo la floculación y el proceso de suavización.

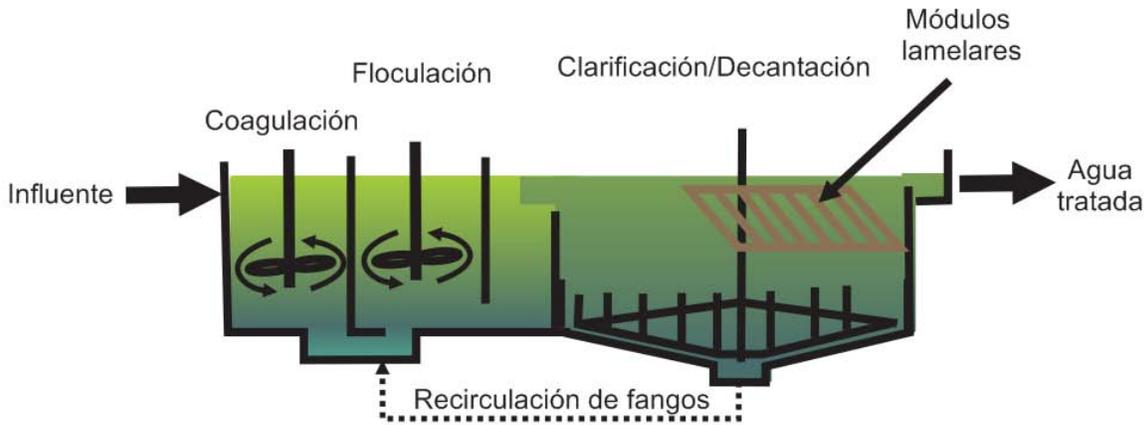
Este sistema de altas tasas combina floculación optimizada, recirculación interna y externa de lodo y espesamiento en dos recintos conjuntos para maximizar las eficiencias de rendimiento.

Características:

- Uso altamente eficiente de productos químicos
- Opciones flexibles. Personalizado para cualquier plan de tamaño
- Volumen 10 veces menor contra sistemas de sedimentación
- Sin necesidad de equipo adicional de espesamiento



- Remoción de TOC perfeccionada con ablandamiento



Estado actual: Operando en buenas condiciones.

Fuente: Elaboración propia

Figura 1.27 Clarificador-Espesador Densadeg

TAG	Información	Dimensiones	Equipo adicional
CL-402/403	Constituido por una cámara de reacción y un tanque de decantación laminar y concentración de lodos. Tiempo de residencia de 15 minutos	Largo: 3.45 m Ancho: 3.45 m Altura total: 5.06 m Volumen útil: 54 m ³ Construcción: concreto	Agitador de eje vertical Diámetro hélice: 1200 mm Potencia motor: 3kW Velocidad: 11.9/58.6 r.p.m.

Fuente: (AQUA SISTEMA, 2000)

FILTROS ARENA

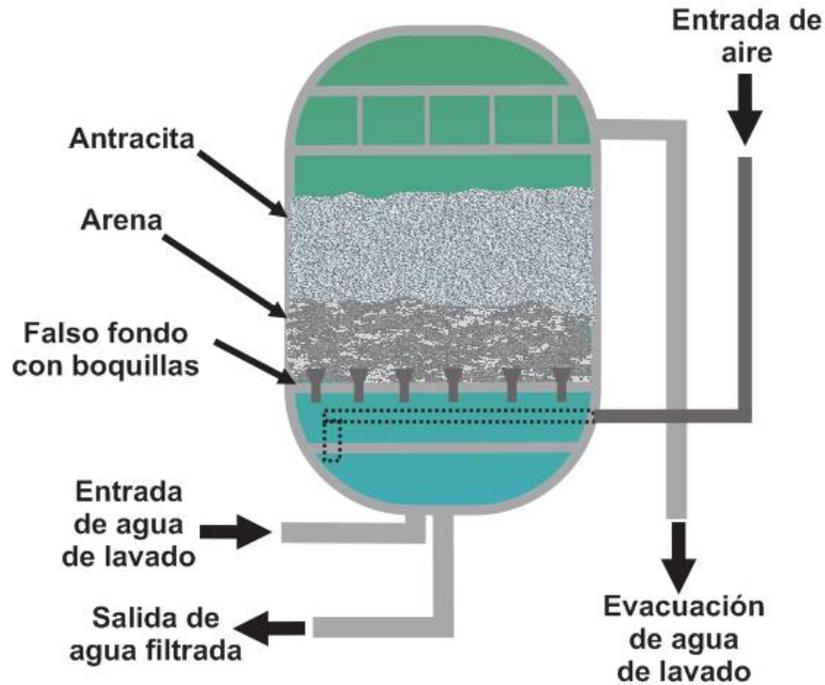
Objetivo: Elimina la turbiedad

Funcionamiento: El agua acondicionada con ácido sulfúrico se filtra sobre arena en 3 filtros de arena verticales a presión.

Este tipo de filtros son rápidos, doble capa cuyos diferentes pares de granulometría de antracita y de arena se eligen en función del tipo de filtración practicado. Están



diseñados para retener materias muy granuladas y densas o cantidades importantes de materias en suspensión.



Estado actual: Las tres unidades se encuentran en buenas condiciones y operando.

Fuente: Elaboración propia

Figura 1.28 Sistema de filtración a presión

TAG	Información	Dimensiones	Equipo adicional
FVC-404 A/B/C	3 filtros de arena vertical a presión	Diámetro: 4 m Altura cilíndrica: 2.2 m Presión de operación 3 kg/cm ² Material: acero al carbón Medio filtrante: arena granulometría	

Fuente: (AQUA SISTEMA, 2000)



FILTROS BANDA

Objetivo: Deshidratación de los lodos provenientes del tratamiento biológico y del tratamiento físico químico

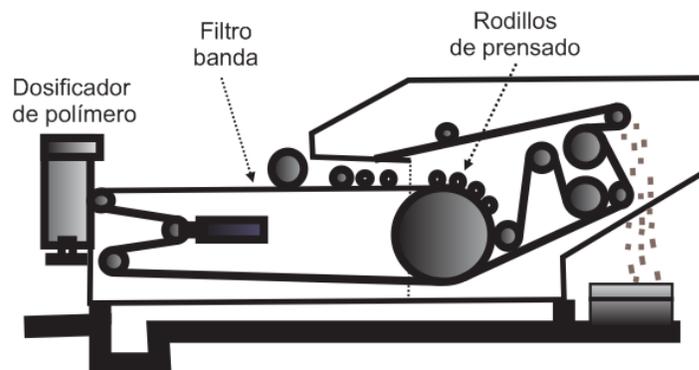
Funcionamiento: Los lodos mezclados con el polímero son depositados sobre la tela donde se reduce el contenido de agua de los lodos

Este sistema de filtración se adapta a instalaciones de pequeña o mediana escala. La aplicación de los filtros banda para la deshidratación de lodos reside en la “superfloculación”

Tabla 1.15 Sistema de deshidratación de lodos

TAG	Información	Dimensiones	Equipo adicional
FB-350	Modelo Superpress	Largo: 4.92 m Altura: 2 m Material de la tela: poliéster de alto espeso	Agitador floculador: 0.5 HP Dos bombas centrífugas para lavado de telas 267 LPM

Fuente: (AQUA SISTEMA, 2000)



Estado actual: Actualmente se encuentra en malas condiciones y fuera de operación

Fuente: Elaboración propia

Figura 1.29 Sistema de filtros banda



6.2.2 Calidad del efluente del agua de Refinería

Tabla 1.16 Calidades de afluente y efluente de la PTAR (Diseño y actual)

Parámetro	Unidades	Especificaciones operaciones de diseño		Calidad del agua en el periodo 2013-2014	
		AFLUENTE	EFLUENTE	AFLUENTE	EFLUENTE
Caudal	m ³ /h	360	-----	180	-----
pH	Unidades de pH	6 a 9	7.6	8.3	7.9
Temperatura	°C	29 - 35	27	28.8	29
Conductividad	µS/cm	1000 - 2300	420	2873.3	2918
Turbidez	NTU	NE.	NE	118.8	2.54
DBO5	mg/L	39 - 110	23	273.5	20.32
DQO	mg/L	100 - 370	91	273.5	80.3
Fosfatos	mg de PO ₄ ³⁻ /L	0 - 3	0.5	0.48	0.22
Nitrógeno amoniacal	mg/L	33 - 69	0.4	63.5	1.95
SST	mg/L	27 - 70	1	23.5	1.48
SDT	mg/L	500 - 1200	325	1578.1	1422.81
Grasas y aceites	mg/L	10	0	6.5	---
Cloruros	mg/L		300	582.4	557
Sulfatos	mg/L	150 - 200	100	289	352.95
Sulfuros	mg/L	8 a 64	NE	0	0
Alcalinidad total	mg de CaCO ₃ /L	100 - 200	150	229	270
Dureza total	mg CaCO ₃ /L	100-400	155	421.9	208.74
Dureza calcio	mg CaCO ₃ /L	60-280	100	337.63	160.4
Dureza magnesio	mg CaCO ₃ /L	40-120	55	82.7	46.1
Sílice	mg SiO ₂ /L	1 a 7	15	24.67	20.36
Fenoles	mg/L	0.14	0	0.75	0.1

Fuente: UNAM 2009, 2013-2014



El caudal del diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales es de 360 m³/h pero actualmente la PTAR opera a un 50% de su capacidad nominal.

Con la calidad del efluente de la PTAR recabada en el periodo 2013-2014 se observan las fallas actuales respecto a la remoción de contaminantes en la planta, comparando la concentración de contaminantes que debería presentar el efluente con la del escenario de diseño, se puede saber que la concentración en el efluente de sulfatos rebasa un 71.7% a la concentración máxima permitida en la calidad requerida para torres de enfriamiento, que trae consigo daños a los sistemas de enfriamiento que se muestra en la Tabla 1.18, la oxidación de sulfuros y sulfatos en el agua residual se realiza en el tanque de oxidación donde por medio de la oxidación empleando un catalizador (sosa) se lleva a cabo la precipitación de estos compuestos como sales de hierro, este proceso actualmente no lleva a cabo la distribución de aire ya que los sopladores se encuentran fuera de operación disminuyendo la eficiencia de remoción de contaminantes en esta etapa del tren de tratamiento de agua residual.

Otros parámetros que exceden los límites permisibles de acuerdo al diseño son la conductividad que se sobrepasa aproximadamente el 85% debido a que la concentración de sales en el afluente de la PTAR es elevada, los Sólidos Suspendidos Totales están a una concentración de 1.48 mg/L cuando debería ser 1 mg/L (32.5% más de lo permitido), el efluente presenta una concentración de 1423 mg/L de Sólidos Disueltos Totales excediendo un 77.2% la concentración máxima permitida para su posterior disposición en la refinería. De acuerdo a los operadores de la PTAR no se está llevando a cabo la separación de grasas y aceites en la planta por lo que esto ha repercutido en el proceso biológico y la concentración de lodos tanto en el reactor de anoxia como en el sistema Densadeg son un problema inminente.

La dureza es otro parámetro que no cumple con la calidad requerida en la refinería ya que sobrepasa un 25% de la concentración máxima, lo cual puede provocar corrosión tanto en tuberías como en equipos. El agua tratada de la PTAR es



suministrada como repuesto a torres de enfriamiento de la Refinería por lo que este efluente debe de cumplir con las calidades requeridas para este servicio (Tabla 1.17).

Tabla 1.17 Calidad de agua de repuesto a torres de enfriamiento.

Parámetro	Unidades	Agua de repuesto a torres de enfriamiento
pH	---	7 - 7.6
Turbidez	NTU	1
Grasas y aceites	mg/L	0
Solidos Disueltos Totales (SDT)	mg/L	1000
Dureza total como CaCO ₃	(mg/L CaCO ₃)	200
Solidos suspendidos totales	mg/L	2
Bicarbonato	(mg/l CaCO ₃)	100
Carbonato	(mg/l CaCO ₃)	0
Sílice como SiO ₂	mg/L	50
Sodio	mg/L	0
Sulfato	mg/L	100
Alcalinidad como CaCO ₃	(mg/l CaCO ₃)	100
Cloruro	mg/L	100
Conductividad	(μS/cm)	1400
Magnesio como CaCO ₃	(mg/l CaCO ₃)	20
Manganeso	(mg/l)	0.075
Nitrato + Nitrito	(mg/l)	S.R.
Fosfato	(mg/l)	0.44

Fuente: UNAM 2013

Los problemas que comúnmente se presentan en los sistemas de torres de enfriamiento son ocasionados por distintos contaminantes presentes en el agua de suministro, por ende la calidad del efluente de la PTAR debe de cumplir con la calidad requerida y así evitar daños en los equipos y tuberías del sistema.



Tabla 1.18 Problemas ocasionados por distintos contaminantes en el sistema de enfriamiento de la refinería

Parámetro	Problemas ocasionados
Dureza	Provoca incrustaciones en tuberías
Cloro libre	Provoca la corrosión en los equipos de enfriamiento al formar compuestos con la combinación del Cl ⁻
Sulfatos	Aumenta el contenido de sólidos en el agua, Se combina con calcio para formar sales incrustantes de sulfato de calcio.
Sílice	Incrustación en intercambiadores de calor y tuberías
Sólidos disueltos	Elevadas concentraciones de sólidos son indeseables debido a que originan formación de lodos
Sólidos suspendidos	Originan depósitos en equipos intercambiadores de calor y tuberías, ocasionan formación de lodos e incrustaciones.

6.3 Problemáticas

Se tienen diversas desviaciones en el estado y funcionamiento actual de la PTAR con respecto al diseño y por ello tanto cualitativamente como cuantitativamente el efluente de la PTAR ha disminuido, las principales problemáticas se describen a continuación.

Actualmente la PTAR está trabajando a un 50% de su capacidad debido al mal funcionamiento de la mayoría de los equipos como resultado de la falta de mantenimiento preventivo y predictivo.

El tren de tratamiento posee un sistema de oxidación de sulfuros, pero el afluente de la PTAR no contiene la concentración mínima establecida en el contrato (8 mg/L)



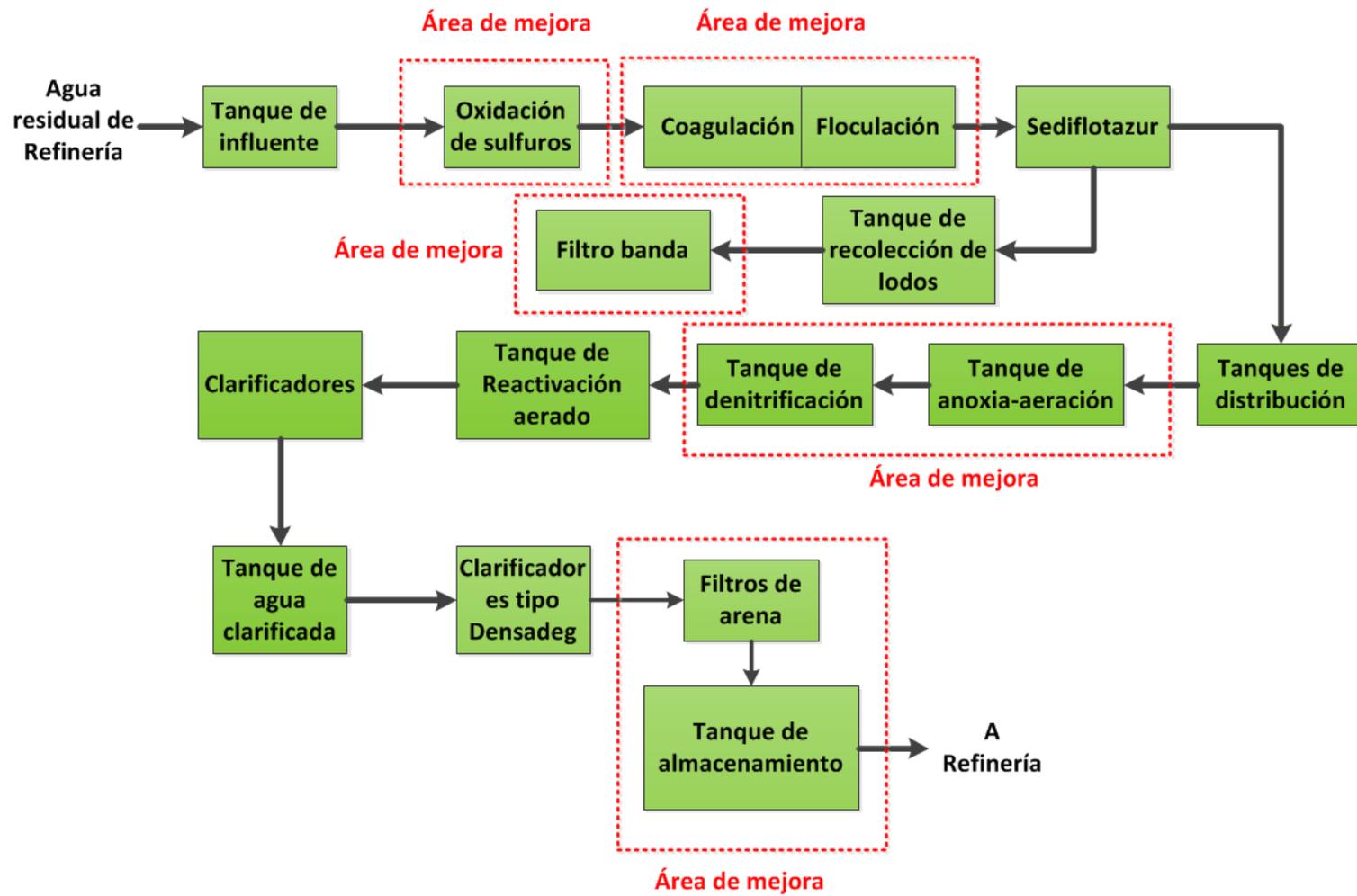
de dicho compuesto, por lo que esta parte del tratamiento se encuentra fuera de servicio, a pesar de esto la dosificación de cloruro férrico al inicio del tren de tratamiento se sigue llevando a cabo. En el proceso de coagulación floculación no se está llevando a cabo la agitación para lleva a cabo este tratamiento de formación de flóculos.

El tratamiento y disposición de los lodos residuales por parte de la planta de tratamiento del agua residual se encuentra fuera de operación debido al mal estado de los equipos electromecánicos y poco mantenimiento dado al filtro banda.

El efluente de la refinería lleva consigo un alto contenido de fenoles que no son removidos en la PTAR debido al mal funcionamiento del sistema terciario que da como resultado un bajo porcentaje de remoción de este contaminante.

Sólo el 20% del sistema de tratamiento está automatizado lo cual conlleva a un escaso control del proceso y un retardado en el hallazgo de los problemas referente a la operación de la planta, además de una inadecuada dosificación de químicos, por lo que este último se realiza de forma manual afectando la eficiencia de la planta.

Después de haber analizado y evaluado el estado actual de la PTAR se pudieron identificar distintas áreas de mejora donde se puede llevar a cabo una rehabilitación o modernización (Figura 1.30-Figura 1.31) tomando en cuenta datos de diseño y las características del agua tratada que requiere de refinería.

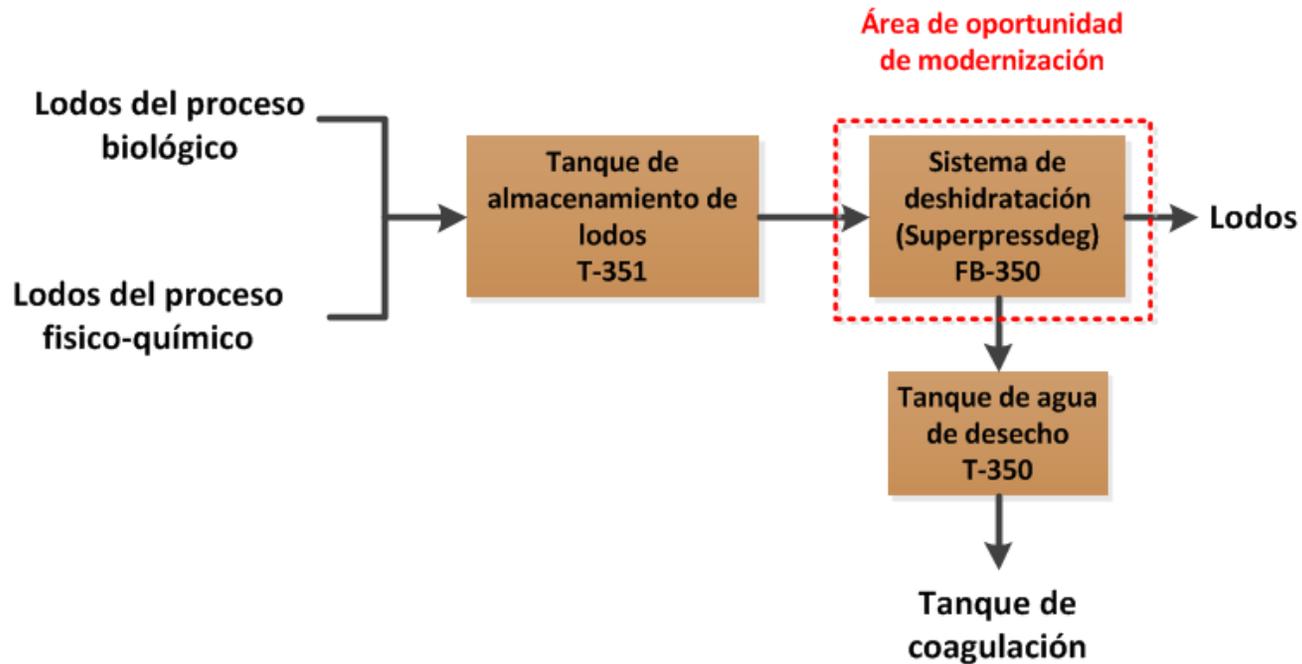


Fuente: Elaboración propia

Figura 1.30 Áreas de mejora o modernización de la Planta de Tratamiento de Agua Residual



El proceso para el tratamiento de lodos, provenientes del proceso biológico y físico-químico, consiste en una deshidratación con un sistema de filtros banda donde el agua de desecho es reintegrada a la planta de tratamiento, mientras que los lodos concentrados son enviados a disposición por un tercero.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.31

Áreas de mejora o modernización del Sistema de Tratamiento de Lodos



6.4 Propuestas de solución

Para la modernización y el mejoramiento del desempeño de la PTAR se propone la implementación de un proceso de oxidación avanzada utilizando la infraestructura ya existente del tratamiento de oxidación de sulfuros que se encuentra fuera de operación. La oxidación avanzada proporciona una remoción de fenoles que son el principal contaminante presente en el afluente de la PTAR.

Los procesos de Oxidación Avanzada están basados en la generación de especies reactivas tales como los radicales hidroxilo ($\text{OH}\cdot$) que oxidan un amplio rango de contaminantes orgánicos de manera efectiva y no selectiva.

Las ventajas de estos procesos son las siguientes:

- Transforman y destruyen químicamente el contaminante hasta la mineralización
- No generan subproductos que requieran posterior procesamiento
- Son muy útiles para contaminantes refractarios que resisten otros métodos de tratamiento, principalmente el biológico
- Operan en intervalos donde los sistemas convencionales no son factibles
- Son ideales para preparar las corrientes a tratamientos convencionales, aumentan la biodegradabilidad.

En los últimos años se ha incrementado el número de investigaciones han evaluado los AOP's combinados con procesos biológicos para tratar ciertos tipos de aguas residuales (García Gámez Celestino, 2011); estas técnicas se aplican por ejemplo para la eliminación de fenoles y plaguicidas, por mencionar los ejemplos más representativos.

Las AOP's se basan en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes debido a que involucran la generación y uso de especies transitorias con un elevado poder oxidante como el radical hidroxilo ($\text{HO}\cdot$). Este radical puede ser generado por varios medios y es



altamente efectivo para la oxidación de materia orgánica, en especial aquella que no es biodegradable. Algunas AOP recurren, a reductores químicos que permiten realizar transformaciones de contaminantes tóxicos poco susceptibles a la oxidación como iones metálicos o compuestos halogenados.

Para la disposición de los lodos generados en la etapa secundaria y terciaria, se plantea la adquisición de un nuevo equipo de filtro banda ya que el que el actual llegó al término de vida útil, principalmente por falta de mantenimiento.

En el tratamiento secundario no se está llevando a cabo la remoción adecuada de contaminantes. De acuerdo a los datos históricos de calidad del agua tratada en la PTAR, se tiene una alta concentración de nitrógeno amoniacal; la propuesta de modernización para este paso en el tren de tratamiento es implementar un sistema MBR o un sistema PACT que son modificaciones y mejoras que se le ha hecho al sistema de lodos activados que actualmente trabaja en la PTAR.



7 ANÁLISIS MULTICRITERIO

El uso del análisis criterio tiene como objetivo el realizar una selección más completa entre varias alternativas teniendo en cuenta aspectos técnicos, económicos y ambientales.

7.1 METODOLOGÍA

El análisis multicriterio como el nombre lo dice consiste en la evaluación de los diferentes escenarios en este caso propuestas de mejora tecnológica, como primer punto se seleccionan los criterios a tomar en cuenta para la evaluación técnica, ambiental y económica de cada tecnología. La evaluación multicriterio debe cumplir con los puntos que se mencionan en la Figura 1.32.



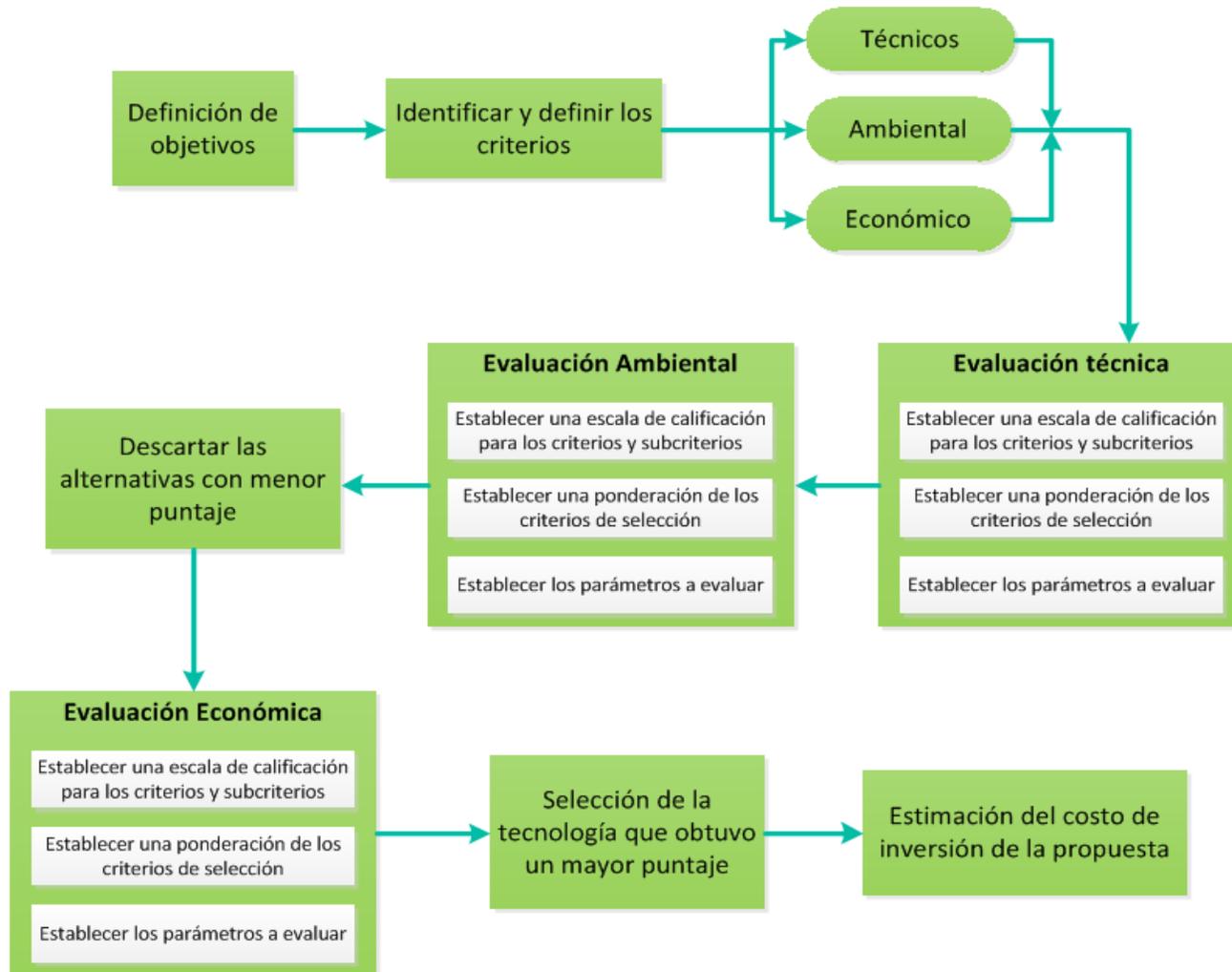
Figura 1.32 **Objetivos de la evaluación multicriterio**

La eficiencia de remoción de contaminantes es de suma importancia para la evaluación de opciones tecnológicas de tratamiento de aguas. A, la rentabilidad de



la tecnología es referida a la flexibilidad de la tecnología para trabajar a pesar de cambios en el afluente y entregar un efluente bajo la calidad requerida. La sustentabilidad financiera es un factor importante ya que al ser menos costosa la tecnología habrá mayores posibilidades de ser implementada pero este criterio no suele ser decisivo.

Los criterios técnicos se toman en cuenta para garantizar que se cumpla una eficiencia en la remoción de contaminantes, condiciones de operación de la tecnología a implementar e insumos requeridos.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.33 Metodología para la evaluación de propuesta



Para la evaluación de las diferentes propuestas se llevó a cabo el uso del análisis multicriterio que se muestra en la Figura 1.33, es una metodología que con ayuda de distintos criterios sirve como herramienta para ver todos los factores a tomar en cuenta para la selección de la propuesta más factible, engloban criterios técnicos, ambientales y económicos en los que se les dará el peso como se muestra en la Tabla 1.19

Tabla 1.19 Peso de los distintos criterios en el Análisis multicriterio

Criterios	Peso
Técnicos	40
Ambientales	15
Económicos	45
TOTAL	100

El peso asignado a los criterios ambientales es de 15% ya que la implementación de una planta de tratamiento de aguas residuales tiene impactos positivos al ambiente y no es de relevancia significativa en la toma de la decisión para este caso de estudio, se le asignó un 40% a la parte técnica ya que es muy importante que las tecnologías cumplan con los requerimientos para el tratamiento del agua residual y sea factible su implementación, para los criterios económicos se dio un peso de 45%, ya que aunque las propuestas sean técnicamente factibles, si económicamente no se puede llevar a cabo, no se puede implementar, por tal razón este criterio se le asignó el mayor peso de los tres.

A continuación se enlistan los diferentes criterios y subcriterios a tomar en cuenta para el análisis multicriterio, que de acuerdo al peso asignado, dará la opción más factible.



Criterios Técnicos

Características técnicas del proceso

- Especificaciones técnicas del proceso
- Eficiencia de remoción de contaminantes
- Intervalo de flujo en el cual el sistema es aplicable
- Espacio requerido para su instalación y futuras aplicaciones
- Especificaciones de los insumos necesarios para que la tecnología opere eficientemente)
- Generación de residuos (características físicas, químicas y microbiológicas)
- Especificaciones de servicios auxiliares (tipo, consumo y disponibilidad)

Características específicas de la tecnología

- Disponibilidad de la tecnología (nacional o extranjera)
- Capacidad de ampliación de la tecnología

Criterios Ambientales

- Impacto ambiental debido a los lodos residuales generados
- Producción de ruido
- Emisiones de compuestos peligrosos al medio ambiente
- *Emisiones de CO₂*

Criterios económicos

Costo de la tecnología

- Costo de la instalación, materiales y equipos de construcción
- Costo de la mano de obra para la construcción

Costo de operación y mantenimiento

- Costo de los insumos
- Costo anual de energía consumida



- Costo de los equipos adicionales para el funcionamiento de la tecnología
- Costo de mantenimiento

Estos subcriterios se tomaron en cuenta para ser utilizados para la evaluación de las diferentes opciones para el tratamiento de fenoles presentes en el efluente de la PTAR.

Los siguientes criterios se tomaron en cuenta para realizar el análisis multicriterio de las distintas alternativas para la modernización tecnológica de la PTAR con el objetivo de cumplir con los requerimientos para su uso en los sistemas de torres de enfriamiento de la refinería.

Al tener definidos los criterios y subcriterios que a tomar en cuenta para la evaluación de las propuestas, la ponderación que se le otorgó a cada subcriterio se muestra en la Tabla 1.20 más adelante de acuerdo a la información disponible. Posteriormente, con el empleo del software *MindDecidese* llevó a cabo la evaluación.

Tabla 1.20 Escalas de evaluación de subcriterios

	Unidad	Valores	Descripción
Eficiencia de remoción de contaminantes	%	1-100	Muestra la eficiencia de remoción de contaminantes reportados en la bibliografía
Intervalo de flujo de operación	Puntaje	1-2	1. Aplicable a pequeña escala 2. Aplicable desde flujo de dispositivos de laboratorio hasta a flujos a nivel industrial
Condiciones de operación	Puntaje	1-3	1. Requiere de muchas especificaciones para operar 2. Requiere de pocas condiciones de especificaciones de operación 3. No requiere de muchas especificaciones para operar



	Unidad	Valores	Descripción
Tolerancia de variación de flujo	Puntaje	1-3	1. Baja tolerancia a las variaciones de flujo 2. Tolerancia media a las variaciones de flujo 3. Alta flexibilidad para variaciones de flujo
Capacidad de ampliación	Puntaje	1-2	1. Baja capacidad de ampliación 2. Capacidad media de ampliación 3. Alta tolerancia a ampliaciones
Consumo de energía	Puntual	Valor	Cantidad de kWh que consume la tecnología reportada en la bibliografía
Flexibilidad en condiciones críticas	Puntaje	1-3	1. Baja flexibilidad para trabajar en condiciones críticas 2. Flexibilidad media para trabajar en condiciones críticas 3. Alta flexibilidad para trabajar en condiciones críticas
Insumos necesarios	Puntaje	1-2	1. Requiere de insumos (Químicos) 2. No requiere de insumos
Generación de residuos	Si/No	Si/No	1. No 2. Si
Espacio requerido	Puntaje	1-2	1. Espacio pequeño 2. Espacio grande
Servicios Auxiliares	Si/No	Si/No	1. No 2. Si

7.2 Planteamiento y análisis de alternativas

El efluente de la Refinería presenta altas concentraciones de fenoles que en gran medida afecta al sistema de tratamiento de aguas residuales de la refinería impidiendo que cumpla con la calidad requerida de agua para repuesto de torres de enfriamiento y como consecuencia genera problemas y desgaste de este sistema de enfriamiento.



Como medida de modernización y resolución de esta problemática se tiene como alternativa la implementación de un sistema de oxidación avanzada que puede ser aplicada para la eliminación de fenoles y otros contaminantes no biodegradables.

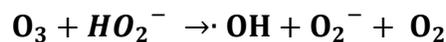
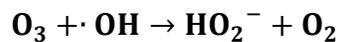
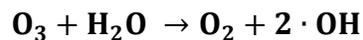
7.2.1 Proceso AOP

Los procesos de oxidación avanzada (AOP, por sus siglas en inglés), se basan en la generación del radical hidroxilo para la degradación de contaminantes presentes en el agua. A continuación se describen los más comunes:

OZONIZACIÓN (O₃)

La ozonización es ampliamente utilizada en el tratamiento de aguas residuales. Permite la eliminación de compuestos tanto orgánicos como inorgánicos, reduciendo el TOC, olor, color, sabor y turbidez así como compuestos refractarios (sustancias tóxicas y compuestos farmacéuticos) (Universidad de Alcalá, 2008). Es necesaria su generación “in situ” (descargas eléctricas silenciosas) su costo inicial es alto.

Las reacciones que se llevan a cabo son las siguientes:



Especificaciones de los insumos necesarios para que la tecnología opere eficientemente

Ozono



Generación de residuos (características físicas, químicas y microbiológicas)

Genera compuestos de mayor polaridad



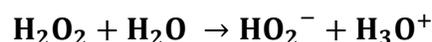
Fuente: (1)(Sunni Kommineni, 2010). (2) (Ofrero, 2005). (3)(Osorio, 2010)

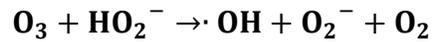
Figura 1.34 Información general de la ozonización

H₂O₂/O₃

La ozonización transforma los contaminantes en compuestos más simples. Se logra una mejoría agregando agua oxigenada. El H₂O₂ es un ácido débil, un poderoso oxidante y un compuesto inestable. El uso de dos o más oxidantes combinados permite aprovechar los posibles efectos sinérgicos entre ellos, lo que produce una destrucción adicional de la carga orgánica (Doménech, 2012).

Las reacciones que se llevan a cabo son las siguientes:





Fuente: (1) (Suni Kommineni, 2010). (2) (Ofrero, 2005). (3) (Naresh, 2010)

Figura 1.35 Información general de ozonización con peróxido de hidrógeno

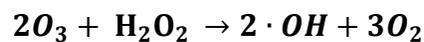
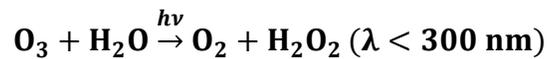
O₃/UV

La irradiación de ozono en agua produce H₂O₂ en forma cuantitativa. El peróxido de hidrógeno generado se fotoliza a su vez genera radicales OH y reacciona con el



exceso de ozono, generando también radicales OH. El uso de ozono implica siempre altos costos de capital y equipamiento para la destrucción de ozono remanente, problemas de seguridad y salud, así como limitaciones de transferencia de masa por la baja solubilidad del O₃ en agua, así como el peligro del escape a la atmósfera de VOC's causado por el burbujeo del reactivo.

Las reacciones que se llevan a cabo son las siguientes:





Fuente: (1) (Sunil, 2010). (2) (Hofman, 2010). (3) (Beltrán, 2010). (4) (Naresh, 2010). (5) (Osorio, 2010)

Figura 1.36 Información general de oxidación con O₃/UV

H₂O₂/UV

El uso de UV/peróxido ofrece grandes ventajas: el oxidante es comercialmente muy accesible, es térmicamente estable y puede almacenarse en el lugar. Como posee solubilidad infinita en agua, no existen problemas de transferencia de masa asociados a gases. Como en el caso del ozono. La inversión de capital es mínima y la operación es simple. La tecnología ha sido utilizada con éxito en la remoción de contaminantes presente en aguas y efluentes industriales, incluyendo organoclorados alifáticos, aromáticos, fenoles (clorados y sustituidos) (Doménech Xavier).

Las reacciones que se llevan a cabo por este medio son las siguientes:





Fuente: (1) (Sunil, 2010). (2) (Hofman, 2010). (3) (Naresh, 2010). (4) (Osorio, 2010)

Figura 1.37 Información general de oxidación con H₂O₂/UV

Los costos asociados al tratamiento de oxidación avanzada se enlistan en la Tabla 1.21, de los cuales se enlistan costos de inversión, costos fijos, costos variables, entre otros.



Tabla 1.21 Costos de tratamiento de oxidación avanzada (\$ USD/100 gal de agua tratada)

	H2O2/O3	O3/UV	H2O2/UV	O3
Costo \$/1000 galones	0.84	38.549	308.482	1.2023
Inversión Inicial				
Reactor AOP	750,000	6,080,000	13,200,000	34,000
Tubería, válvulas, ing. Eléctrica	225,000	1,820,000	3,960,000	10,200
Sitio	75,000	608,000	1,320,000	3,400
Ingeniería	181,125	1,470,000	3,190,000	8,210
Contingencia	27,775	2,250,000	4,890,000	12,600
Costos fijos				
Partes de reemplazo	11,250	1,280,000	2,780,000	50,100
Labor	57,920	59,400	38,900	45,400
Análisis	41,600	72,800	31,200	41,600
Costos variables				
Químicos	9,461	0	31,500,000	0
Eléctrico	9,461	2,840,000	6,170,000	1,090

Fuente: (Beltrán, 2010) & (Sunil, 2010)



En la Tabla 1.22 se enlistan tanto ventajas como desventajas de las diferentes propuestas de oxidación avanzada, las cuales se usaron para realizar el análisis técnico en la evaluación multicriterio de las tecnologías.

Tabla 1.22 Procesos de Oxidación Avanzada (Ventajas-Desventajas)

Oxidación avanzada	Ventajas	Desventajas	Fiabilidad	Flexibilidad	Adaptabilidad	Energéticamente eficiente	Potencial para modificarse	Facilidad de implementación
H₂O₂/O₃	*Más efectivo que el O ₃ o H ₂ O ₂ por separado *Tecnología establecida para aplicaciones de remediación	*Potencial de formación de bromatos *Puede requerir tratamiento del off/gas de ozono	Alta	Alta	Media	Media	Baja	Alta
O₃/UV	*Más eficiente en la generación de radicales •OH que el proceso de H ₂ O ₂ /UV para la misma concentración de oxidantes	*Alto consumo de energía *Potencial de formación de bromatos *La turbiedad puede interferir en la penetración de rayos UV *La difusión de ozono puede presentar limitaciones de transferencia de masa *Compuestos como los nitratos pueden absorber los rayos UV	Media	Alta	Baja	Baja	Baja	Alta



Oxidación avanzada	Ventajas	Desventajas	Fiabilidad	Flexibilidad	Adaptabilidad	Energéticamente e eficiente	Potencial para modificarse	Facilidad de implementación
H₂O₂/UV	<ul style="list-style-type: none"> *Sin potencial de formación de bromatos *No requiere tratamiento de los gases de salida *No presenta limitaciones por la transferencia de masa 	<ul style="list-style-type: none"> *La turbiedad puede interferir con la penetración de la luz UV *Limitado estequiométricamente en la formación de •OH *Compuestos como los nitratos pueden absorber la luz UV 	Media	Alta	Baja	Media	Media	Alta
O₃	<ul style="list-style-type: none"> *Alto poder de oxidación *Efectivo para un alto rango de contaminantes *Aplicable a escala a nivel industrial 	<ul style="list-style-type: none"> *Alto consumo de energía *Altos costos de operación *Riesgo por la generación de ozono 	Media	Alta	Alta	Media	Media	Alta

Fuente: (Kommineni, 2005)



Para el análisis ambiental se tomaron en cuenta los valores y la información reportada en la Tabla 1.23

Tabla 1.23 Cuestiones ambientales de los Tratamientos de Oxidación avanzada

	H ₂ O ₂ /O ₃	O ₃ /UV	H ₂ O ₂ /UV	O ₃
Impacto ambiental debido a los residuos generados	El H ₂ O ₂ tiene la capacidad de oxidar la materia orgánica	Los bromatos a altas concentraciones tienen un impacto ambiental	El H ₂ O ₂ tiene la capacidad de oxidar la materia orgánica	No genera residuos
Producción de ruido	Moderado	Moderado	Bajo	Moderado
Emisiones de compuestos peligrosos al medio ambiente	Bromatos ⁽²⁾ y peróxido de hidrógeno	Bromatos ⁽²⁾	Peróxido de hidrógeno	Peróxido de hidrógeno
Generación de malos olores	No	No	No	No
Generación de fauna nociva	No	No	No	No
Emisiones de CO₂ (Toneladas)⁽¹⁾	91.40	177.50	38,542.00	25.50

(1) El valor de las emisiones de CO₂ se tomó del factor de emisión eléctrico por la cantidad de kWh reportado para cada tecnología (GEI México, 2013)

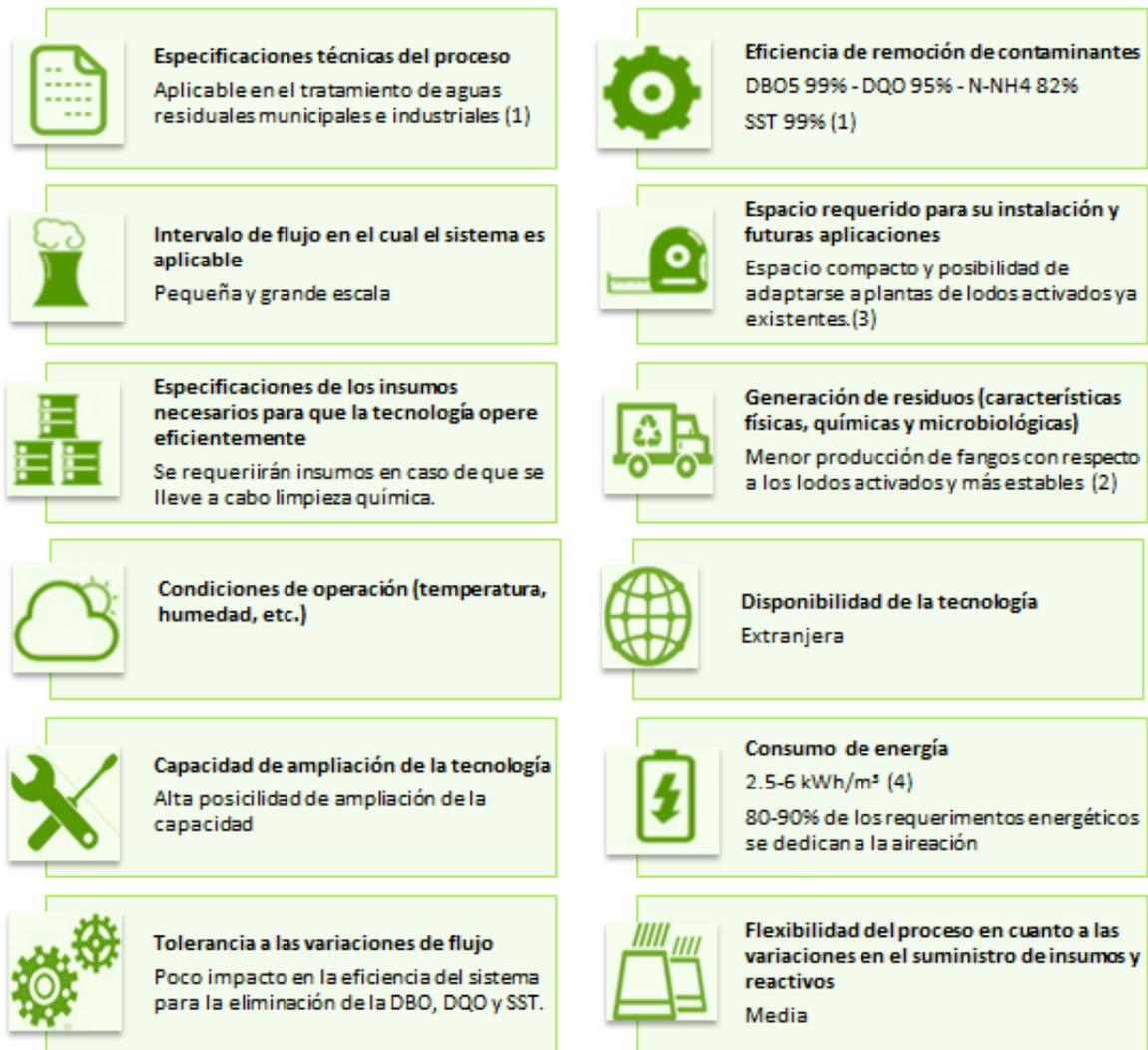
(2) La formación de bromatos se lleva a cabo con presencia de bromuros; está relacionada con la acción oxidante del ozono para convertir bromuros en bromatos tras un tiempo de contacto y dosificaciones altas de ozono (Albicker, 2002)



7.2.2 Tratamientos secundarios

Reactor MBR

Este tratamiento combina un proceso de depuración biológica con una filtración por membrana la cual retiene prácticamente la totalidad de los sólidos en suspensión, la biomasa y otros microorganismos presentes, logrando un efluente con una alta calidad (F.J. Vizcaya Lozano, 2006).





Fuentes: (1) (El agua, 2008), (2) (Salher, 2012), (3) (Centro Canario del Agua, 2003) (4) (Reutilización de agua depurada mediante reactores biológicos de membrana (MBR), 2014)

Figura 1.38 Información general del reactor MBR

El funcionamiento de este sistema es sencillo, primero el agua a tratar se bombea al reactor donde los microorganismos depuradores degradan la materia orgánica presente en el agua residual a tratar, después la membrana separa los sólidos en suspensión y evita que la biomasa sea arrastrada con el efluente. El proceso de degradación se lleva a cabo en condiciones aerobias, por lo que existe un continuo burbujeo. El exceso de lodos se extrae del reactor, mientras que la biomasa retenida por la membrana vuelve al reactor. Además se lleva un control y monitoreo del aire disuelto en el reactor y la diferencia de presión como se muestra en la Figura 1.39.

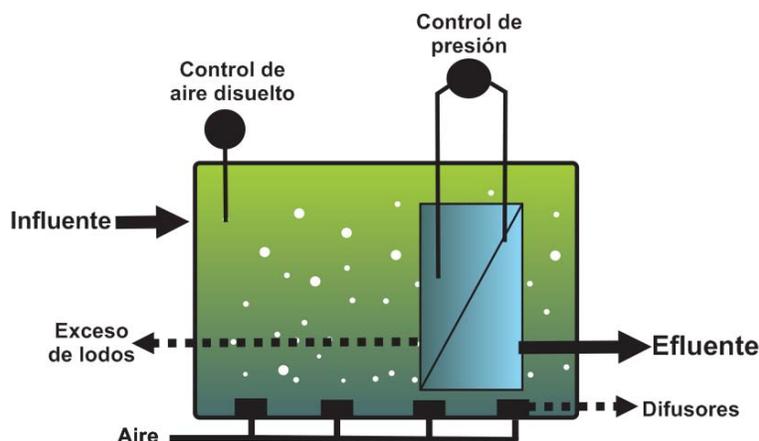


Figura 1.39 Sistema MBR

Más del 98% de los sistemas de separación donde se utiliza el sistema MBR se complementa con un proceso biológico aerobio, 55% adaptan la configuración de membrana sumergida dentro del biorreactor mientras que un 45% adopta la configuración de membrana externa al biorreactor.

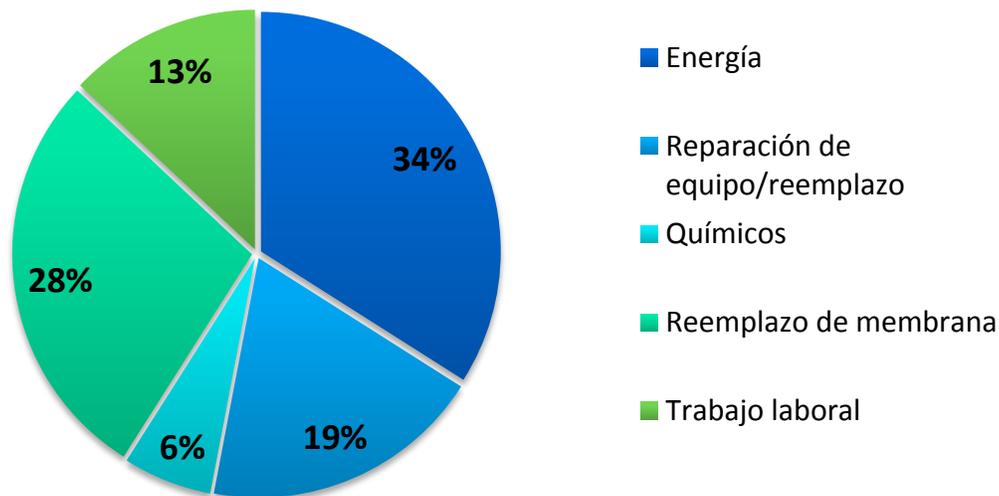


(Zakir Hirani, 2013)

Tabla 1.24 Costos sistema MBR

Capacidad (L/d)	Costo total \$USD/año	Costos totales de operación y mantenimiento \$USD/año	Costo total \$USD/L
3,780	738,000-943,000	218,000-302,000	7.6-9.7
18,900	2,099,000-2,523,000	974,000-1,323,000	6.3-7.9

La principal demanda de energía en un sistema MBR es en el suministro de aire y en el lavado de las membranas que son de 35% y 38% respectivamente con respecto a la demanda total de energía en la tecnología.



(Hiran et al. 2009)

Figura 1.40 Distribución de costos en el sistema MBR

Sistema PACT

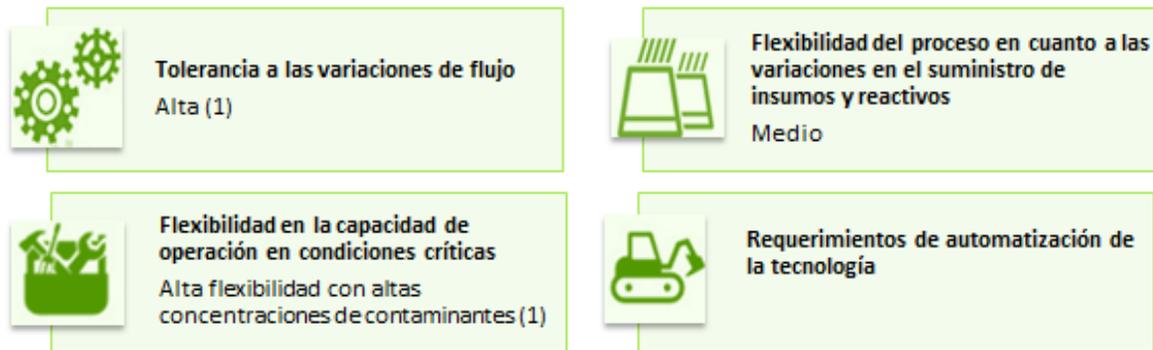


El sistema PACT (powder activated carbon treatment) ofrece varias ventajas en términos de ofrecer un agua tratada con alta calidad con un bajo costo. El esquema de este sistema es similar al de lodos activados convencionales, la diferencia es que en el tanque de aeración agrega carbón activado en polvo, con lo cual se logra los contaminantes orgánicos son removidos mediante:

- Asimilación biológica y oxidación
- Adsorción con el carbón activado

La combinación de estos dos mecanismos operando de manera simultánea produce un efluente con alta calidad.





Fuentes: (1) (El agua, 2008), (2) (Salher, 2012), (3) (Cecen Fernan, 2012), (4) (SIEMENS, 2014)

Figura 1.41 Información general del sistema PACT

El agua a tratar entra al tanque de aeración donde entra en contacto con una mezcla de carbón/microorganismos. El agua residual y la mezcla salen del tanque de aeración y entran al sistema de clarificación donde los sólidos son decantados y regresados al reactor biológico. Una porción del licor sedimentado en el clarificador es removido como lodos. En sistemas de tratamiento a gran escala puede existir un sistema de regeneración con aire húmedo (WAR) que se implementa para la regeneración del carbón activado presente en los lodos extraídos de los clarificadores, llegando a una reducción de la disposición de lodos a un 90% (Siemens Water Technologies, 1992), siendo esto uno de los ventajas de este sistema de tratamiento secundario.

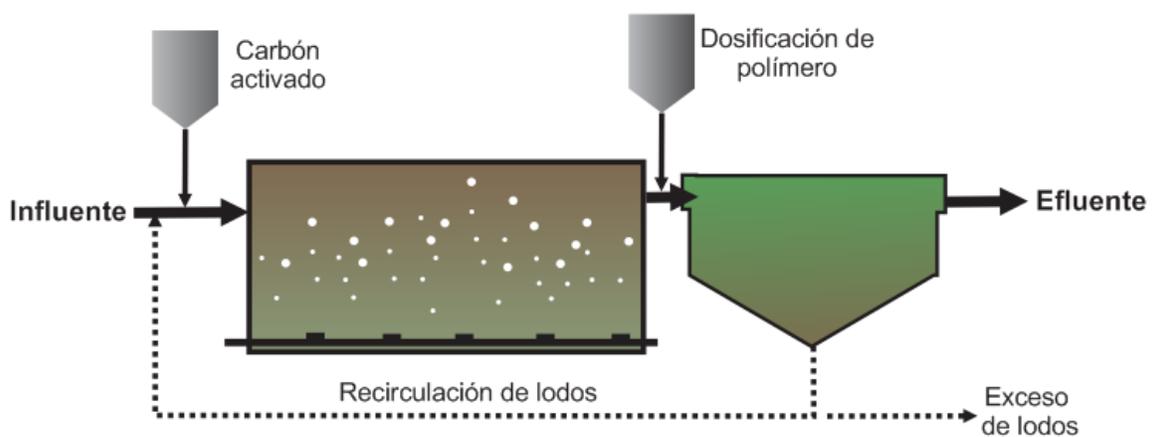


Figura 1.42 Sistema PACT



Tabla 1.25 Costos sistema PACT

Capacidad (L/d)	Costo total \$USD	Costos totales de operación y mantenimiento \$USD/año
18,900	9,861	2,347,000

(SIEMENS, 1992)

Sistema de lodos activados

Los microorganismos se mantienen en suspensión de 4-8 horas en un tanque de aireación por medio de mezcladores mecánicos o aireación con el propósito de evitar sedimentos y homogenizar la mezcla de las bacterias con el agua a tratar, después el licor mixto se envía a un clarificador para separar el agua depurada de los lodos.

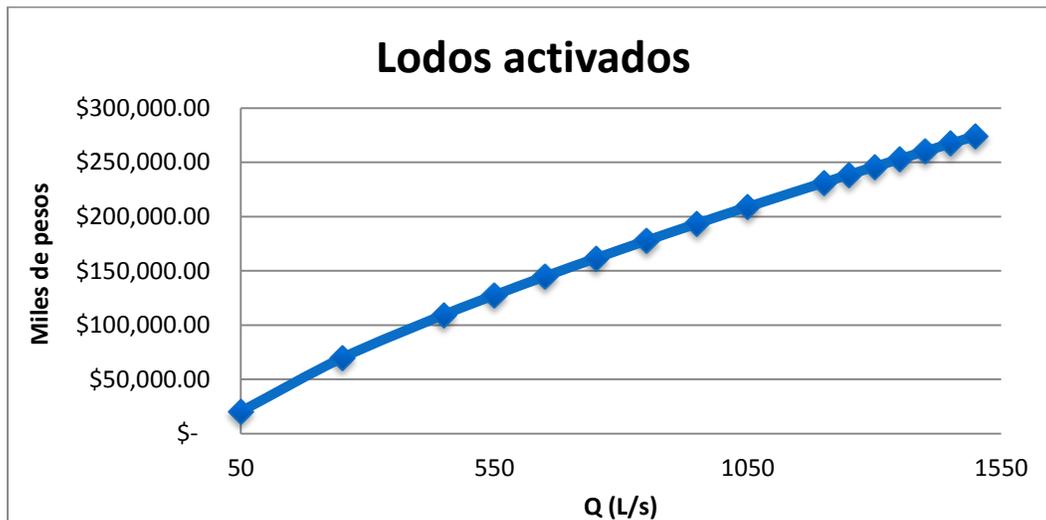




(CONAMA, 2013)

Figura 1.43 Información general del sistema de lodos activados

La siguiente gráfica muestra los costos de la tecnología de lodos activados convencionales recolectada de distintas plantas a lo largo del país. Los costos de inversión están expresados en pesos mexicanos de 2002.



Fuente: (Mantilla, 2002)

Figura 1.44 Costo de inversión del sistema de lodos activados convencional



En la Tabla 1.26 se enlistan los aspectos técnicos de los tres tratamientos secundarios a evaluar para ser implementados en la PTAR, se tomó en cuenta en la comparación el sistema de lodos activados que actualmente se encuentra operando en la planta de tratamiento de agua residual, para hacer notar las ventajas y desventajas con respecto a las otras dos propuestas.

Tabla 1.26 Características técnicas de los sistemas de tratamiento secundario

Tecnología	Ventajas	Desventajas	Fiabilidad	Flexibilidad	Adaptabilidad	Potencial para modificarse	Facilidad de implementación
MBR	<ul style="list-style-type: none"> *Dimensiones compactas Flexibilidad de operación *La dosificación de nutrientes puede ser regulada, minimizando la formación de lodos excedentes *No necesita sistema de clarificación *Efluente con muy buena calidad y baja turbidez, agua con calidad para ósmosis inversa *Limpieza in-situ simplifica el sistema y el mantenimiento *Diseño simple y eficiente 	<ul style="list-style-type: none"> Elevado costo de implantación y explotación. *Alto costo en los reemplazos de membranas *Altos costos por consumo energético *Reemplazo de membrana de 3 a 5 años *Se requiere de manejo y disposición del concentrado obtenido. 	ALTA	ALTA	ALTA	MEDIA	MEDIA



Tecnología	Ventajas	Desventajas	Fiabilidad	Flexibilidad	Adaptabilidad	Potencial para modificarse	Facilidad de implementación
PACT	<ul style="list-style-type: none"> *La mayor parte del carbón utilizado en este proceso es reciclado junto con el lodo *Remueve color *Remueve contaminantes no biodegradable. *Flexible con el cambio en la concentración de los contaminantes del agua a tratar *Produce menos sólidos para disposición Adsorbe alguno metales 	<ul style="list-style-type: none"> *Costos altos de instalación *Requiere un tratamiento para el carbón activado desgastado para su regeneración, el cual implica aumento en los costos de operación. 	ALTA	ALTA	MEDIA	BAJA	MEDIA
LODOS ACTIVADOS	<ul style="list-style-type: none"> *Flexibilidad a través de un control de la biomasa presente en el proceso *Los lodos generados son altamente mineralizados por lo que no requieren de tratamiento posterior *Se puede incorporar desnitrificación al proceso. *Generación de lodos secundarios estabilizados. 	<ul style="list-style-type: none"> *La capacidad de carga orgánica es limitada *Requiere mayor mantenimiento *Requiere de una aireación continua, lo que se traduce en altos costos de operación por concepto de energía eléctrica 	MEDIA	MEDIA	ALTA	MEDIA	ALTA

Fuente: (Salher, 2012) & (El agua, 2008) & (Cecen Fernan, 2012) & (SIEMENS, 2014) & (Centro Canario del Agua, 2003)



La Tabla 1.27 resume los criterios ambientales que se tomaron en cuenta para el análisis multicriterio, donde los criterios fueron calificados de forma cualitativa de acuerdo a la información recolectada para cada sistema.

Tabla 1.27 Criterios ambientales de los sistemas biológicos.

CRITERIOS	MBR	PACT	LODOS ACTIVADOS
Impacto ambiental residuos	Bajo	Bajo	Medio
Producción de ruido	Alto	Medio	Bajo
Emisiones de compuestos peligrosos	Bajo	Medio	Medio
Generación de olores	Medio	Medio	Medio
Generación de fauna	Bajo	Bajo	Medio
Emisiones de CO₂ (Toneladas)⁽¹⁾	25.00	12.00	7.50

(1) El valor de las emisiones de CO₂ se tomó del factor de emisión eléctrico por la cantidad de kWh reportado para cada tecnología (GEI México, 2013)



7.2.3 Tratamiento terciario

Ósmosis Inversa

Alta aplicación en la eliminación de impurezas iónicas tales como: nitratos, fosfatos, sulfatos, iones metálicos, coloides, compuestos orgánicos y microorganismos. En la industria se emplean para la generación de aguas con baja salinidad como tratamiento terciario.

 <p>Especificaciones técnicas del proceso Tecnología usada ampliamente para el tratamiento de aguas residuales industriales</p>	 <p>Eficiencia de remoción de contaminantes 99% Sales, materia orgánica, iones y bacterias</p>
 <p>Intervalo de flujo en el cual el sistema es aplicable Amplios rangos de operación Capacidad máxima de 9000 m³/d (1)</p>	 <p>Espacio requerido para su instalación y futuras aplicaciones Requiere de un pretratamiento</p>
 <p>Especificaciones de los insumos necesarios para que la tecnología opere eficientemente No requiere</p>	 <p>Generación de residuos (características físicas, químicas y microbiológicas) Genera entre un 30-60% de rechazo</p>
 <p>Condiciones de operación (temperatura, humedad, etc.) Temperatura máxima 40-45°C (1)</p>	 <p>Disponibilidad de la tecnología Nacional y extranjera Amplia competencia de fabricantes (1)</p>
 <p>Capacidad de ampliación de la tecnología Amplia</p>	 <p>Consumo de energía 2-6 kWh/m³ (1)</p>
 <p>Tolerancia a las variaciones de flujo Baja</p>	 <p>Flexibilidad del proceso en cuanto a las variaciones en el suministro de insumos y reactivos Alta</p>



Figura 1.45 Información general del sistema de ósmosis inversa

Electrodiálisis

Es una tecnología que utiliza membranas donde se incorporan grupos de cargas. En este proceso la fuerza impulsora es la diferencia de potencial eléctrico.

Está conformado por un conjunto de membranas aniónicas y catiónicas dispuestas en forma alternada.

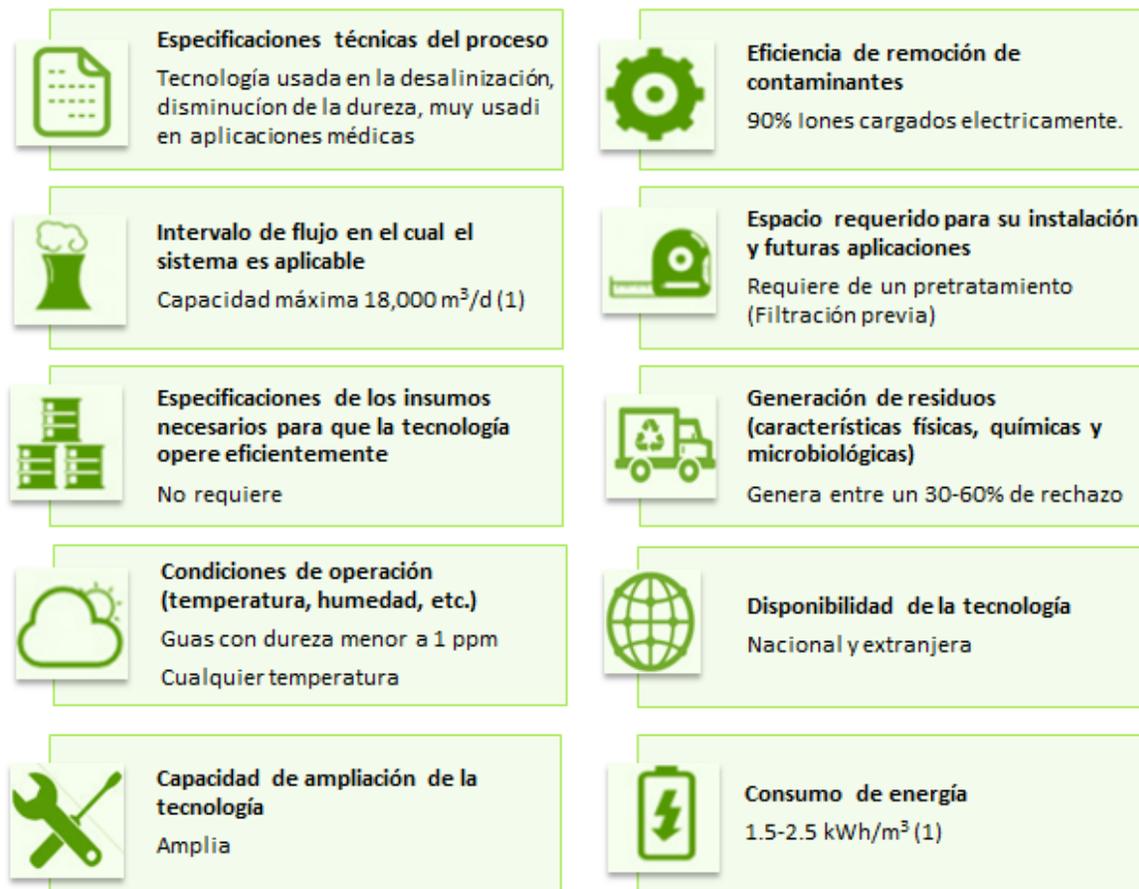




Figura 1.46

Información general del sistema de tratamiento por electrodiálisis



Información técnica de las propuestas de tratamiento terciario en la PTAR se muestran en la Tabla 1.28, donde se remarcan ventajas de desventajas de los dos tratamientos a ser evaluados.

Tabla 1.28 Información técnica de los sistemas terciarios

Tecnología	Ventajas	Desventajas	Fiabilidad	Flexibilidad	Adaptabilidad	Potencial para modificarse	Facilidad de implementación
Ósmosis Inversa	<ul style="list-style-type: none"> *Alta eficiencia *Genera aguas de alta calidad *Capaz de remover todo tipo de contaminantes *Puede tratar grandes volúmenes de agua 	Requiere de pretratamiento Alto consumo de energía Genera entre un 30-60% de rechazo, según la calidad del agua a tratar A pequeñas escalas puede resultar más cara que a mayores escalas	ALTA	MEDIA	MEDIA	MEDIA	ALTA
Electrodiálisis	<ul style="list-style-type: none"> *Puede operar en continuo o batch *Operación simple *Por lo general funciona automáticamente con pocos requisitos de mantenimiento y funcionamiento *Altamente usado para la desmineralización de aguas. 	<ul style="list-style-type: none"> *Lavado de membranas continuamente (10% del agua alimentada al sistema) *Requiere gran cantidad de energía para producir la corriente constante que impulsa la purificación y bombea el agua a través del sistema *Necesita purificación previa 	ALTA	BAJA	MEDIA	BAJA	MEDIA

(CONAMA, 2013) & (MINISTERIO DE SANIDAD Y POLÍTICA SOCIAL, 2009) & (Germán E., 2012)



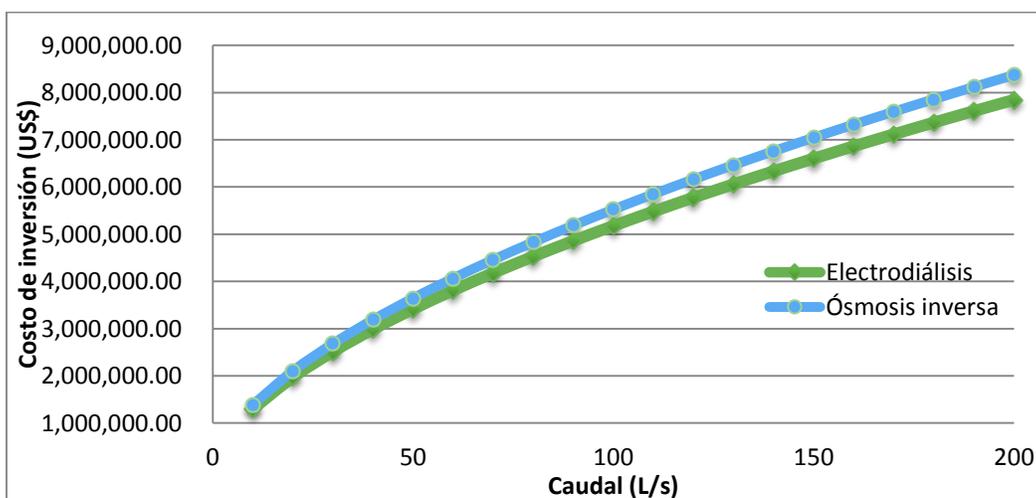
La Tabla 1.29 muestra algunos parámetros ambientales de las tecnologías de electrodiálisis y ósmosis inversa haciendo una comparación de manera cuantitativa.

Tabla 1.29 Criterios ambientales de los sistemas de tratamiento terciario

CRITERIOS AMBIENTALES	ELECTRODIÁLISIS	ÓSMOSIS INVERSA
Impacto ambiental residuos	Bajo	Bajo
Producción de ruido	Medio	Alto
Emisiones de compuestos peligrosos	Bajo	Bajo
Generación de olores	Bajo	Bajo
Generación de fauna	Bajo	Bajo

En la Figura 1.47 se observa cómo va aumentando el costo de inversión mientras aumenta el caudal del agua residual a tratar, mientras el caudal aumenta se ve una diferencia más significativa entre ambas tecnologías, en donde la ósmosis inversa presenta costos más elevados.

Figura 1.47 Costo de inversión de los tratamientos terciarios



(CONAMA, 2013)



7.3 ANÁLISIS MULTICRITERIO

Para el análisis de las distintas propuestas se realizó un análisis multicriterio en el que se tomaron en cuenta los aspectos técnico-ambiental-económico de las distintas propuestas, dicho análisis está descrito en la Figura 1.33. En primer lugar se identifican los criterios que se tomarán en cuenta para la evaluación, se hace una comparación entre los criterios llegando a una jerarquización (criterios y subcriterios), posteriormente se le asigna cierto peso a estos con base en el objetivo y prioridades del proyecto.

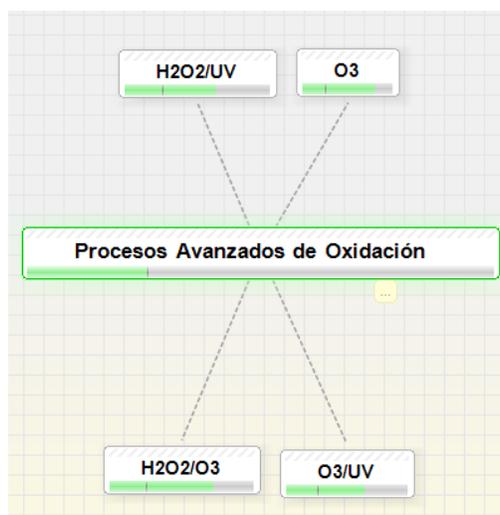


Figura 1.48 Propuestas a evaluar en el análisis multicriterio.

Primero se hace la evaluación técnica seguida de la evaluación ambiental para descartar las propuestas menos factibles en este caso de estudio, para la evaluación técnica se jerarquizaron los subcriterios de la siguiente manera:

1. Eficiencia de remoción de contaminantes
2. Intervalo de flujo de operación
3. Condiciones de operación
4. Tolerancia de variación de flujo
5. Capacidad de ampliación
6. Consumo de energía



7. Flexibilidad en condiciones críticas
8. Insumos necesarios
9. Espacio requerido
10. Servicios Auxiliares
11. Especificaciones técnicas del proyecto

Se le dio mayor peso en comparación con los demás subcriterios a la eficiencia de remoción de contaminantes este el principal objetivo principal del proyecto es la remoción de los contaminantes, seguido del intervalo de flujo de operación ya que la tecnología debe ser capaz de tratar el flujo que llega de la refinería. Las que tiene un peso menor son los servicios auxiliares y especificaciones técnicas del proceso, ya que la planta ya cuenta con los servicios necesarios para la implementación de la tecnología además de que las especificaciones técnicas del proyecto ya fueron visualizadas para la realización de las distintas propuestas.

El programa que se utilizó para realizar el análisis multicriterio es *MindDecider*® una herramienta para la toma de decisiones que utiliza el principio de discriminación o juicios comparativos, la comparación se realiza en una matriz llamada *matriz de comparaciones*, cuya dimensión corresponde al número de criterios (Figura 1.49) que se van a comparar, este método está basada en el proceso del AHP que es uno de los métodos más utilizados en la toma de decisiones.

El proceso AHP es una metodología que tiene tres principios básicos:

- 1.- La determinación de objetivos o metas, seguido de criterios y Subcriterios por último las alternativas.
- 2.- La elaboración de una matriz de comparaciones de criterios.
- 3.- Llevar a cabo la comparación de criterios para asignarles un peso para llevar a cabo la evaluación multicriterio.

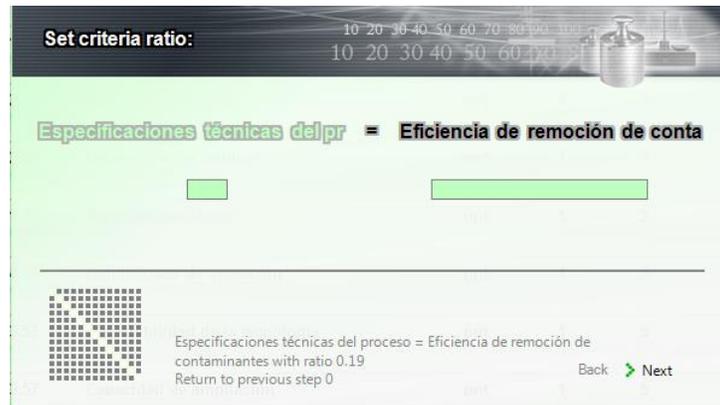


Figura 1.49 Matriz de comparaciones

Análisis Técnico-Ambiental

Después de haber terminado la matriz de comparaciones se tiene el puntaje de cada criterio y el peso que tendrán en la toma de decisión como se muestra en la Figura 1.50, donde los criterios con más peso para el análisis técnico son la eficiencia de remoción de contaminantes, intervalo de operación de la tecnología y las condiciones de operación.

Significance	Criterion name	Units	Min input estimate	Max input estimate
+2.00	Especificaciones técnicas del proceso	pnt	1 No	2 Yes
+5.36	Eficiencia de remoción de contaminantse Comment:	%	0 %	100 %
+4.76	Intervalo de flujo de operación	pnt	1 pnt	2 pnt
-1.19	Espacio requerido	pnt	1 pnt	2 pnt
-2.40	Insumos necesarios Comment:	pnt	1 pnt	2 pnt
-2.00	Generación de residuos	pnt	1 No	2 Yes
+1.19	Servicios auxiliares Comment:	pnt	1 pnt	2 pnt
+4.76	Condiciones de operación	pnt	1 pnt	3 pnt
+2.00	Disponibilidad de la tecnología	pnt	1 Nacional	2 Nacional y extranjero
+2.00	Capacidad de ampliación	pnt	1 pnt	3 pnt
-3.57	Consumo de energía Comment:	MkWh	1 MkWh	600 MkWh
+2.00	Tolerancia a variaciones de flujo	pnt	1 pnt	3 pnt
+2.00	Flexibilidad en condiciones críticas Comment:	pnt	1 pnt	3 pnt

Figura 1.50 Asignación del peso a cada criterio técnico



De acuerdo a la información recopilada de cada tecnología (Tabla 1.5) y en la sección de descripción de las tecnologías, se ingresó el puntaje de cada criterio para cada tecnología y se llevó a cabo el análisis.

En el análisis técnico de las distintas propuestas las tecnologías que obtuvieron mayor porcentaje fueron la ozonización con peróxido de hidrógeno y la ozonización con UV.

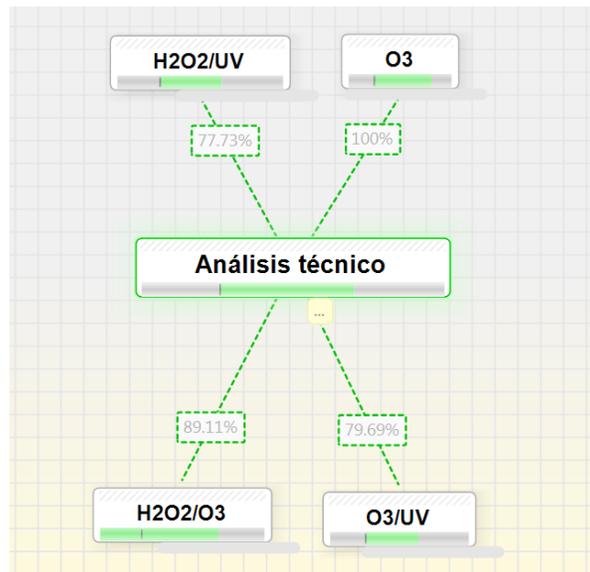


Figura 1.51 Resultado del análisis técnico de las propuesta

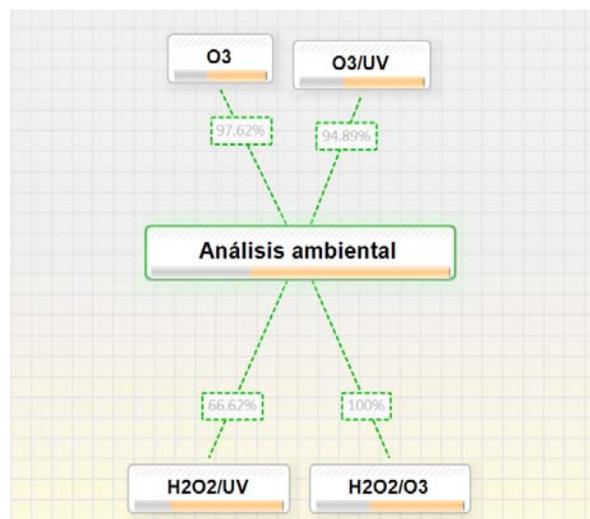


Figura 1.52 Resultados del análisis ambiental de las propuestas



Los resultados de la primera etapa del análisis quedan como se muestra en la siguiente tabla, se lleva a cabo la multiplicación del porcentaje de cada etapa por el peso que tiene cada criterio. Como resultado se descartan las opciones de oxidación avanzada de O₃/UV y H₂O₂/UV.

Tabla 1.30 Resultado del Análisis técnico-Ambiental

Propuesta	Análisis técnico	Puntaje	Subtotal	Análisis ambiental	Puntaje	Subtotal	TOTAL
H ₂ O ₂ /O ₃	89.11%	40	35.644	100%	15	15	50.644
O ₃ /UV	79.69%	40	31.876	94.89%	15	14.2335	46.1095
H ₂ O ₂ /UV	77.73%	40	31.092	67%	15	9.993	41.085
O ₃	100%	40	40	98%	15	14.643	54.643

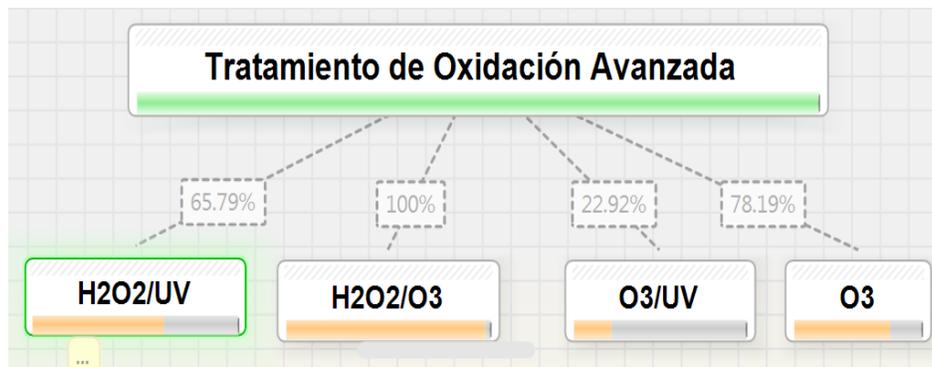


Figura 1.53 Resultado del análisis económico de las propuestas

La propuesta de implementar el proceso de oxidación avanzada H₂O₂/O₃ obtuvo un puntaje de 95.42%, resultando como la propuesta más factible y con mayores beneficios como se muestra en la Tabla 1.31

Tabla 1.31 Resultado global del análisis multicriterio

Propuesta	Análisis técnico	Subtotal	Análisis ambiental	Subtotal	Análisis económico	Subtotal	TOTAL
H₂O₂/O₃	100%	40	69%	10.422	100%	45	95
O₃	97%	38.884	91%	13.707	78%	35.1855	88



Propuestas tratamiento secundario

Para el análisis secundario se evaluaron las tecnologías MBR, Sistema PACT con la tecnología de lodos activados para observar las ventajas y desventajas en los diferentes criterios de cada uno.

Los resultados de la evaluación técnica se muestran en la figura Figura 1.54 en donde las nuevas tecnologías sobresalen por la poca generación de lodos y el alto rango de operación con respecto al de lodos activados.

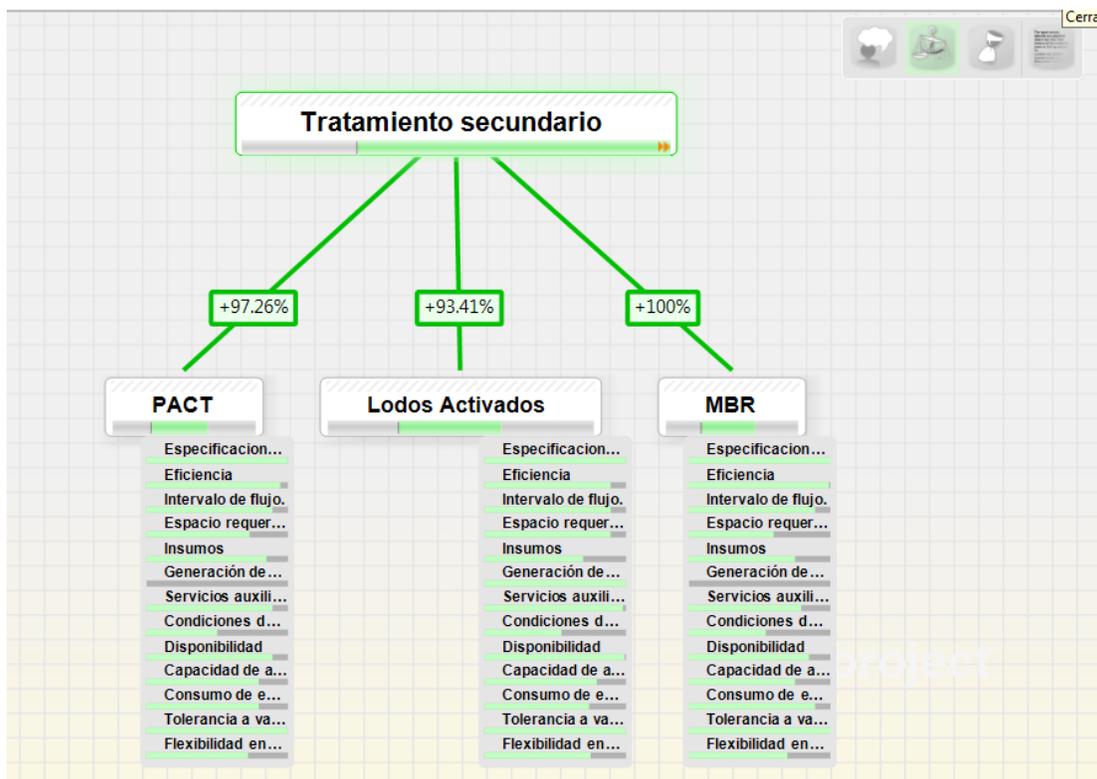


Figura 1.54 Análisis técnico

El reporte de la evaluación se muestra en la Figura 1.55 se tiene el sistema MBR como tecnología ganadora en la evaluación multicriterio, pero no se descarta el sistema PACT para la implementación ya que al igual que el sistema MBR tiene sus ventajas operativas.



Figura 1.55 Resultado de la evaluación técnica

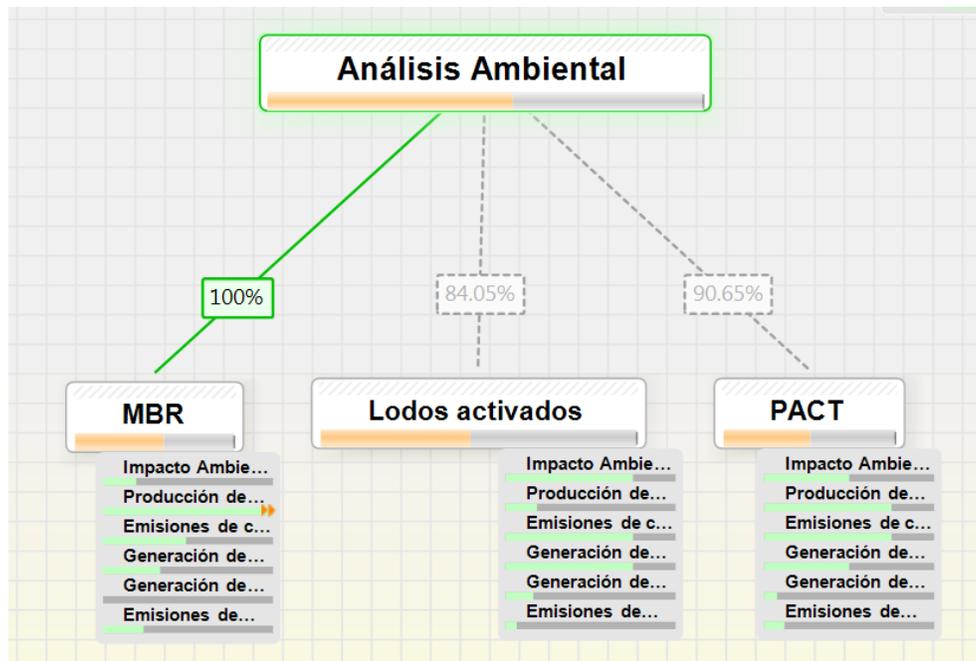


Figura 1.56 Resultado de la evaluación ambiental

Tras la evaluación la tecnología de biomembrana MBR mostró ventajas técnicas sobre el sistema PACT y el tratamiento convencional de lodos activados, aunque mostró desventaja en la parte económica donde el alto costo de las membranas y el consumo energético representan altos costos de inversión y operación, pero no hay mucha diferencia con el consumo energético del sistema convencional. El resultado cualitativo se muestra en la Tabla 1.32.



Tabla 1.32 Evaluación multicriterio sistema secundario

Propuesta	Análisis técnico	Puntaje	Subtotal	Análisis ambiental	Puntaje	Subtotal	Análisis económico	Puntaje	Subtotal	TOTAL
PACT	97.%	40	38.90	91%	15	13.59	97%	45	43.85	96.3
MBR	100.%	40	40	100.%	15	15	95%	45	42.85	97.8
Lodos Activados	93.%	40	37.25	84.%	15	12.60	100%	45	45	94.8

Propuestas tratamiento terciario

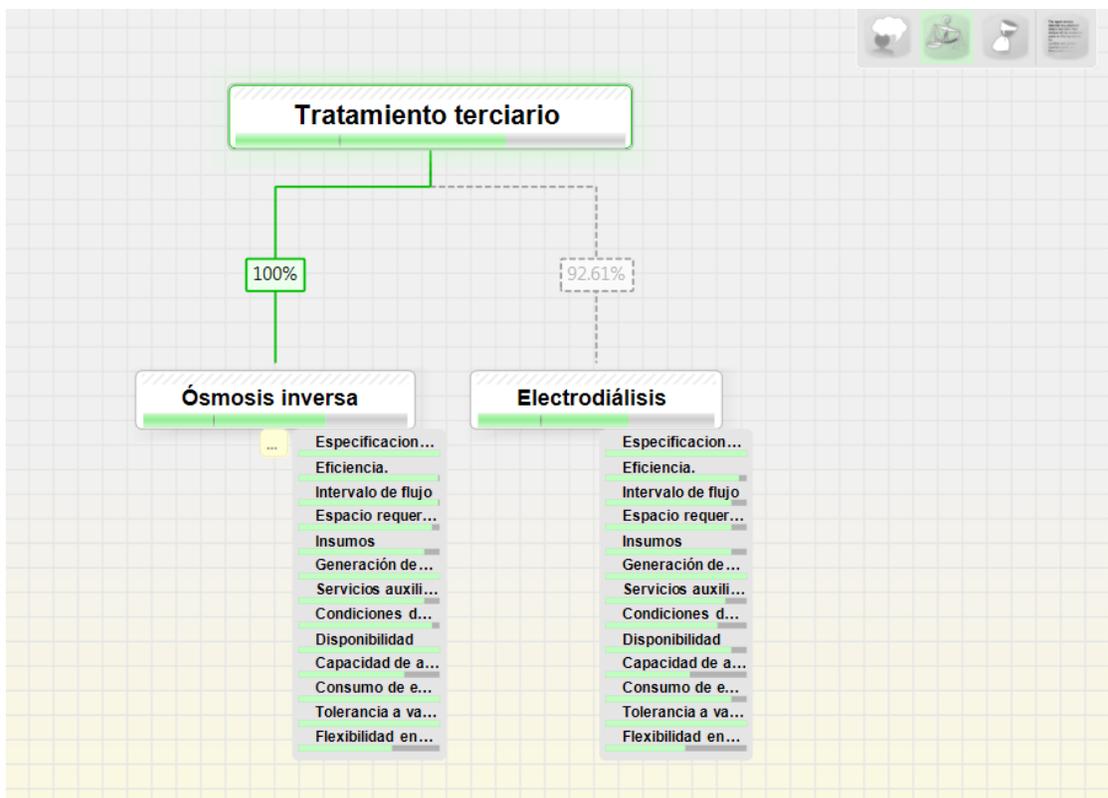


Figura 1.57 Análisis técnico del tratamiento terciario

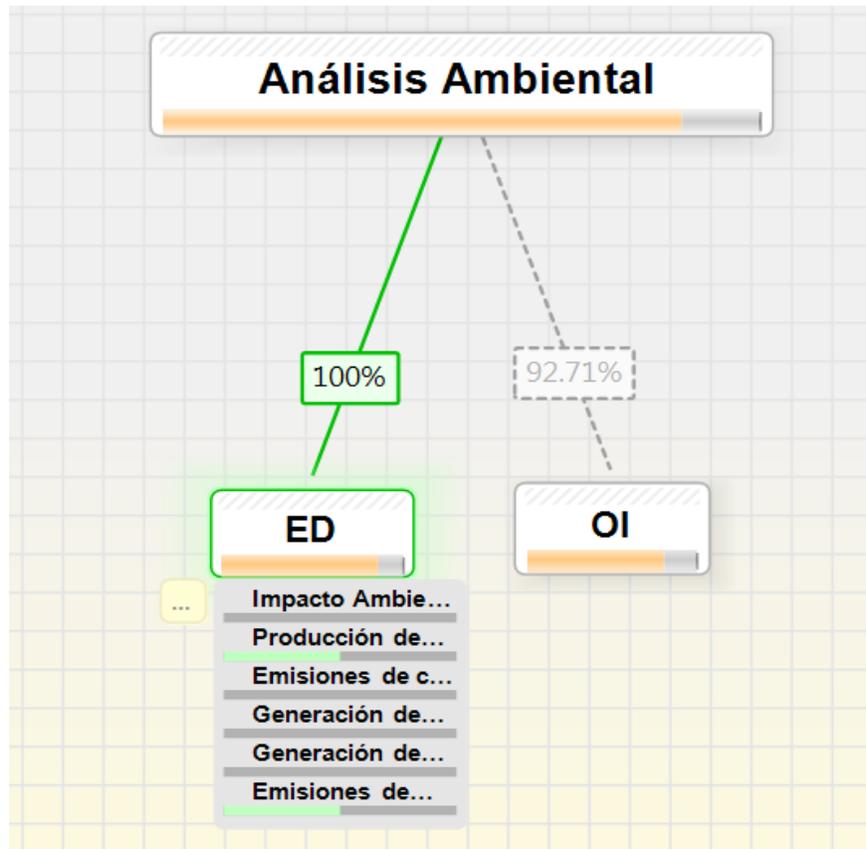


Figura 1.58 Análisis ambiental del tratamiento terciario

Tabla 1.33 Evaluación multicriterio sistema terciario

Propuesta	Análisis técnico	Puntaje	Subtotal	Análisis ambiental	Puntaje	Subtotal	Análisis económico	Puntaje	Subtotal	TOTAL
OI	100%	40	40	100%	15	15	95.5%	45	42.966	97.9
ED	92.6%	40	37	94.89%	15	14.2	100%	45	45	96.3



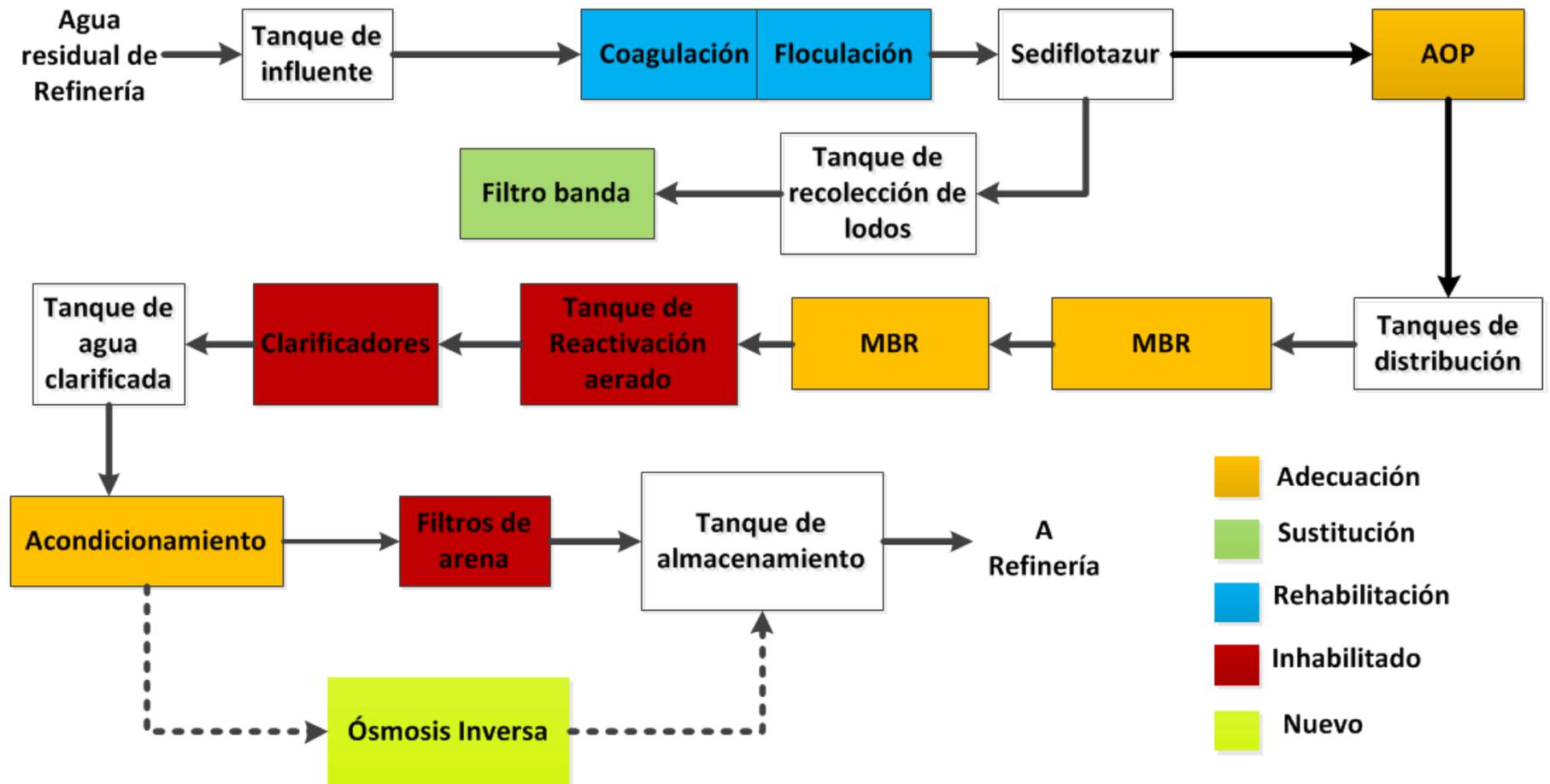
Resultados del análisis multicriterio.

De acuerdo a los resultado del análisis multicriterio resumido en la Tabla 1.31 la tecnología que es más factible es la ozonización con peróxido de hidrógeno ya que obtuvo de los mayores puntajes en la parte técnica y económica, aunque su desempeño ambiental no es destacable, siendo un tratamiento de oxidación avanzada es conocida por sus beneficios ambientales como un menor uso de agua cruda, además de la disminución en la generación de lodos y un mejoramiento de la calidad de agua para su reúso en la refinería.

En el sistema secundario se necesita la disminución en la generación de lodos y una mejor remoción de contaminantes de las dos opciones evaluadas el sistema con mayores beneficios fue la tecnología MBR una tecnología que ha desarrollado avances en costos que actualmente era uno de los impedimentos para su uso.

Para disminuir el alto contenido de sólidos disueltos y una alta conductividad se propone un tratamiento de pulido para disminuir estos parámetros y evitar incrustaciones y una baja en el rendimiento en las torres de enfriamiento, la tecnología más factible en esta parte del tren de tratamiento fue la ósmosis inversa, una tecnología de membranas que como se indica en la Tabla 1.6 remueve los sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables, dureza y las sales presente en el agua a tratar.

En la Figura 1.57 se muestra un esquema del sistema de tratamiento de agua residual con las tecnologías y rehabilitaciones propuestas, donde gran parte de la infraestructura presente en la planta de tratamiento se adecuará para la implementación de las nuevas tecnologías.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.59

Propuesta de modernización y rehabilitación de la PTAR



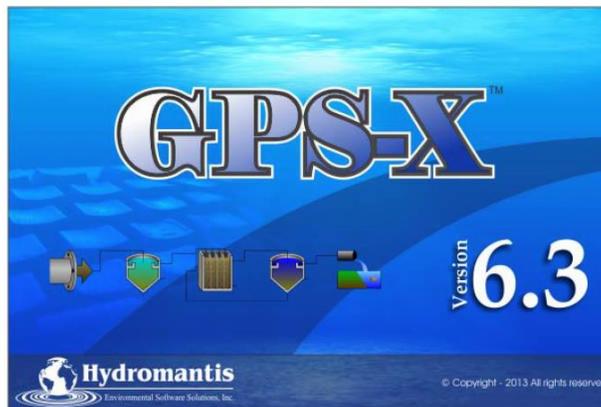
8 SIMULACIÓN DEL ESQUEMA DE TRATAMIENTO SELECCIONADO

Para la simulación de la PTAR se utilizó un programa de nombre GPS-X ® para comprobar que la calidad de agua sea entregada de acuerdo a la calidad especificada para el reúso en las torres de enfriamiento de la Refinería.

El programa GPS-X es una herramienta utilizada para:

- Modelar
- Simular
- Optimizar
- Administrar
- Realizar análisis de sensibilidad

De sistemas de tratamiento de residuos sólidos y agua residual; tiene una paquetería que contiene distintos modelos para la simulación de los distintos procesos de tratamiento.



Dentro de los procesos de tratamiento tiene los modelos para el modelado de influentes, pretratamiento, tratamientos de sólidos suspendidos, tratamientos terciarios, sistemas de clarificación y sedimentación, tratamiento de biosólidos y descargas.



Los valores de la calidad del afluente de acuerdo al manual de operación de la Planta son los de la Tabla 1.16, las características de cada proceso como dimensiones de tanques se especificaron de acuerdo al manual y tales datos se ingresaron en el simulador (Figura 1.61).

Actualmente la planta de tratamiento de agua residual cuenta con un sistema de oxidación de sulfuros que se encuentra fuera de operación, para modernizar la PTAR se reutilizarán las actuales instalaciones, para la remoción de fenoles en el efluente de la Refinería, se implementará la instalación de un sistema de oxidación avanzada combinada con el tratamiento secundario para entregar el agua de repuesto a torres en la calidad requerida.

El tren se simuló al 100% de la capacidad de diseño (Figura 1.60) para un mejor aprovechamiento de las instalaciones y así disminuir agua de primer uso.

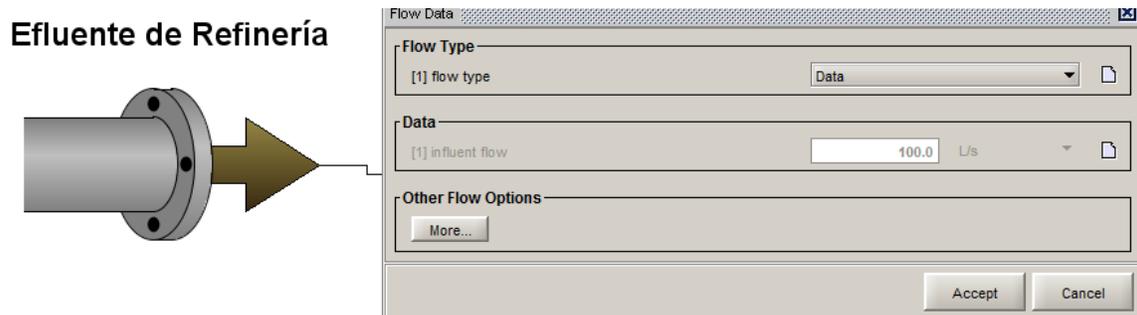


Figura 1.60 Afluente de la refinería

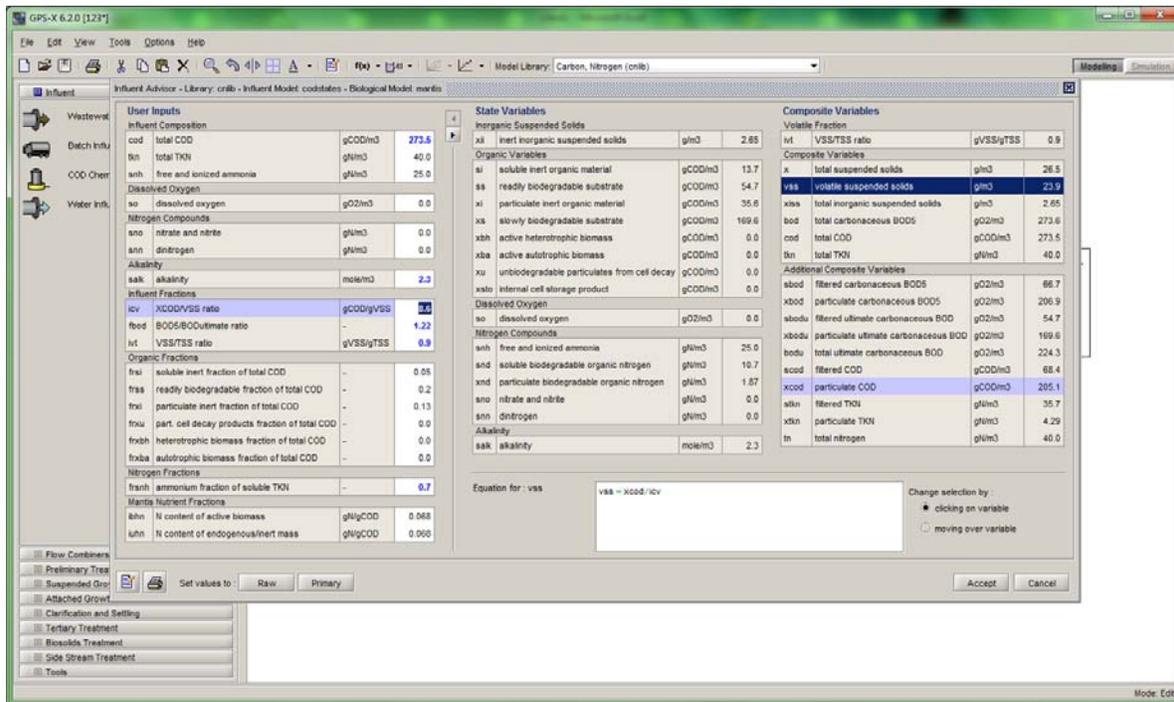


Figura 1.61 Ingreso de la calidad del agua proveniente de la Refinería

De acuerdo a la información de cada sistema se ingresó información como las dimensiones de los equipos como se muestra en la Figura 1.62 en el caso del Sediflotazur®, además de parámetros operacionales como tipo de aireación.

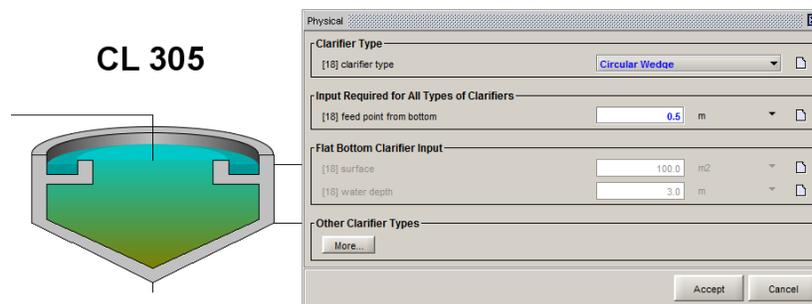


Figura 1.62 Dimensionamiento del Sediflotazur® en GPS-X

Para el proceso de oxidación avanzada se usó la herramienta BLACK BOX donde por medio del uso del modelo empírico donde se describió mediante una ecuación lineal el comportamiento de los contaminantes a remover, estableciendo como variables independientes las concentraciones de los contaminantes al inicio del tratamiento y estableciendo las eficiencias de remoción como variable



independiente en cada caso, para este proceso la eficiencia de remoción es para los compuestos como son los cloruros, sulfatos y fenoles presentes en agua a tratar.

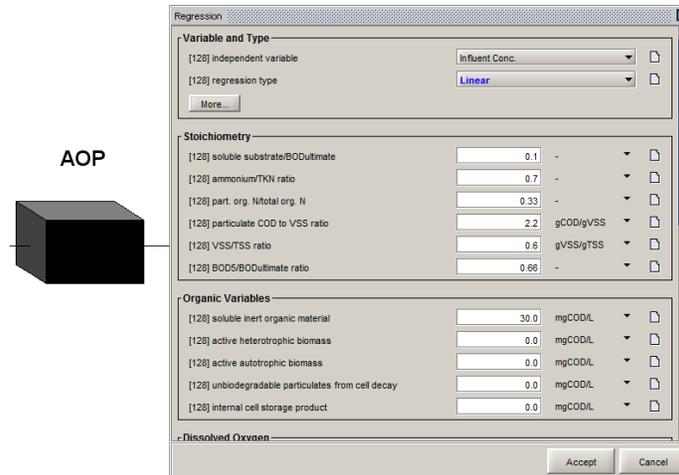


Figura 1.63 Modelado del Tratamiento de Oxidación Avanzada.

Para el proceso de biomembrana, en la sección de la velocidad de captura de sólidos se tiene del 99.9%, el dimensionamiento del equipo se calculará con el programa tomando como premisas las concentraciones de los contaminantes a la entrada del reactor.

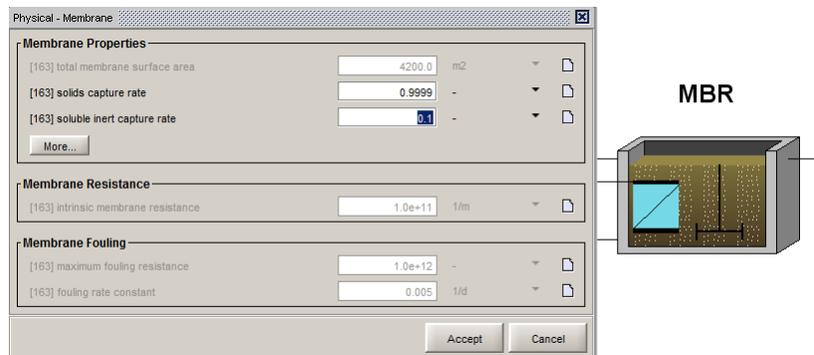


Figura 1.64 Modelado del sistema MBR en GPS-X

Para el modelado de la osmosis inversa se especificó la eficiencia de remoción de contaminantes que como se indica en bibliografía se tiene un 99% (Figura 1.65) entregando un efluente de muy alta calidad.

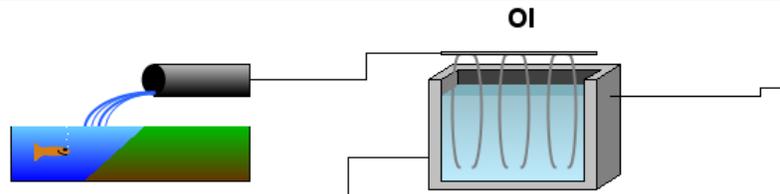
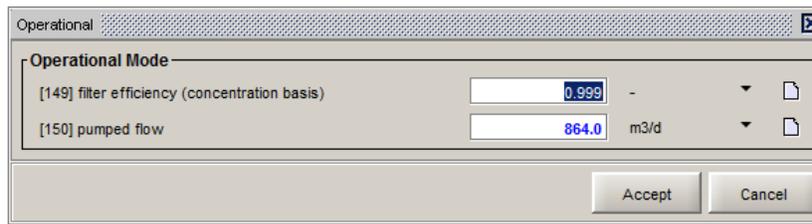


Figura 1.65 Modelado de la osmosis inversa

El modelado del sistema de tratamiento se muestra en la Figura 1.66 donde después de haber ingresado la calidad del afluente y dimensionamiento de algunos equipos, se procedió a la simulación del tren de tratamiento para verificar la remoción de contaminantes (Figura 1.67).

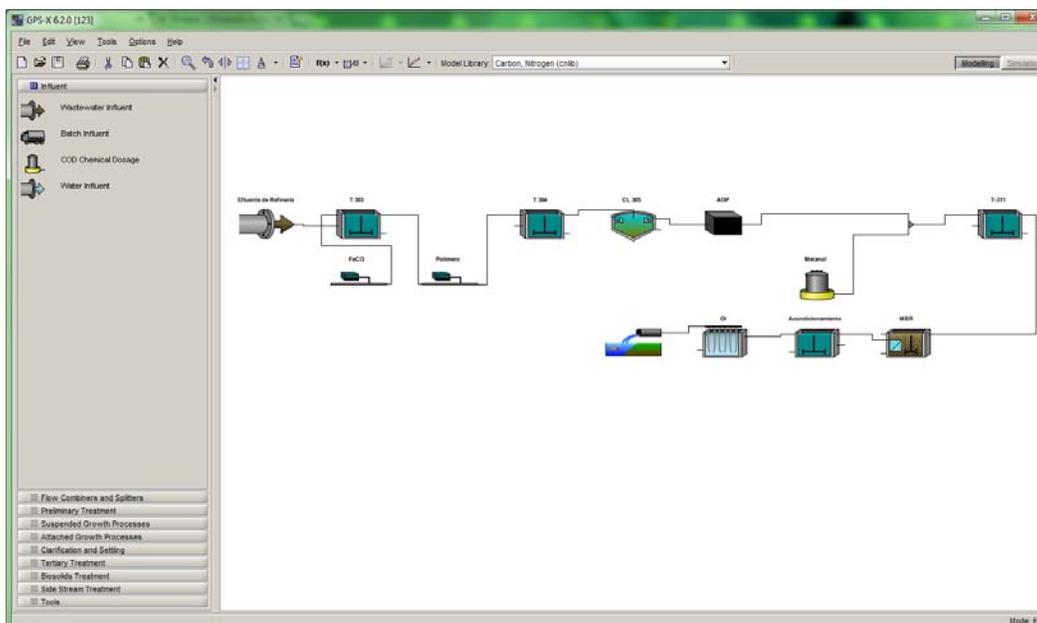


Figura 1.66 Modelado del tren de tratamiento GPS-X

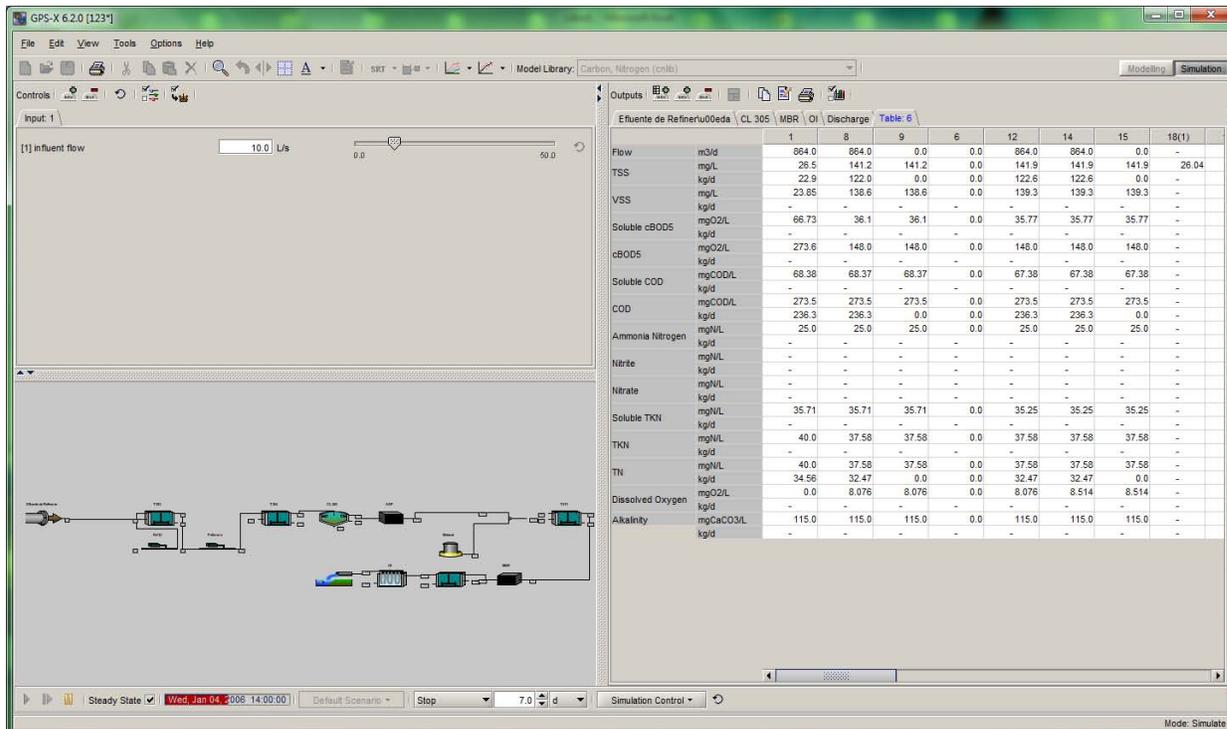


Figura 1.67

Simulación del tren de tratamiento

Los resultados de la simulación se muestran en la Tabla 1.33, se tiene que la remoción de SST es de un 99%, SSV 99%, DBO5 90%, DQO 77%, Nitrógeno amoniacal 99%, NT 99.3% cumpliendo con la calidad para repuesto a torres.



9 ESTIMADO DE INVERSIÓN

Para el estimado de inversión se recurrió al uso de la herramienta Capdetworks® donde se ingresó la calidad del agua a tratar en la PTAR como se muestra en la figura 1.50, indicando parámetros del afluente a tratar (Tabla 1.16).

Parameter	Value	Unit
Average Flow	100	L/s
Minimum Flow	179	m3/hr
Maximum Flow	185	MGD(US)
Suspended Solids	23.4	mg/L
% Volatile Solids	75	%
BOD	273	mg/L
Soluble BOD	80	mg/L
COD	275	mg/L
Soluble COD	300	mg/L
TKN	40	mg/N/L
Soluble TKN	40	mg/N/L
Ammonia	40	mg/N/L
Total Phosphorus	8	mg/P/L

Figura 1.68 Caracterización del afluente de la PTAR

El programa no cuenta con los procesos de oxidación avanzada, sistema biológico con membranas MBR, y ósmosis inversa por lo que se recurrió al uso de la herramienta *USER WASTEWATER PROCESS*, con la cual se ingresó la eficiencia de remoción de los contaminantes y datos de la bibliografía de cada tecnología (Sistema MBR-Figura 1.69).

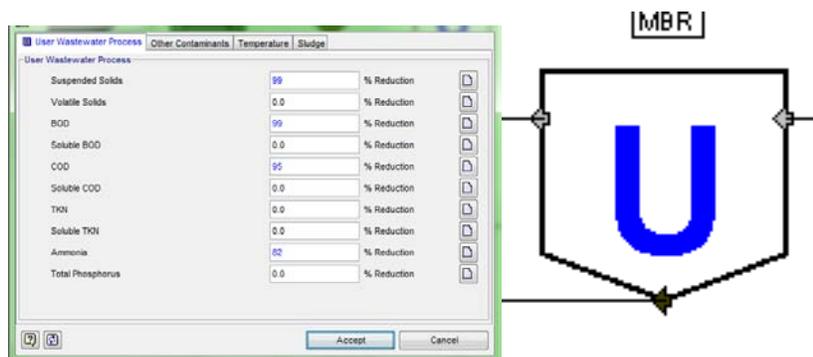


Figura 1.69 Especificación de tecnologías

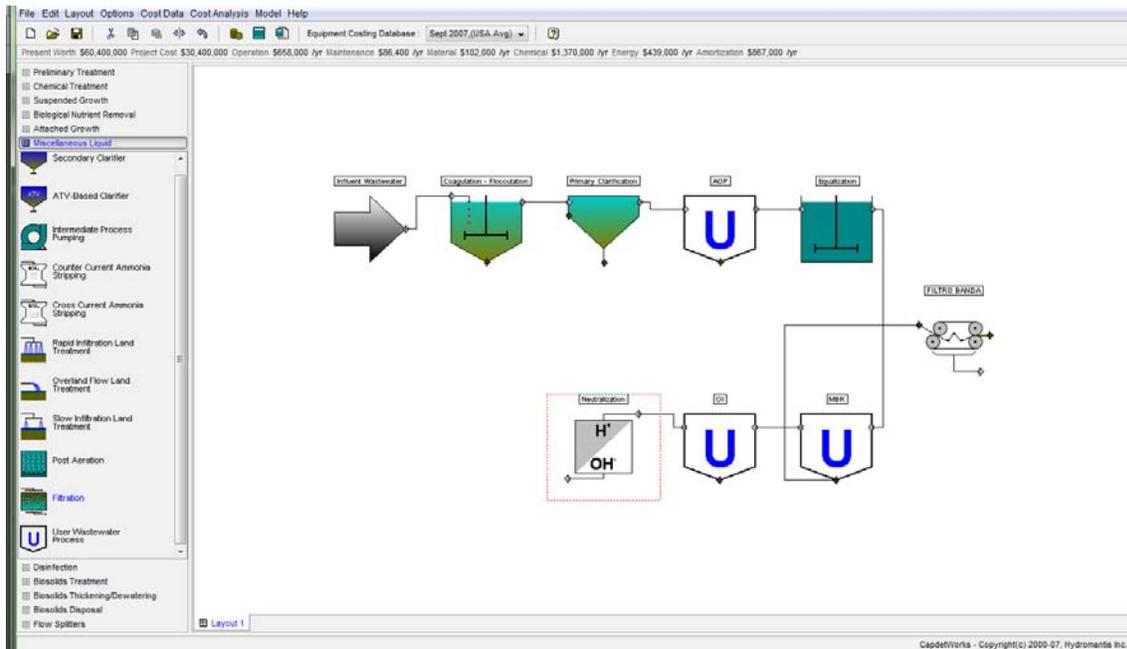


Figura 1.70 Modelado del sistema de tratamiento de agua residual en Capdetworks®

Para actualizar los costos de inversión, operación, mantenimiento, refacciones, entre otros, al año 2014 se actualizaron los índices (Anexo II) como se muestran en la Figura 1.71

Cost Index	Value
Marshall and Swift Index	1581.4
Engineering News Records Cost Index	9870.1
Pipe Cost Index	876.2
User Cost Index 1	100
User Cost Index 2	100
User Cost Index 3	100

Figura 1.71 Actualización de los índices de precios Capdetworks®



Algunos costos unitarios se cambiaron de acuerdo a los valores del Anexo II como se muestra en la Figura 1.72, esta actualización permitió adecuar los costos asociados a la construcción de los sistemas de tratamiento en México.

Item	Value	Unit
Building Cost	90	\$/sqft
Excavation	7.07	\$/m3
Wall Concrete	282.88	\$/m3
Slab Concrete	127.3	\$/m3
Crane Rental	200	\$/hr
Canopy Roof	16	\$/sqft
Electricity	0.05	\$/kWh
Hand Rail	75	\$/ft
Land Costs	20000	\$/acre

Figura 1.72 Adecuación de costos unitarios

10 RESULTADOS

A continuación se lleva a cabo el análisis de los datos obtenidos como resultado de las diferentes simulaciones del tren de tratamiento con las diferentes mejoras al tren de tratamiento:



Tabla 1.34 Calidad del agua residual en la PTAR

Flujo		Afluente de la PTAR	Salida del sediflotazur	Lodos de sediflotazur	Salida del POA	Salida del MBR	Agua osmosada
Flujo	m ³ /d	8640.000	8630.000	10.000	8630.000	8580.000	7776.000
SST	mg/L	26.502	141.875	179.761	14.187	0.168	0.000
SSV	mg/L	23.852	139.225	176.404	8.512	0.071	0.000
DBO5	mgO ₂ /L	273.609	147.984	177.949	14.798	1.069	1.024
DQO	mgCOD/L	273.500	273.436	328.461	50.970	31.638	31.532
Nitrógeno amoniacal	mgN/L	25.000	25.000	25.000	2.443	0.493	0.493
Soluble TKN	mgN/L	35.714	35.249	35.249	2.574	1.189	1.189
TKN	mgN/L	40.000	37.582	38.204	3.758	1.196	1.189
TN	mgN/L	40.000	37.582	38.204	3.758	3.373	3.366
Alcalinidad	mgCaCO ₃ /L	115.000	115.000	115.000	105.000	88.952	88.952



En programa arroja la distribución de costos en los distintos casos como mantenimiento, operación, costo de químicos, entre otros.

En la siguiente figura se muestran la distribución de los costos de construcción de los diferentes tratamientos de la PTAR, se observa que uno de los tratamientos con mayor costo de construcción es el proceso de oxidación avanzada seguida de la ósmosis inversa.

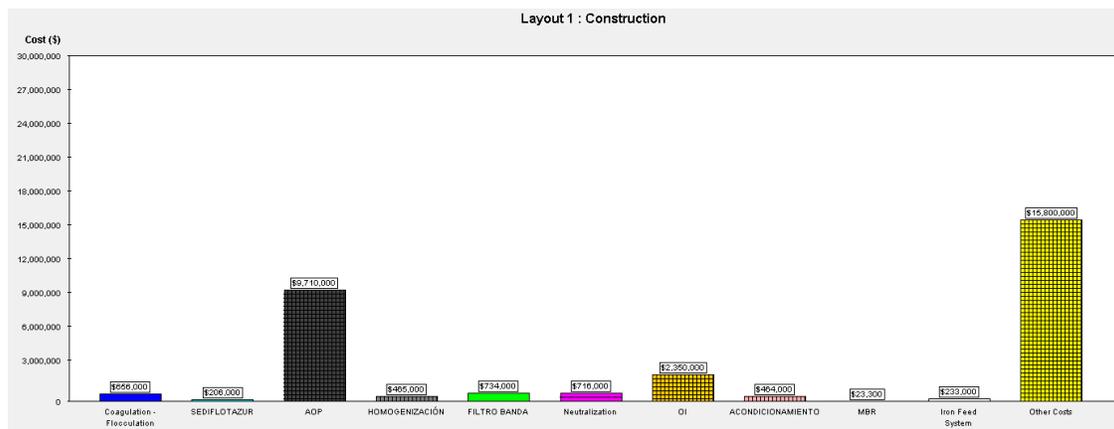


Figura 1.73 Costos de construcción

Para el costo de mantenimiento se tiene un gran gasto en el sistema de ósmosis inversa

Entre el proceso de tratamiento en los que se llevan mayores gastos por la compra de material de repuesto y refacciones destacan la ósmosis inversa (38% del costo total de la planta destinado al material), debido al elevado costo de las membranas para repuesto. En el caso de uso de químicos, en el tratamiento de ósmosis inversa se invierte el 51% de los costos totales de químicos para la PTAR.

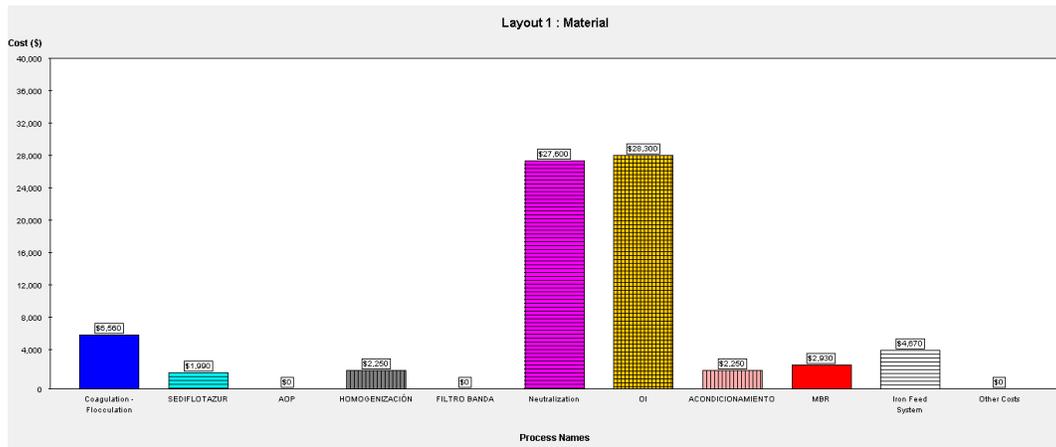


Figura 1.74 Distribución de costos en el material de repuestos y refacciones

El proceso de coagulación floculación es de los procesos que más consume químicos dentro de la PTAR por lo que es de esperarse que la mayor concentración de gastos por químicos sea en este proceso (47% de los gastos totales) y en el acondicionamiento para la ósmosis inversa donde se lleva a cabo la dosificación de antincrustante y el control del pH.

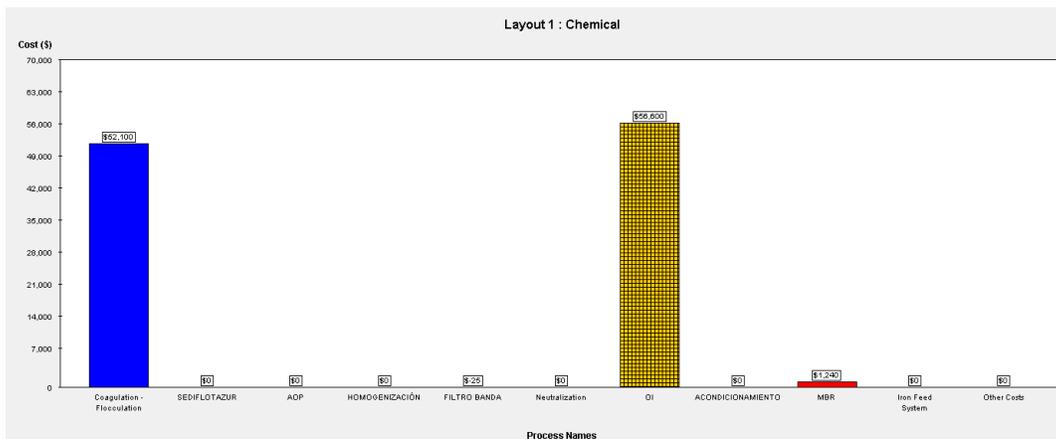


Figura 1.75 Distribución de costos de químicos

De los datos que se ingresaron al simulador se tiene que la mayor parte del consumo energético se lleva a cabo en la osmosis inversa, sistema que además de requerir sistema de instrumentación para operación control y lavado del sistema cuenta con



un sistema de equipo electromecánico para trabajar a altas presiones para llevar a cabo la separación de sales y otros compuestos disueltos.

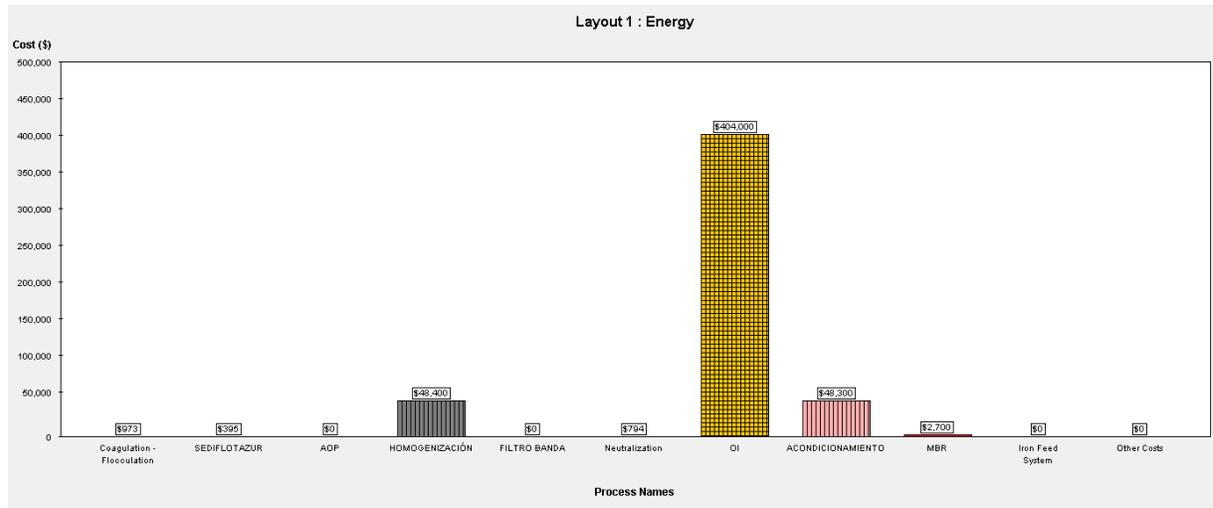


Figura 1.76 Distribución de costos en el consumo energético

Tabla 1.35 Resultados costos Capdetworks

COSTOS DIRECTOS	COSTO \$MXN (2014)
Preparación del sitio	\$ 6,867,840.00
Eléctrico	\$ 11,786,880.00
Tubería	\$ 7,983,360.00
Instrumentación y control	\$ 5,725,440.00
Edificios administrativos y laboratorios	\$ 12,028,800.00
Construcción de procesos unitarios	\$209,664,000.00
Costos totales de construcción	\$297,024,000.00
COSTOS INDIRECTOS	
Costos legales	\$ 5,927,040.00
Ingeniería de diseño	\$ 44,486,400.00
Costos de inspección	\$ 5,927,040.00
Contingencia	\$ 29,702,400.00
Técnico	\$ 5,927,040.00
Costos totales indirectos	\$106,713,600.00
COSTOS LABORALES	
Costo de trabajo administrativo	\$ 223,104.00



Costos de trabajo de laboratorio	\$ 745,920.00
Costos de operación de procesos de operación	\$ 32,659,200.00
Costos de operación de procesos de mantenimiento	\$ 2,634,240.00
Costos totales laborales	\$ 36,288,000.00

Tabla 1.36 Resultados costos generales del proyecto

COSTOS DEL PROYECTO	COSTO \$MXN (2014)
Costo total del proyecto	\$422,016,000.00
Costo total de labores operacionales	\$ 33,734,400.00
Costos totales de labores de mantenimiento	\$ 2,634,240.00
Costos totales de materiales	\$ 1,029,504.00
Costos totales de químicos	\$ 1,478,400.00
Costos totales de energía	\$ 6,787,200.00

La sensibilidad del costo de tratamiento de agua residual se muestra en la Figura 1.77 donde a medida que aumenta el flujo tratado la planta tiene un gasto mayor, principalmente en lo es dosificación de químicos y costos operacionales como energía eléctrica. Costo de mantenimiento no tiene cambios, se debe a que la planta desde el inicio tiene un plan de mantenimiento que depende de los equipos y el tiempo de vida útil de los mismos.

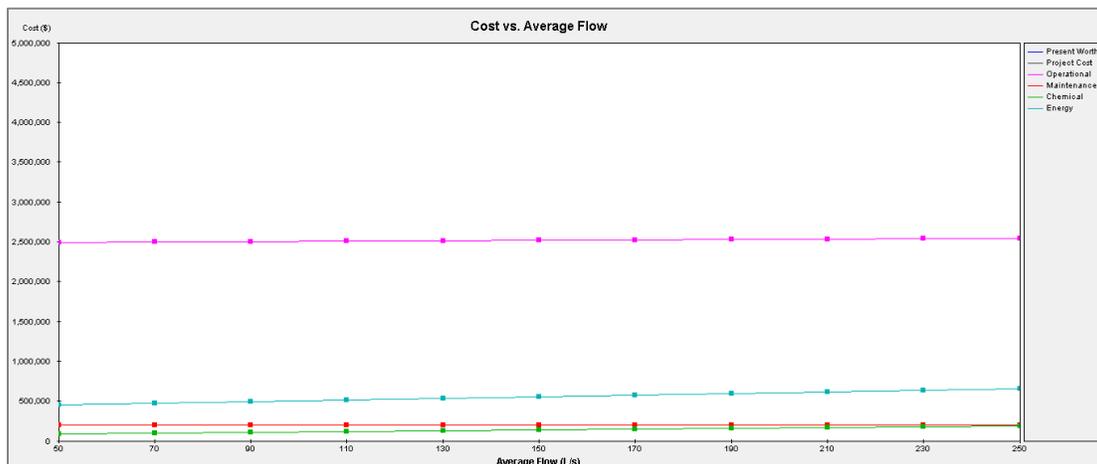


Figura 1.77 Costo del tratamiento de agua residual de la PTAR



11 CONCLUSIONES

Se plantearon propuestas de rehabilitación y modernización de la PTAR del caso de estudio tras un diagnóstico donde encontraron áreas de mejora, se propuso la aplicación de nuevas tecnológicas para el tratamiento de aguas residuales en la industria de la refinación.

En el pretratamiento se propuso la adecuación del sistema de oxidación de sulfuros, que actualmente se encuentra fuera de operación ya que el influente proveniente de la refinería contiene una concentración de cero de este parámetro, la adecuación sería por un proceso de oxidación avanzada para eliminar los sulfatos y fenoles presentes en altas concentraciones (289 mg/L y 0.75 mg/L respectivamente) en el agua residual que llega de la refinería y evitar la inhibición de la actividad de los microorganismos en el sistema biológico que es el proceso consecuente.

El sistema de pretratamiento está compuesto también por un sistema de coagulación floculación, cuyo sistema mecánico de agitación se encuentra inhabilitado desfavoreciendo la dispersión del coagulante y floculante para llevar a cabo la desestabilización y reagrupación de los coloides presentes en el agua a tratar, se recomendó la rehabilitación del sistema electromecánico para aumentar la eficiencia de este tratamiento que era menos del 59% en la remoción de partículas suspendidas, de las cuales al no ser removidas actualmente pasan al sistema secundario.

El objetivo del proceso secundario es eliminar el nitrógeno amoniacal, actualmente se encuentra en buenas condiciones por los que se planteó la posibilidad de implementar una nueva tecnología, se evaluó en sistema PACT que es un tratamiento similar al tratamiento de lodos convencionales la diferencia es que en el tanque de aeración se le agrega carbón activado y se recomienda la instalación de un sistema de oxidación húmeda para la regeneración del carbón activado y una reducción del lodo residual del proceso de un 90%; la otra tecnología a evaluar fue



el sistema MBR, una tecnología que combina tratamiento biológico con una filtración con membrana dando un efluente con una alta calidad. Después de un análisis multicriterio la tecnología más factible fue el sistema MBR obteniendo el mayor puntaje (97.8/100) presentando ventajas en los aspectos técnicos y ambientales, este sistema destaca sobre el sistema convencional de lodos activados principalmente en el poco espacio, la eficiencia de remoción de contaminantes y la reducción de un 50% de lodos generados.

Para disminuir los altos valores de conductividad y sólidos disueltos presentes en el agua residual y entregar un agua tratada con calidad para torres, se planteó la propuesta de instalar un sistema terciario de los cuáles se evaluaron la ósmosis inversa y el sistema de electrodiálisis, siendo la tecnología de ósmosis inversa la más factible tras el análisis técnico, ambiental y económico, obteniendo un puntaje de 97.9/100 en comparación con la electrodiálisis que obtuvo un puntaje de 96.3/100 tras el análisis multicriterio.

Actualmente el sistema de tratamiento de lodos residuales provenientes del pretratamiento y el sistema secundario se encuentra en malas condiciones por lo que se encuentra fuera de operación en determinados periodos de tiempo, lo que expone a la planta a detener la operación o disminución del caudal de entrada debido al acumulamiento de estos residuos, el principal objetivo del tratamiento de lodos es la reducción de agua contenida en los lodos, en comparación con un sistema de deshidratación tipo centrífugo, los filtros banda tienen la ventaja de consumir menor energía eléctrica, por lo que sólo se recomendó la sustitución de este sistema de tratamiento por uno nuevo.

Con la rehabilitación de la PTAR se asegura la operación del 100% de su capacidad de diseño (100 L/s), lo que garantiza el suministro de agua a torres de enfriamiento y así disminuir el consumo de agua cruda que es el principal objetivo del sistema.

Tras la simulación en el software GPS-X® de la PTAR del esquema de tratamiento seleccionado, con las mejoras tecnológicas, se comprobó que se redujo la cantidad



de contaminantes a la salida de la Planta de Tratamiento mejorando la remoción de SST de un 93% a un 99%, SSV 99%, DBO5 90%, DQO de una remoción del 70% a un 77%, Nitrógeno amoniacal del 96% a un 99%, NT 99.3% y con el sistema de oxidación avanzada se remueve el fenol presente en el agua a tratar garantizando una remoción del 98%; ahora cumpliendo con la calidad requerida para repuesto a torres y evitar problemas como incrustaciones y corrosión en los equipos y las tuberías.

Al ingresar las características de la PTAR en el programa Capdetworks® se obtuvo un costo total del proyecto de \$422, 016,000 MXN, donde \$2, 399, 213.11 son para la rehabilitación del sistema de deshidratación de lodos; garantizando en calidad y cantidad su disposición.

Para los costos laborales en los que se incluyen los trabajos administrativos, trabajos en laboratorio, costos laborales para la operación y mantenimiento de la PTAR representan un 7.9% de la inversión total del proyecto para un año de operación. Los insumos necesarios para la operación de la planta como energías eléctricas, químicas y materiales como refacciones son de \$9, 295,104.00 MXN al año que representa un 22% de la inversión inicial. El costo de tratamiento de agua es de \$3.78 MXN por cada metro cúbico tratado, representando un ahorro de 1.22 \$/m³ comparado con el costo actual.

Con el estado actual y las tecnologías que ahora tiene la PTAR se tiene un efluente con calidad que no cumple con la requerida para torres de enfriamiento sobrepasando los límites permisibles en los parámetros como fenoles, fosfatos, sólidos suspendidos, sólidos disueltos y conductividad entre los más destacables, al realizar la rehabilitación y mejora tecnológica además de cumplir con calidad para torres, también cumple con la norma NOM-001-SEMARNAT-1996.



12 RECOMENDACIONES

Las principales causas del desgaste y la disminución de la eficiencia en la operación de las plantas de tratamiento de agua residual es el desgaste y mal operación de los equipos por lo que una de las recomendaciones es la elaboración e implementación de un plan de mantenimiento, el objetivo de un plan de mantenimiento es prevenir problemas operacionales programando un mantenimiento preventivo y así evitar problemas operativos y mantenimientos correctivos que llegan a repercutir con la buen funcionamiento de la planta.

Una recomendación operativa es trabajar dentro de los rangos de operación de acuerdo al diseño, esto permite que el tiempo de vida útil de los equipos como tanques, bombas, agitadores, sistema de instrumentación y control no disminuya y operen a una eficiencia adecuada.

La filosofía denominada descarga cero nació como un objetivo enfocado en el reciclaje y reúso del agua residual proveniente de la industria mediante su tratamiento, en la actualidad se ha convertido en una necesidad debido a la disminución de disposición de agua fresca y contaminación de los recursos hídricos.

Con la implementación del sistema de ósmosis inversa se recomienda trabajar la planta a su máxima capacidad para cumplir con el objetivo de la planta y disminuir el consumo de agua cruda en la Refinería, promoviendo el reúso del agua tratada y la descarga cero, una descarga con la mínima concentración de contaminantes cumpliendo con la normatividad que aplique en materia de descargas de aguas residuales a cuerpos de aguas nacionales.

Los riesgos asociados a las condiciones de infraestructura de la planta de tratamiento, ha repercutido en paros no programados constantes que obligan a la refinería a consumir agua cruda de la presa “Benito Juárez” las cuál es de consumo limitado.



Se recomienda identificar la PTAR como una oportunidad de negocio que ofrece rentabilidad, ventajas ambientales y sociales, para lo cual es necesario administrarla como una planta productiva que complementa el proceso de refinación de combustibles y no ser tomada en cuenta como una planta extra al proceso como actualmente se hace.



13 BIBLIOGRAFÍA

1. AQUA SISTEMA. (2000). Manual de Operación. México
2. Beltrán de Heredia, J. R. (enero 2010). Eliminación de compuestos fenólicos por oxidación avanzada. *Ingeniería Química*, Edit. Alcion, pags. 142-146.
3. C.H. Hofman, H. H. (2010). Degradation of priority compounds vy UV and UV-Oxidation. *TECHNEAU*, 6-24. US.A., Edit. Techneau
4. Centro Canario del Agua (2003). Intriducción a los Biorreactores de Membrana.
5. Cesaro Alessandra, N. V. (2013). Wastewater Treatment by combination of advanced Oxidatiio Processes and Convencional Biological System. *Biorremediation & Biodegradation*, Italy, SEED, pags. 4.8
6. Claudio, A. Zaror. (2002). Principios de diseño de procesos limpios. Concepción, Chile.
7. Doménech Xavier, F. J. (s.f.). Procesos Avanzados de Oxidantes para la eliminación de contaminantes. Edit. CONICET, Argentina, pags 1-25.
8. F.J. Vizcaya Lozano, F. E. (2006). El reactor biológico de membrana en el tratamiento de aguas residuales. *Ingeniería Química*, España, pags.160-167.
9. Fernábdez Cirelli, A. (2012). El agua: un recurso esencial. Edit. Química Viva, Buenos Aires, pags 147-170.
10. García Gámez Celestino, G. M. (2011). Tratamiento biológicos y de oxidación avanzada combinados para una solución a la biotecnología ambiental. ISBN-978-607-8164-02-8, Pags 585-605.
11. Germán E., D. I. (2012). Técnicas para desalar agua de mar y su desarrollo en México. *Redalyc*, 57-66.
12. Hofman, C.H., (2010). Degradation of priority compounds UV and UV-Oxidation. Edit. Techneau, Comision Europea, Edit. Inca, España,pag. 6-24
13. Mahajam S. (2008). Pollution Control in Petroleum Refineries and Petrochemical Units. *Pollution Control in process Industries* (págs. 219-223). India: McGraw-Hill.



14. Naresh N. Mahamuni, Y. G. (2010). Advanced oxidation processes (AOPs) involving ultrasound for waste water treatment: A review with emphasis on cost estimation. *ELSEVIER*, Edit. Ultrasonics Sonochemistry, U.S.A., pag. 990-1003.
15. Ofrero Jorge Enrique, (2005). Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería. *Ciencia, Tecnología y Futuro*, Instituto Colombiano del petroleo, Colombia , pag. 97-109.
16. Osorio Robles Francisco, T. R. (2010). En *Tratamiento de aguas para la eliminación de microorganismos y agentes contaminantes*. Madrid, España: Diaz de Santos.
17. Rod Reardon, J. D. (2013). wastewater Treatmento Plants of the Future: Current Trends Shape Future Plants. *Florida Water Resources Journal*, US.A., pag. 8-14.
18. Salher. (2012). Tratamiento Secundario mediante Reactores de membranas (MBR) con eliminación de nitrógeno. Catálogo de productos, tratamientos secundarios, pag .España, pag. 25-28.
19. Sunil Kommineni, R. R. (2005). *Advanced Oxidation Processes*, Vol. 53, New York, U.S.A., pag. 51-59.
20. Thiruvenkatachari Ramesh, V. S. (2008). A review on UV/TiO₂ photocatalytic oxidation process. *JOURNAL REVIEW*, Sydney, Australia, pag. 64-70.
21. Cecen Fernan, O.A. (2012). *Activate Carbon for water and wastewater treatment*. Turquía: Wiley-VCH.
22. Cinvestav, IPICyT, UAM. (2010). Informe de análisis de aguas de efluentes de una refinería.
23. CONAGUA. (2014). *Ley Federal de Derechos*. México: SEMARNAT.
24. Fundación Chile. (2013). *Tecnologías de ósmosis inversa*. Chile, Edit. CONAMA
25. EL AGUA. (2008). *Reactores Biológicos de Membrana (MBR), la solución compacta al tratamiento biológico de aguas*. Madrid, España.
26. IPPC. (2003). *Reference document on best Available Techneques for mineral oil and gas refineries*. European Commission.
27. Jurek Patocza, Russell Johnson, etal. (1995), *Pretreatment of chemical wastewater for toxicity reduction*. 68th Annual Water Environment Federation Conference.



28. Mantilla Morales Gabriela, Servín Jungdorf Antony. (2002), Costos índice de sistemas de tratamiento de aguas residuales en México. Instituto Mexicano de la Tecnología del agua, México.
29. MINISTERIO DE SANIDAD Y POLÍTICA SOCIAL. (2009). Guía de desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano. Centro Publicaciones. Madrid, España.
30. Overseas Environmental Cooperation Center, Japan. (2003). *Technology transfer manual of industrial wastewater treatment*. Japan: Ministry of environment.
31. Paris, P. V. (2013). Propuesta de una metodología para la evaluación integral de proyectos industriales, mediante un análisis multicriterio. Facultad de Química: Universidad Nacional Autónoma de México.
32. PennEnergy . (2013). Russian Oil Refinery select GE tech for wastewater treatment plant. U.S.A., *Penn Energy Editorial Staff*. Rodriguez, R., & etal., F. F. (s.f.). Oxidación Avanzada, sistema Fenton en tratamiento de efluentes industriales de alta carga orgánica. Argentina, Edit. INTI Ambiente.
33. SAM Sustainable Asset Management AG. (2007). Water a market of the future. Zúrich, Sustainable Assent Management, New York, U.S.A.
34. Sandip Sharma, J. P. (2011). A general review on Advances Oxidation Processes for waste water treatment. Institute of Technology, Ahmedabad, India.
35. Siemens Water Technologies. (1992). An overview of PACT Wastewater Treatment for the petroleum and Petrochemical Industries. San Francisco, U.S.A.



14 MESOGRAFÍA

1. AECOM. (2008). Wastewater minimization study, Taranto Refinery. Recuperado el 05 de 2014, de http://www.aecom.com/Where+We+Are/Europe/Countries/Italy/_projectsList/Wastewater+minimisation+study,+Taranto+refinery,+Italy
2. Albícker Carlos. (2002). Agua Latinoamérica, Recuperado el 01 de 2015, de <http://www.agualatinoamerica.com/docs/pdf/9-10-02adv.pdf>
3. Bizbahrain. (Diciembre de 2013). New waste water treatment plant at Bapco Refinery. Recuperado el 06 de 2014, de <http://bizbahrain.com/content/new-waste-water-treatment-plant-bapco-refinery>
4. Cumbre de Johannesburgo. (Septiembre de 2002). Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible. Recuperado el 03 de 2014, de <http://www.cinu.org.mx/eventos/conferencias/johannesburgo/medios/carpeta/agua.htm>
5. Degrémont. (2008). Suez Environmenten Degrémont. Recuperado el 06 de 2014, de <http://www.degremont.com.br/ES/Referencias/Pages/REPLAN.aspx>
6. GEI México. (2013). Semarnat. Recuperado el 05 de 2014, de <http://www.geimexico.org/factor.html>
7. INEGI. (s.f.). Territorio. Recuperado el 03 de 2014, de <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/usos.aspx?tema=T>
8. OPEC. (2013). *Annual Statistical Bulletin*. Recuperado el 05 de 2014 http://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/ASB2013.pdf
9. PEMEX. (2011). Recuperado el 07 de 2013, de Informe de responsabilidad social: http://www.pemex.com/informes/pdfs/irs_2011.pdf
10. Refinería Balboa. (2005). *G Refinería Balboa*. Recuperado el 06 2014, de <http://www.grupoag.es/refineriabalboa/medioambiente/vertidos-liquidos.php>
11. *Reutilización de agua depurada mediante reactores biológicos de membrana (MBR)*. (2014). Recuperado el 05 de 2014, de Aguas Industriales:



- <http://aguasindustriales.ventasdealtooctanaje.com/tag/reactor-biologico-de-membrana-mbr/>
12. SEMARNAT. Agua. Recuperado el 03 de 2014, de Calidad del agua:
http://www.paot.org.mx/centro/ine-semarnat/informe02/estadisticas_2000/informe_2000/04_Agua/4.6_Calidad/
 13. SENER. (2013). Subsecretaría de Hidrocarburos. Recuperado el 04 de 2014, Obtenido de REFINACIÓN
<http://www.energia.gob.mx/portal/Default.aspx?id=1501>
 14. SIEMENS. (08 de Enero de 2014). Siemens to supply wastewater treatment systems to refinery in China. Recuperado el 06 2014, de
<http://bizbahrain.com/content/new-waste-water-treatment-plant-bapco-refinery>
 15. Universidad de Alcalá. (16 de enero de 2008). Obtenido de MIOD: Recuperado el 05 2014, de <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2008/01/16/82477>
 16. WABAG. (2010). Another major order for WABAG in India. Recuperado e 06 de 2014, de <http://www.wabag.com/ru/wabagmedia/anpther-major-order-for-webag-in-india-wastewater-treatment-and-recycling-plant-for-the-paradip-refinery/>



15 ANEXOS

15.1 Anexo I

15.1.1 TRATAMIENTOS PRIMARIOS

15.1.1.1 Separador API

En el separador API se pueden separar partículas de petróleo con diámetros ≥ 150 micrómetros.

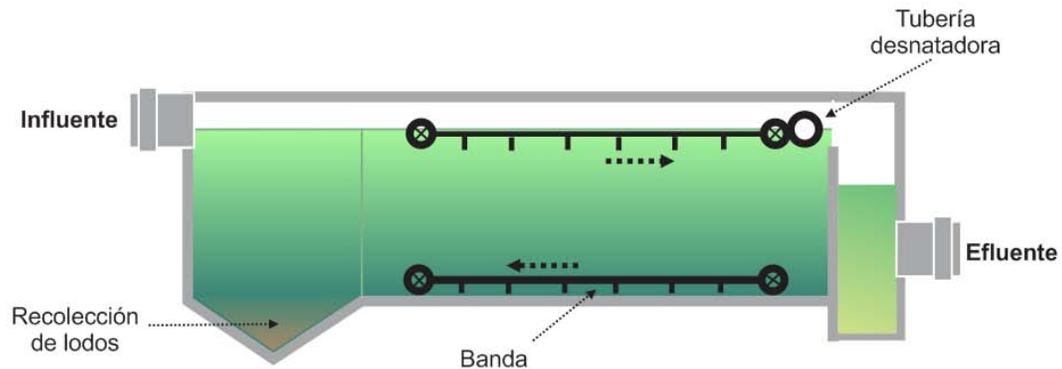
Ventajas:

- Su gran capacidad de absorción de sedimentos.
- Se adecuan en especial para el petróleo con un alto punto de solidificación.

Desventajas:

- Se necesita de un volumen de construcción relativamente grande.
- Emulsiones y aceites disueltos presentes en el agua residual.

El agua aceitosa a través de un pre-separador para igualación del flujo y la recolección del aceite, basura y cascajo por volumen. El flujo sale de la antecámara del separador y es reducido a flujo laminar conforme pasa a través de una placa de distribución. El flujo distribuido esta después en cada una de las bahías del separador API a través de compuertas, donde el aceite libre, los sólidos y el lodo son separados usando la ley de Stokes. Los sólidos y lodos se asentarán hacia una tolva de almacenamiento de cieno directamente debajo de la cámara de admisión. Mientras el agua aceitosa fluye a través del separador, el aceite y los sólidos continuarán separándose.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.78 Separador API

15.1.1.2 Separadores de placas corrugadas (CPI)

Normalmente usado en plantas petroquímicas con una baja concentración de Sólidos Suspendidos Totales. El sistema a base de placas corrugadas tiene el fin de acortar la distancia de ascenso de las partículas de aceite. Este sistema permite separar partículas cuya velocidad de ascenso o sedimentación sea inferior a 0.3 mm/s, proporcionando efluentes hasta de 20 ppm de aceite. En este tipo de separadores se combinan los procesos de separación por gravedad y los de acción coalescente.

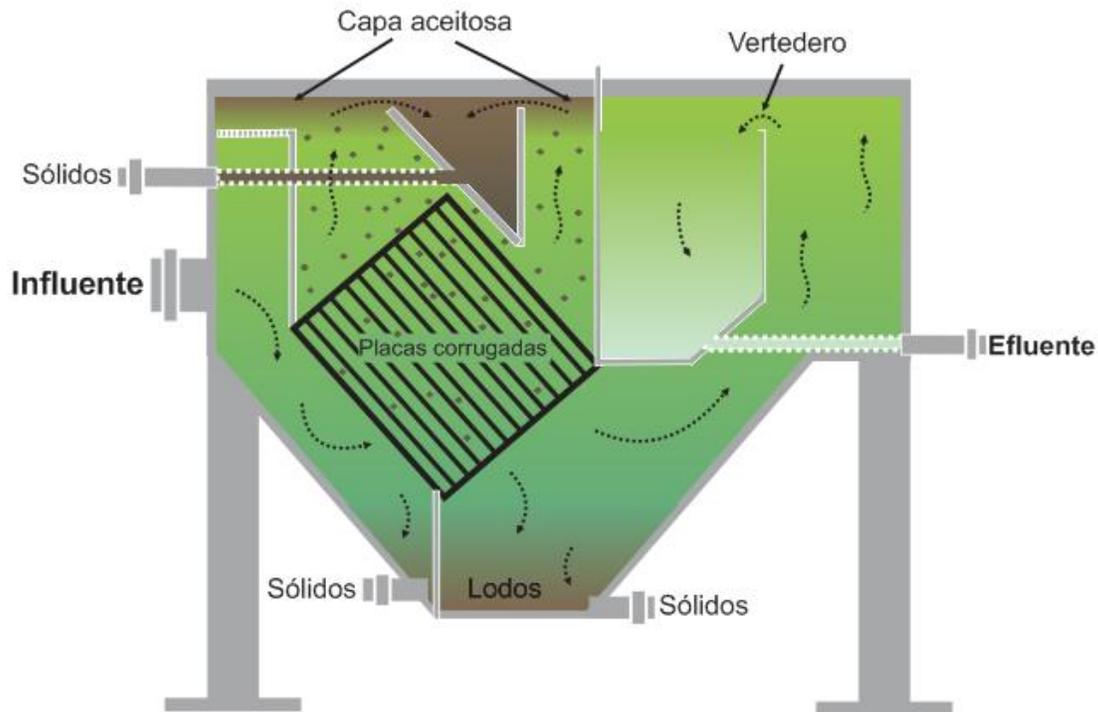
Ventajas:

- No tiene partes móviles.
- Bajos costos de mantenimiento.
- Bajos costos de operación.
- Bajos requerimientos de espacio.
- Tiempo de retención de 3-10 minutos, mientras que otros dispositivos de sedimentación requieren de 1-10 horas.
- Bajo costo de capital.

Desventajas:



- No recomendable para Sólidos Suspendedos totales mayores a 100-200 ppm.
- No tolera variaciones en el flujo a tratar.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.79 Separador de placas corrugadas (CPI)

15.1.1.3 Desarenado

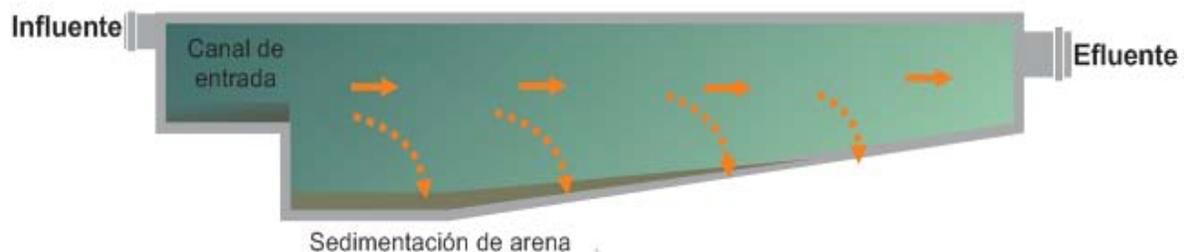
Es un proceso continuo de extracción del agua bruta de los sólidos de suspensión fácilmente decantable como grava, arena y partículas minerales. El objetivo de esta operación es eliminar todas aquellas partículas de granulometría superior a 200 micras, con el fin de evitar que se produzcan sedimentos en los canales y conductores, para proteger las bombas y otros aparatos contra la abrasión, eliminar las sobrecargas y atascamientos en las fases siguientes, y reducir las tareas de limpieza de balsas de homogeneización y biológicas.

Tipos de desarenadores:



- Controladas por velocidad (cámaras de desarenado de flujo horizontal).
- Aireadas.
- Tipo vortex (agitación con velocidad constante).

Los contaminantes que interfieren en el sistema son las grasas y aceites, debido a que por sus características se complica el tratamiento de agua residual.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.80 Desarenador

15.1.1.4 Sedimentación

Operación física en la que se aprovecha la fuerza de gravedad que hace que una partícula más densa que el agua tenga una trayectoria descendente, depositándose en el fondo del sedimentador. Es el método más frecuente para separar sólidos suspendidos y coloides

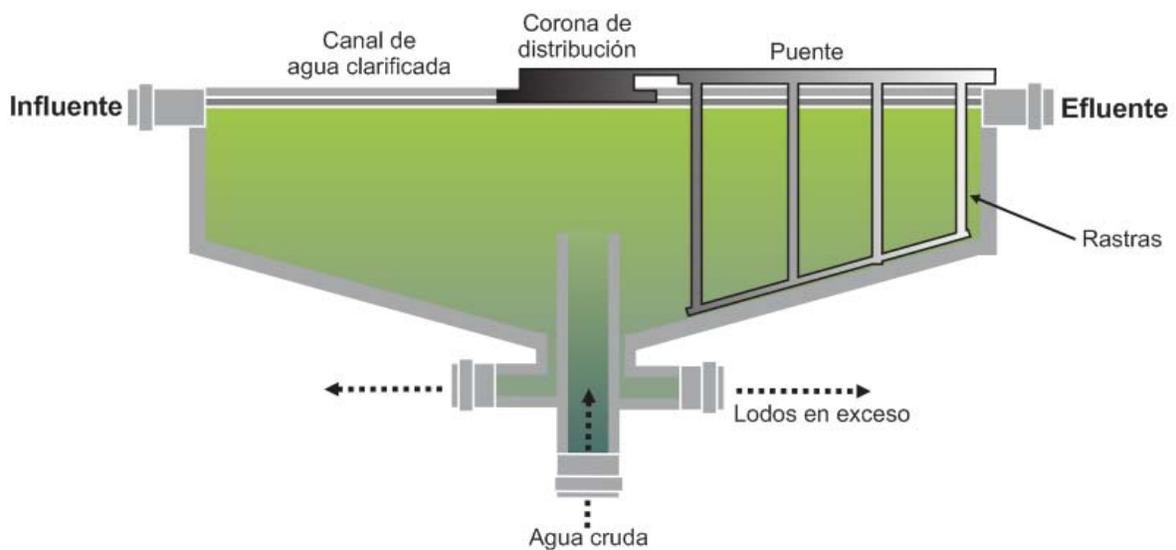
Esta operación será más eficaz cuando mayor sea el tamaño y la densidad de las partículas a separar del agua, es decir, cuando mayor sea su velocidad de sedimentación, siendo el principal parámetro de diseño para estos equipos. A esta operación de sedimentación se le suele denominar también decantación.

Realmente, este tipo de partículas se tienen en pocas ocasiones en aguas industriales. Lo más habitual es encontrar sólidos poco densos, por lo que es necesario, para hacer más eficaz la operación, llevar a cabo una coagulación-floculación previa.



La forma de los equipos donde llevar a cabo la sedimentación es variable, en función de las características de las partículas a sedimentar (tamaño, forma, concentración, densidad, etc.)

Las partículas depositadas en el fondo de los equipos (denominados lodos) se arrastran mediante rasquetas desde el fondo donde se “empujan” hacia la salida. Estos fangos, en muchas ocasiones y en la misma planta de tratamiento, se someten a distintas operaciones para reducir su volumen y darles un destino final.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.81 Sedimentador circular

Ventajas:

- Simplicidad de la instalación.
- La eficiencia de eliminación puede aumentarse mediante la adición de agentes de coagulación y/o floculación.

Desventajas



- Poco adecuada para materiales finos y emulsiones estables, incluso con coagulantes y floculantes.
- El flóculo puede contener otros contaminantes que pueden causar problemas a la hora de desechar el lodo.

15.1.1.5 Flotación por aire disuelto (DAF)

La flotación es un proceso en el cual se introducen micro burbujas de aire en un estanque con agua residual o lodo. Al ascender las microburbujas, las partículas presentes en el líquido se adhieren a éstas, separándose y formando una capa flotante de material concentrado. Con ello se consigue una efectiva remoción de Sólidos Suspendidos, Aceites & Grasas, y materia orgánica particulada (DBO₅).

En este sistema el aire se introduce en el agua residual bajo una presión de varias atmósferas. Los elementos principales de estos equipos son la bomba de presurización, el equipo de inyección de aire, el tanque de retención o saturador y la unidad de flotación propiamente dicha, donde tiene lugar la reducción brusca de la presión, por lo que el aire disuelto se libera, formando multitud de microburbujas de aire como se muestra en la Figura 1.82.

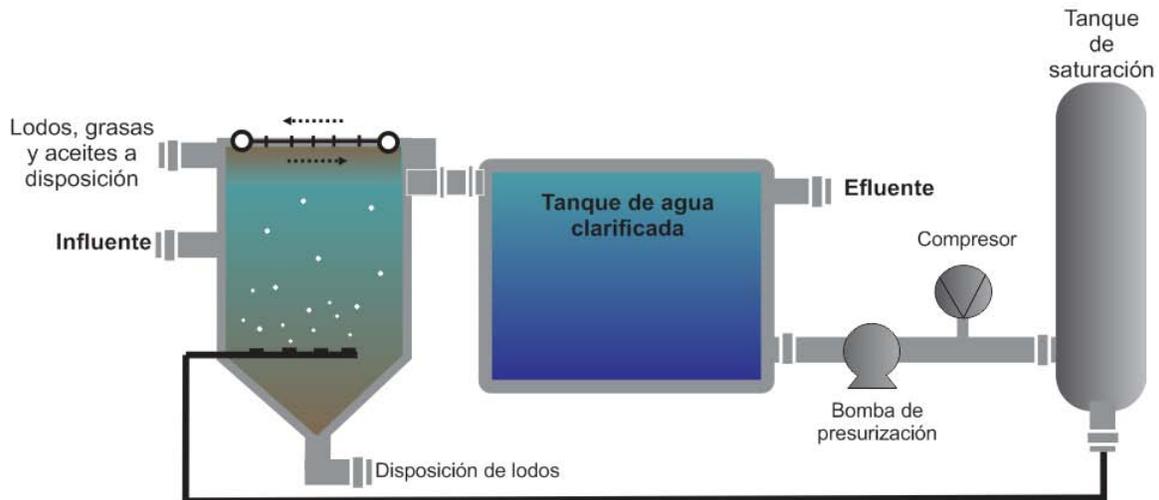
Ventajas:

- Requiere menos tiempo de la decantación y permite una mayor carga de sólidos en el agua.
- Alta eficiencia en la remoción de sólidos.
- Menor área requerida para instalación.
- Remoción de microorganismos y precipitados difíciles de sedimentar
- Alta tasa de separación.
- Más eficiente para remoción de DBO₅ que otros procesos de separación.

Desventajas:



- Sensible a variaciones de temperaturas, sólidos en suspensión, recargas hidráulicas, variaciones químicas y fisicoquímicas, comparado con procesos de sedimentación.
- Costos operacionales elevados cuando existe un control riguroso automático de parámetros.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.82 Sistema de Flotación por Aire Disuelto (DAF)

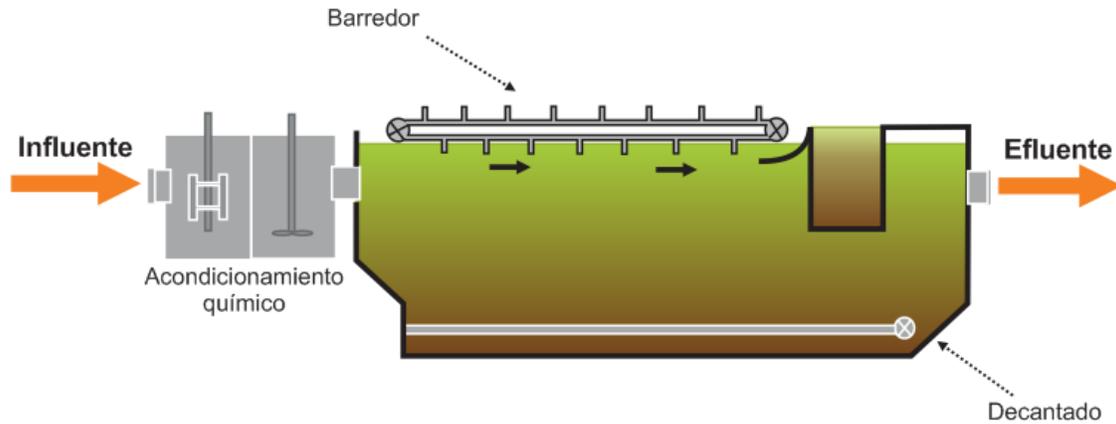
15.1.1.6 Flotación por aire inducido (IAF)

La operación es similar al caso anterior, pero la generación de burbujas se realiza a través de difusores de aire, normalmente situados en la parte inferior del equipo de flotación, o bien inducidas por rotores o agitadores. En este caso el tamaño de las burbujas inducidas es mayor que en el caso anterior.

La flotación se ha mejorado la generación de burbujas adecuadas y la utilización de reactivos para favorecer la operación, ha hecho posible la utilización de esta operación para la eliminación de materia más densa que el agua. Así se utiliza en el tratamiento de aguas procedentes de refinerías, industria de la alimentación, pinturas, etc.



Los sólidos en suspensión y las grasas y aceites, se adhieren a las burbujas y suben a la superficie en forma de espumas que rebosan por unos vertederos laterales.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.83 Sistema IAF.

15.1.1.7 Coagulación-Floculación

El objetivo de los procesos de coagulación-Floculación es la neutralización de las cargas eléctricas de los coloides y emulsiones presentes en el agua residual, seguido de un reagrupamiento de las partículas, de tal forma que sea factible su separación posterior ya sea por decantación o bien por flotación.

Ventajas:

- Requiere menos tiempo que la decantación y permite una mayor carga de sólidos en el agua.
- Es efectivo en la remoción de varios parámetros en forma simultánea.
- Es de operación simple.
- Emplea reactivos comunes para la coagulación y/o floculación.
- Posibilidad de aplicación en una gran variedad de matrices.



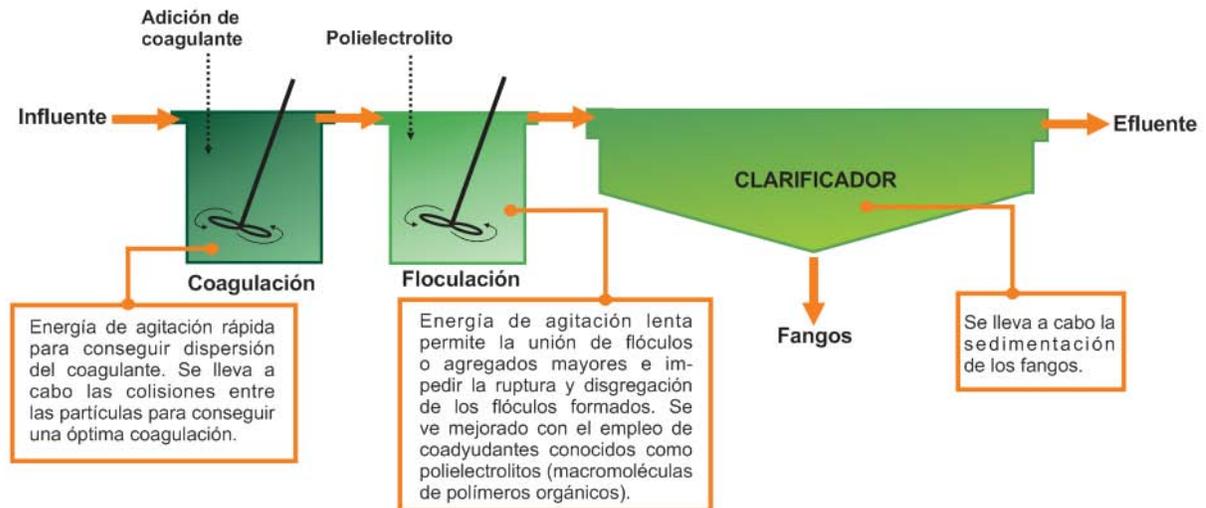
- Gran adaptación a fluctuaciones de concentraciones de contaminantes. contenidos en las aguas a tratar.

Desventajas:

- Requiere de uso de insumos constantes.
- Requiere zonas de almacenamiento de reactivos.
- Genera lodos y estos pueden ser peligrosos dependiendo de la toxicidad del efluente a tratar.
- Requiere de planes de manejo de lodos.
- Cuando las concentraciones de los parámetros son bajas la eficiencia disminuye, requiriendo mayor consumo de reactivos, generando una gran cantidad de lodos.
- Lodos voluminosos.

Los coagulantes suelen ser productos químicos que en solución aportan carga eléctrica contraria a la del coloide. Habitualmente se utilizan sales con cationes de alta relación carga/masa (Fe^{3+} , Al^{3+}) junto con polielectrolitos orgánicos, cuyo objetivo es el favorecer la floculación.

Los equipos en los que se lleva a cabo este proceso, suelen constar de dos partes bien diferenciadas:



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.84 Diagrama del proceso de coagulación y floculación

Primero se adicionan los reactivos, y se somete el agua a una fuerte agitación durante un corto periodo de tiempo, con el objetivo de conseguir una buena y rápida mezcla de reactivos y coloide para llevar a cabo la coagulación. A continuación se pasa a una zona donde la agitación es mucho menos intensa y donde el agua permanece más tiempo. En este caso el objetivo es que se produzca la floculación como se muestra en la Figura 1.84.

De esta forma la materia en suspensión tiene características mucho más adecuadas para su eliminación mecánica.

15.1.2 TRATAMIENTOS SECUNDARIOS

15.1.2.1 Filtros percoladores/filtros rociadores

Es un filtro biológico de lecho fijo que opera bajo condiciones aeróbicas. El agua a tratar se rocía sobre el filtro con ayuda de un rociador rotatorio, el agua pasa a través de los poros del filtro a medida que las aguas residuales se percolan por el medio,



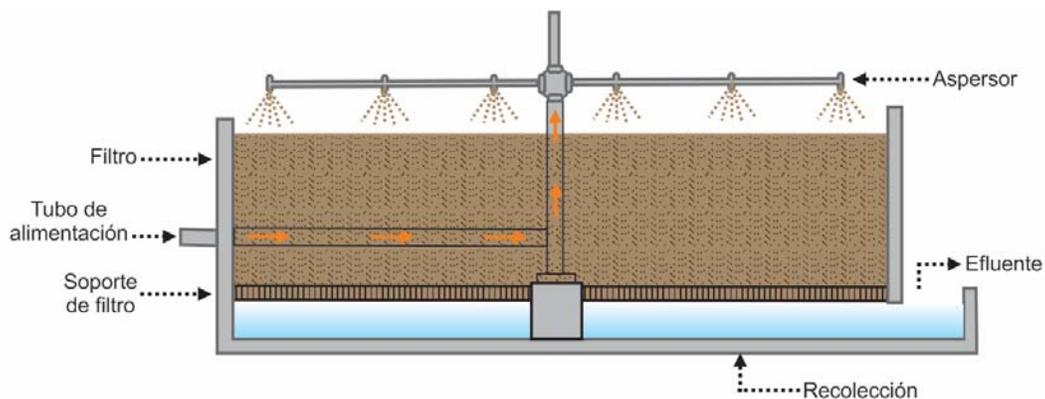
los microorganismos digieren y eliminan los contaminantes del agua. Los sólidos y las grasas deben eliminarse antes de rociar las aguas negras sobre el filtro percolador. Los filtros percoladores reducen la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), patógenos u organismos que causan enfermedades.

Ventajas:

- Operación sencilla
- Requiere área moderada, menor al del sistema de lagunas
- No requiere energía eléctrica y el costo de inversión es el más bajo de los sistemas aireados.
- La generación de olores es muy baja

Desventajas:

- Aplicación limitada para aguas residuales con altas cargas orgánicas contenidas en los efluentes
- Alta sensibilidad a sustancias tóxicas que podría tener el agua residual a tratar
- El nivel de remoción de patógenos es bajo



Fuente: Elaboración propia

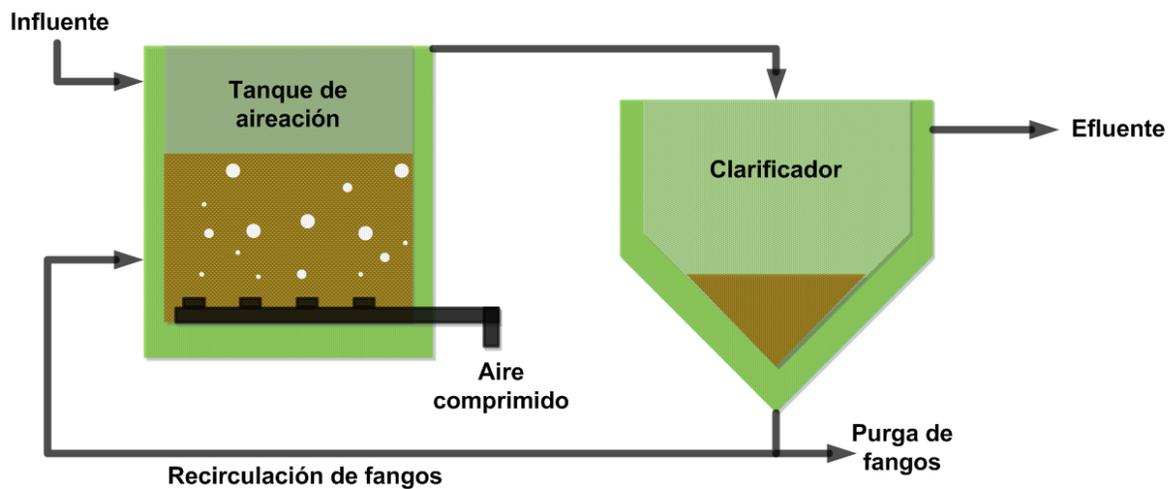
Figura 1.85 Filtros percoladores



15.1.2.2 Lodos Activados

Este sistema es el más conocido y el más usado para el tratamiento de aguas residuales. Es empleado en muchas refinerías en el mundo. Comúnmente usado en plantas petroquímicas y en refinerías donde los niveles de DBO_5 son bajos.

Los lodos activados son un proceso biológico de tratamiento de aguas residuales, que utilizan microorganismos para llevar a cabo la descomposición de los residuos. La materia orgánica soluble y coloidal se metaboliza con el lodo activado y se transforma en dióxido de carbono y agua. La mezcla de los lodos activados y del agua residual se denomina “licor mezclado”.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.86 Lodos activados

Es un sistema en el que se hace uso de microorganismos aeróbicos para degradar la materia orgánica en las aguas residuales para la obtención de un efluente de alta calidad. Se requiere de una fuente de oxígeno constante y programada para mantener las condiciones aeróbicas y mantener la biomasa activa suspendida en el tanque de aireación donde los microorganismos oxidan el carbono orgánico. Una vez que la materia orgánica ha sido oxidada, el efluente se envía a un sedimentador o decantador secundario en donde se separará el lodo (biomasa) del agua. Parte



de esta biomasa decantada es recirculada al reactor con el fin de mantener en él una buena concentración de microorganismos y otra parte se desecha (purga), llevándola a tratamiento de lodos, evitando así acumulaciones excesivas de microorganismos en el sistema que pueden alterar los tiempos de retención celular.

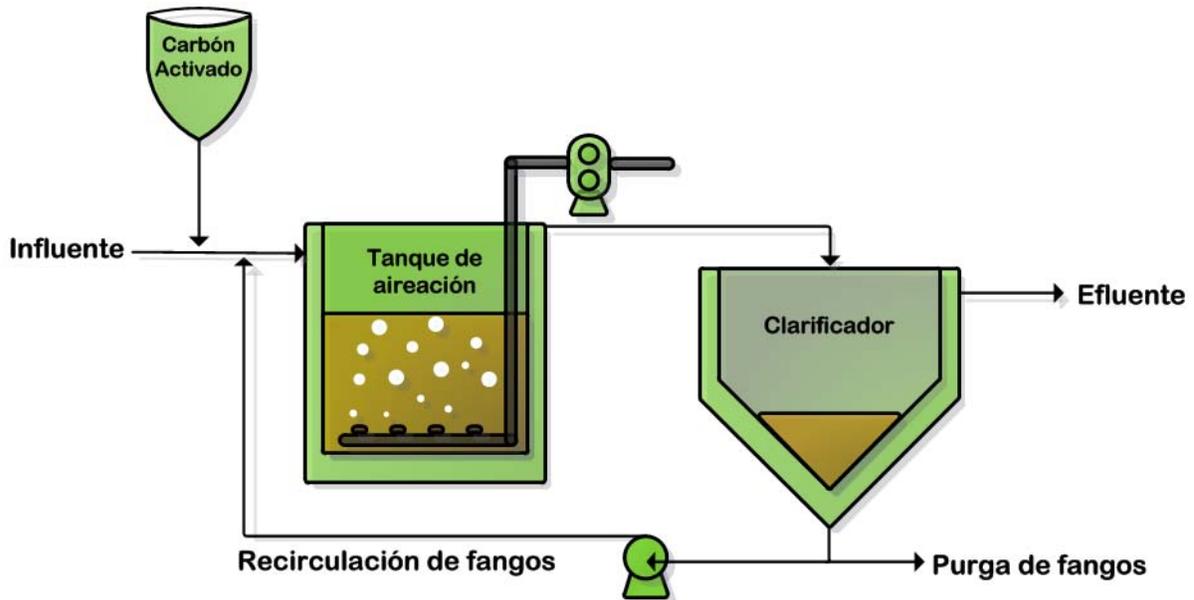
Ventajas:

- Flexibilidad a través de un control racional de la biomasa presente en el proceso.
- Alta eficiencia de remoción de carga orgánica sustancialmente más alta que la que se alcanza en otros procesos como los del tipo convencional por cultivo fijo.
- Minimización de olores ausencia al proceso.
- Puede incorporar desnitrificación al proceso.
- Posibilidades de regular energía consumida para variaciones de carga orgánica.
- Prescinde de sedimentación primaria. Los lodos generados son altamente mineralizados por lo que no requieren de tratamiento posterior

15.1.2.3 Bio-oxidación aerobia con adición de carbón activado en polvo (PACT)

Este sistema es similar a los lodos activados convencionales, en este sistema se lleva a cabo un tratamiento de oxidación biológica y la absorción con carbón activado simultáneamente. La mayor parte del carbón utilizado en este proceso, es reciclado junto con el lodo

El sistema PACT es generalmente usado para el tratamiento de agua residual de refinería.



Fuente: Mahajam S. (2008)

Figura 1.87 Diagrama Sistema PACT

El proceso está conformado por un tanque de aireación y un clarificador. El afluente entra al tanque de aireación donde entra en contacto con una mezcla de microorganismos y carbón activado.

15.1.2.4 Zanja de oxidación

Una zanja de oxidación es una modificación del sistema biológico de tratamiento con lodos activados que utiliza un tiempo extenso de retención de sólidos para la remoción de compuestos orgánicos biodegradables.

El efluente de las zanjas de oxidación normalmente se clarifica en un sedimentador secundarios separado. Un tanque anaeróbico puede ser añadido antes de la zanja para mejorar la remoción biológica del fósforo.

El proceso de las zanjas de oxidación es una tecnología de eficiencia demostrada para el tratamiento secundario de aguas residuales que es aplicable a cualquier situación en donde sea apropiado el sistema de lodos activados. Las zanjas de



oxidación pueden utilizarse en plantas que requieren nitrificación porque los tanques pueden ser dimensionados usando un tiempo de retención de sólidos apropiado para que se produzca nitrificación a la temperatura mínima del licor mezclado.

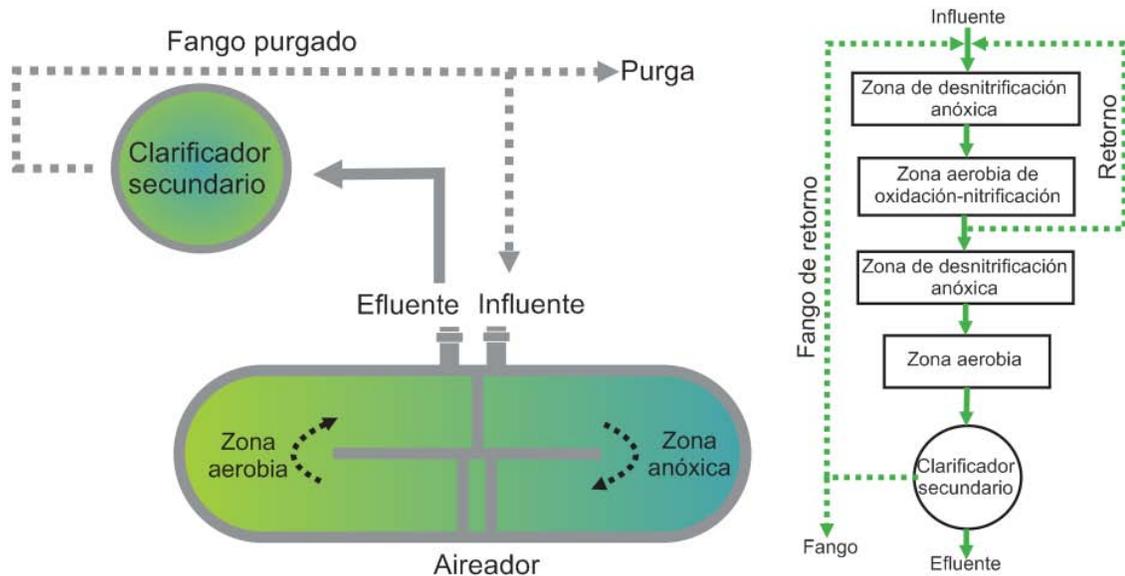
Esta tecnología es muy efectiva en instalaciones pequeñas, comunidades pequeñas e instituciones aisladas porque requieren un área de terreno mayor que las plantas de tratamiento convencionales.

Ventajas:

- Un nivel mayor de confiabilidad y desempeño con relación a otros procesos biológicos debido a que el nivel constante de agua y la descarga continua reducen la tasa de rebose del vertedero y eliminan la sobrecarga periódica de efluente que son comunes en otros procesos biológico tales como los reactores secuenciales (SBR).
- El tiempo extendido de retención hidráulica y la mezcla completa minimizan el impacto de cargas contaminantes extremadamente altas o de sobrecargas hidráulicas.
- Produce menos lodos que otros sistemas biológicos debido a la extensa actividad.

Desventajas:

- Las concentraciones de sólidos suspendidos en el efluente son relativamente altas en comparación con otras modificaciones del proceso de lodos activados.
- Requiere una superficie de terreno más grande que otras opciones de tratamiento con lodos activados. Esto puede ser muy costoso, restringiendo la factibilidad de uso de las zanjas de oxidación en áreas urbanas, suburbanas y otras áreas en donde el costo de la adquisición de terrenos es relativamente alto.



Fuente: EPA 1999

Figura 1.88 Zanja de oxidación

15.1.2.5 Reactores Biológicos Secuenciales (SBR)

Son reactores discontinuos en los que el agua residual se mezcla con un lodo biológico en medio aireado. Esta tecnología usa un solo reactor que opera en forma discontinua. El sistema SBR consta de los siguientes pasos cíclicos: llenado, reacción, decantación y vaciado. Dependiendo de la naturaleza del efluente a tratar, es la calidad y las propiedades de los lodos generados.

Ventajas:

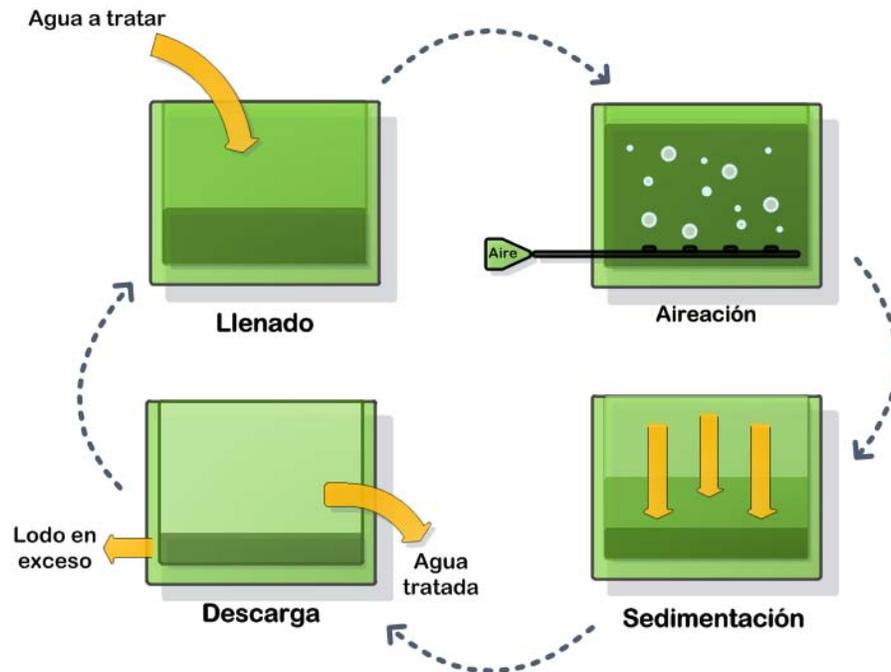
- Estabilidad y flexibilidad. Se adapta a condiciones fluctuantes y variaciones en la carga orgánica.
- Eliminación eficiente de DBO₅, nutrientes (N, P) y compuestos refractarios.
- Permite mayor control sobre el crecimiento de microorganismos.
- Mayor retención de biomasa en comparación a otras tecnologías como lodos activados
- Fácil control de la operación



- Menores costos de inversión
- Diseño compacto
- Generación de lodos secundarios “estabilizados”
- No requiere recirculación externa de fangos para mantener la cantidad de sólidos en el reactor.
- No requiere la construcción de decantador secundario con el consiguiente ahorro de inversión y de espacio.

Desventajas:

- Requiere capacitación técnica
- Mayor mantenimiento
- Riesgo de taponamiento de los dispositivos de aireación durante los ciclos operativos
- No es aplicable a todo tipo de efluente orgánico, la presencia de compuestos tóxicos puede afectar negativamente el desempeño de este tratamiento.
- En algunas ocasiones se requiere agregar nutrientes tanto al SBR como al afluente final.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.89 Secuencia de operación del reactor SBR.

El agua residual entra al reactor parcialmente lleno con biomasa, una vez que el reactor se llena, este opera como un sistema convencional de lodos activados por sin el flujo continuo de afluente o descarga de efluente. La aireación y la mezcla paran al completarse las reacciones biológicas, se sedimenta la biomasa y se remueve el sobrenadante. El exceso de biomasa se purga, y se mantiene constante la relación de masa entre el sustrato afluente y la biomasa en el reactor.

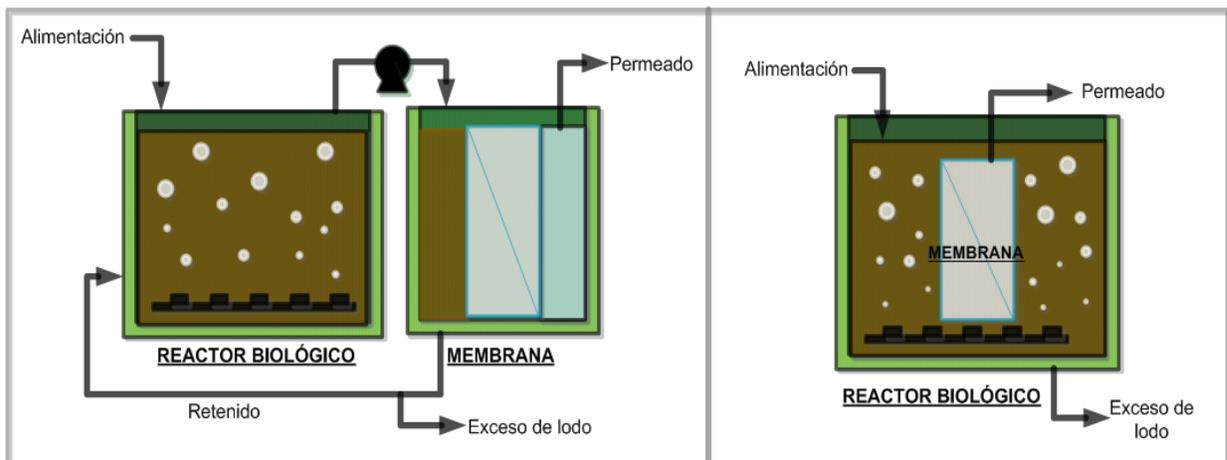
15.1.2.6 Reactores Biológicos de Membrana (MBR)

Se incluye en las tecnologías de membrana, la aplicación de la tecnología MBR permite la separación del fango y el líquido mediante membranas, presentando ventajas frente a los decantadores secundarios. Esta tecnología tiene mayor capacidad para eliminar DQO coloidal.



Los MBR están constituidos por dos secciones:

1. Reactor biológico: responsable de la degradación de los compuestos presente en el agua residual.
2. Módulo de membranas: encargado de llevar a cabo la separación física del licor de mezcla.



Fuente: Centro Canario del Agua (2003)

Figura 1.90 Reactores Biológicos de Membranas

Ventajas:

- Dimensiones compactas.
- Flexibilidad de operación.
- La dosificación de nutrientes puede ser regulada, minimizando la formación de lodos excedentes.
- No necesita sistema de clarificación.

Desventajas:

- Elevado costo de implantación y explotación.
- Las altas concentraciones de fango pueden influir de forma negativa en el rendimiento de la membrana.



15.1.3 TRATAMIENTOS TERCIARIOS O AVANZADOS

15.1.3.1 Filtración

La filtración es una operación en la que se hace pasar el agua a través de un medio poroso, con el objetivo de retener la mayor cantidad posible de materia en suspensión. El medio poroso tradicionalmente utilizado es un lecho de arena, de altura variable, dispuesta en distintas capas de distinto tamaño de partícula, siendo la superior la más pequeña de entre 0.15 y 0.3 mm. Es una operación muy utilizada en el tratamiento de aguas para la reutilización, para eliminar la materia en suspensión que no se ha eliminado en anteriores operaciones (sedimentación). En aguas industriales hay más variedad en cuanto al material filtrante utilizado, siendo habitual el uso de tierra diatomácea. También es habitual, para mejorar la eficiencia, realizar una coagulación-floculación previa.

Hay varias clasificaciones para los sistemas de filtración como por ejemplo: Por gravedad o a Presión, lenta o rápida, de torta o en profundidad.

Tabla 1.37 Sistemas de filtración convencional.

	Tecnología	Aplicación	Manejo	Costo	Limitantes
Filtración convencional	Filtros de arena	Sedimentos suspendidos, remoción media de bacterias y materia orgánica.	Sencillo	Costo bajo de inversión en infraestructura y de manejo, costo elevado de terreno	Remoción de 80-90% de bacterias y 60% de materia orgánica, requiere gran superficie.
	Filtros de tierras diatomáceas	Remoción de turbiedad y bacterias	Sencillo	Costo bajo de inversión y de manejo.	Útiles en caso de poca turbiedad y bajos contenidos de bacterias, no retiene materia orgánica.
	Filtros de carbón activado	Remoción de materia orgánica y bacterias	Sencillo	Costo bajo de inversión, costo medio de mantenimiento	Generación de residuos, continúa renovación del filtro, no remueve bacterias ni nitrato.

En la actualidad y en algunas de sus aplicaciones, estos métodos están siendo desplazados por operaciones con membranas, especialmente por microfiltración.



Ventajas:

- Los campos de drenaje pueden ser pequeños y poco profundos.
- Los requerimientos de energía eléctrica son moderados
- Los costos de construcción son bajos
- La capacidad de tratamiento puede aumentarse usando un diseño modular
- Son una alternativa mecánicamente simple de bajo costo

Desventajas:

- El tamaño del medio filtrante puede ocasionar problemas de obstrucción en el sistema cuando se tienen partículas muy grandes
- Si la configuración del filtro es ascensional se requiere de una rejilla que retenga el medio filtrante
- Los requisitos de área pueden ser una limitación
- Se requiere un mantenimiento rutinario
- En temperaturas extremadamente frías se deben tomar precauciones para prevenir la congelación del sistema de filtrado.

15.1.3.2 Adsorción

El proceso de adsorción consiste en la captación de sustancias solubles en la superficie de un sólido. Un parámetro fundamental será la superficie específica del sólido, dado que el compuesto soluble a eliminar se ha de concentrar en la superficie del mismo. La necesidad de una mayor calidad de las aguas está haciendo que este tratamiento esté en auge. Es considerado como un tratamiento de refino, y por lo tanto al final de los sistemas de tratamiento más usuales, especialmente con posterioridad a un tratamiento biológico.

El sólido utilizado generalmente en el tratamiento de aguas es el carbón activo, aunque recientemente se están desarrollando diversos materiales sólidos que



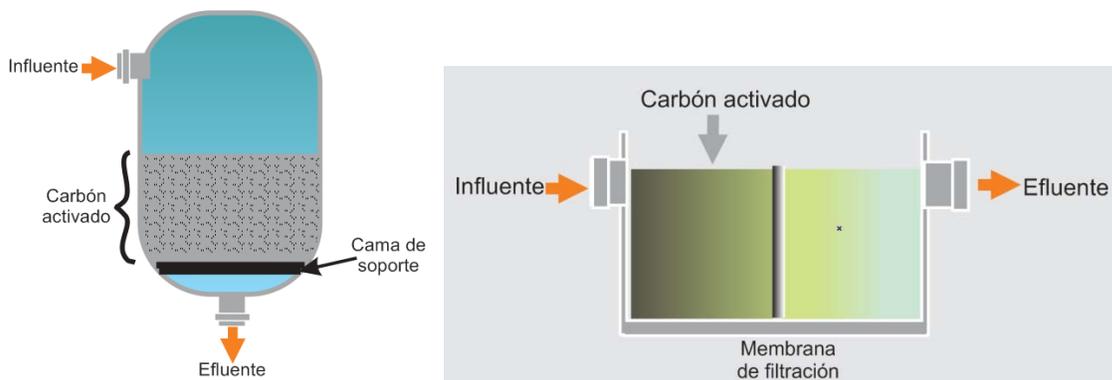
mejoran, en ciertas aplicaciones, las propiedades del carbón activo. Su aplicación se realiza en lechos empacados, tipo columnas, cargados con gránulos del material adsorbente (carbón activado) y se bombea, a través del filtro empacado, el efluente a tratar. A medida que el agua fluye a través de la columna, los químicos se adsorben a la superficie porosa de los gránulos.

Ventajas:

- Especial para remoción del mal olor, sabor o color desagradable
- Remueve plaguicidas y compuestos orgánicos volátiles
- Gran capacidad de remoción
- Económicos
- Fáciles de operar y mantener
- Su uso es ampliamente usado.

Desventajas:

- Mantenimiento frecuente
- Esta tecnología no destruye los contaminantes y eventualmente se requiere de otra tecnología que so lo haga
- Generan residuos que deben ser dispuestos en vertederos controlados.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.91 Sistema del proceso de adsorción



15.1.3.3 Separación por Membranas

Los procesos de membrana son procesos de difusión física de partículas en el agua. La membrana funciona como una pared de separación selectiva o un filtro muy específico, que dejará pasar el agua y a ciertas sustancias, mientras que otras quedan atrapadas en ella, dependiendo de las características de la partícula y de la membrana.

Hay varios métodos para permitir que las sustancias atraviesen una membrana. Ejemplos de estos métodos son la aplicación de alta presión, el mantenimiento de un gradiente de concentración en ambos lados de la membrana y la introducción de un potencial eléctrico (Tabla 1.38).

Tabla 1.38 Tecnologías de membrana

Tecnología de membrana	Fuerza conductora	Mecanismo de separación	Aplicaciones
Microfiltración	Presión hidrostática	Criba	Eliminación de sólidos en suspensión, incluidos microorganismos
Ultrafiltración	Presión hidrostática	Criba	Separación de macromoléculas y partículas coloidales
Nanofiltración	Presión hidrostática	Adsorción preferencial/ difusión	Separación de compuestos orgánicos pequeños y algunos iones multivalentes o moléculas polares
Osmosis Inversa	Presión hidrostática	Adsorción preferencial/ difusión	Separación de microsolutos y sales de una disolución
Electrodialisis	Potencial eléctrico	Intercambio iónico vía transporte de contraión	Separación de iones de agua y solutos no iónicos
Destilación con membranas	Temperatura, Presión de vapor	Mayor volatilidad, difusión de gas a través de poros.	Separación de agua de solutos no volátiles y recuperación de solutos volátiles, Nivel demostración

Fuente: Tecnologías de tratamiento de aguas para su reutilización. Programa Consolider Tragua.

Pag.185



Actualmente existen muy diversas clases de membranas, que permiten el paso de unos solutos u otros en función de su naturaleza, carga iónica o tamaño. Los principales son:

- Electrodialisis
- Ultrafiltración
- Microfiltración
- Ósmosis inversa

15.1.3.4 Ósmosis Inversa

Se utiliza para la eliminación de impurezas iónicas como nitratos, fosfatos, sulfatos, iones metálicos, coloides, compuestos orgánicos y también de microorganismos.

Consiste en la aplicación un una presión superior a la presión osmótica del sistema en la solución con mayor contenido de sal, la cual se pone en contacto con una membrana semipermeable, esto produce la migración del agua desde el lado concentrado al lado diluido.

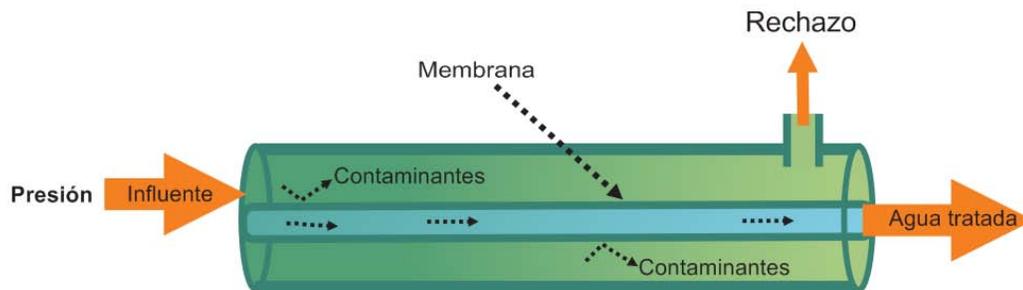
Ventajas:

- Eliminación efectivas de contaminantes como coloides, pirógenos, etc.
- Fácil mantenimiento.
- Permite remover la mayoría de los sólidos inorgánicos u orgánicos disueltos en el agua
- Remueve los materiales suspendidos y microorganismos
- Realiza el proceso de purificación de forma continua.
- Es modular y necesita poco espacio, lo que le confiere una versatilidad excepcional en cuanto al tamaño de las plantas



Desventajas:

- Requiere un buen pre-tratamiento para evitar que los contaminantes dañen la membrana.
- Requiere un gran consumo de energía.
- Genera entre un 30% y 60% de rechazo (lavado de membrana) según el agua tratada que debe tratarse.
- No son eficientes para el tratamiento de aguas con elevado contenido de elementos.
- A pequeñas escalas puede resultar más cara que a mayores escalas.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.92 Ósmosis inversa

15.1.3.5 Ultrafiltración

La UF utiliza membranas porosas con un tamaño medio de poro en el rango de 0.001-0.1 μm para separar agua y microsolutos, virus, materia coloidal y macromoléculas. La caída de presión está comprendida en el rango 1-5 bar.

Esta tecnología emplea series de unidades modulares en forma de tubos que contienen membranas filtrantes a través de las cuales fluye el efluente mediante la impulsión ejercida por bombas de baja presión. Generalmente se utiliza como pre-



tratamiento de la osmosis inversa y como refinado de tratamientos primarios y biológicos.

La principal aplicación de esta tecnología es para la desalinización de agua salobre, tratamiento de aguas reusadas para la generación de aguas con baja salinidad para aplicaciones industriales y tratamiento terciario de efluentes dando una remoción de los compuestos orgánicos, turbidez, Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Sedimentables, Agentes Patógenos , Color y Turbidez.

Ventajas:

- Alta eficiencia y bajo consumo energético
- Uso reducido de reactivos químicos
- Tratamiento de grandes volúmenes de agua
- Bajos costos de operación
- Uso de pequeñas áreas debido a su tamaño compacto

Desventajas:

- Genera de un 30-60% de rechazo.
- A pequeñas escalas no resulta factible
- Las membranas no son completamente semipermeables.

15.1.3.6 Electrodiálisis y Electrodiálisis Inversa

Es una tecnología que bajo un campo eléctrico se extraen las sustancias orgánicas e inorgánicas ionizadas disueltas en una disolución acuosa, nitrato, fosfato, sulfato entre otras, a través de membranas selectivas de intercambio iónico, donde la transferencia de iones se logra por la aplicación de un campo eléctrico.

Una pila de electrodiálisis está formada por tres celdas donde una corriente directa pasa a los electrodos, todos los iones cargados positivamente (cationes) tienen a migrar hacia el cátodo, por lo tanto todos los iones cargados negativamente (aniones) tienden a migrar hacia el ánodo. Para la celda central, la membrana



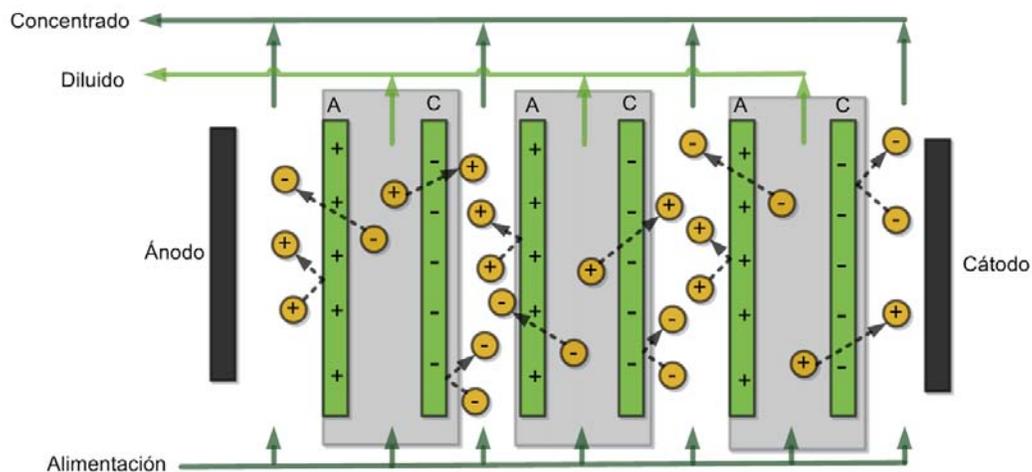
permeable a los aniones de la derecha no admite cationes de la derecha y la membrana permeable a los cationes en la izquierda actúa como una barrera para los iones negativos procedente del compartimiento de la izquierda, como resultado, la concentración de los electrolitos disminuye en la celda central y aumenta en las adyacentes.

Ventajas:

- Operación simple
- Se puede ajustar para el uso con sistema pequeños, por lo general funciona automáticamente con pocos requisitos de mantenimiento y funcionamiento.
- Puede utilizar diferentes fuentes de energía eléctrica.

Desventajas:

- Requiere gran cantidad de energía para producir la corriente constante que impulsa la purificación y bombea el agua a través del sistema.
- Necesita purificación previa
- No se puede usar para aguas de dureza superior a 1 ppm.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.93 Esquema de electrodiálisis



15.1.3.7 Desinfección

La desinfección pretende la destrucción o inactivación de los microorganismos que puedan causarnos enfermedades, dado que el agua es uno de los principales medios por el que se transmiten. Los organismos causantes de enfermedades pueden ser bacterias, virus, protozoos y algunos otros.

En el caso de aguas residuales industriales, el objetivo puede ser no solo desactivar patógenos, sino cualquier otro organismo vivo, si lo que se pretende es reutilizar el agua.

15.1.3.8 DESINFECCIÓN CON LUZ ULTRAVIOLETA.

El sistema de desinfección con luz ultravioleta (UV) transfiere energía electromagnética desde una lámpara de vapor de mercurio al material genético del organismo (ADN o ARN). Cuando la radiación UV penetra en las paredes de la célula de un organismo, esta destruye la habilidad de reproducción de la célula. La radiación UV, generada por una descarga eléctrica a través de vapor de mercurio, penetra al material genético de los microorganismos y retarda su habilidad de reproducción.

En una planta, la eficacia de la desinfección está directamente relacionada con la concentración de componentes coloidales y de partículas en el agua residual.

La longitud óptima para desactivar eficazmente los microorganismos se encuentra en el rango de 250-270 nm. La intensidad de la radiación emitida por la lámpara se disipa a medida que la distancia de la lámpara aumenta.

Ventajas:

- La desinfección con luz UV es eficaz para la desactivación de la mayoría de los virus y esporas.



- La desinfección con luz UV es más un proceso físico que una desinfección química, lo cual elimina la necesidad de generar, manejar, transportar, o almacenar productos químicos tóxicos, peligrosos o corrosivos.
- No existe ningún efecto residual que pueda afectar a los seres humanos o cualquier organismo acuático.
- La desinfección con luz UV es de uso fácil para los operadores.
- La desinfección con luz UV tiene un período de contacto más corto en comparación con otros desinfectantes.
- El equipo de desinfección con luz UV requiere menos espacio que otros métodos.

Desventajas:

- La baja dosificación puede no desactivar efectivamente algunos virus, esporas y quistes.
- Algunas veces los organismos pueden reparar o invertir los efectos destructivos de la radiación UV mediante un "mecanismo de reparación", también conocido como fotoreactivación o, en ausencia de radiación como "reparación en oscuro".
- Es necesario un mantenimiento preventivo para controlar la acumulación de sólidos en la parte externa de los tubos de luz.
- La turbidez y los sólidos suspendidos totales (SST) en el agua residual hacen que la desinfección con luz UV sea ineficaz.
- La desinfección con luz UV no es tan económica como la desinfección con cloro, pero los costos son competitivos cuando la cloración requiere descloración.



Tabla 1.39 Tabla comparativa de desinfección con cloro y desinfección por UV.

	Desinfección por cloro	Desinfección por UV
Sin subproductos de la desinfección	×	✓
Sin residuos químicos	×	✓
No corrosivo	×	✓
Sin riesgos para la seguridad de la comunidad	×	✓
Eficaz contra <i>Cryptosporidium</i> y <i>Giardia</i>	×	✓

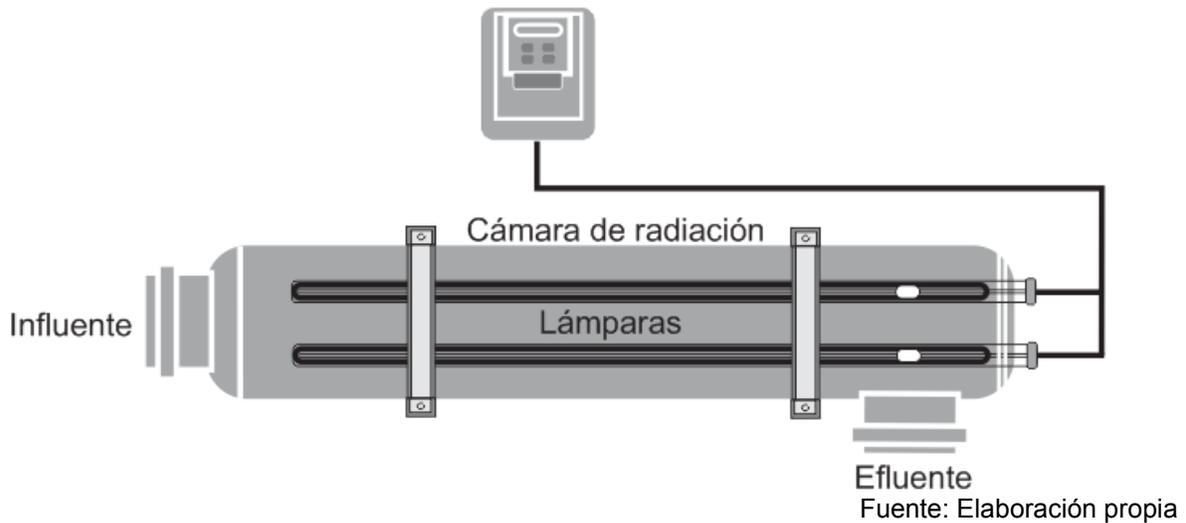


Figura 1.94 Sistema de desinfección UV compacta con lámparas de alto flujo

15.1.3.9 DESINFECCIÓN CON CLORO

La desinfección se ha convertido en uno de los mecanismos principales para la desactivación o destrucción de los organismos patógenos. Para que la desinfección sea efectiva, el agua debe ser tratada adecuadamente.



APLICABILIDAD

El cloro es el desinfectante más usado para el tratamiento del agua residual doméstica porque destruye los organismos a ser inactivados mediante la oxidación del material celular. El cloro puede ser suministrado de muchas formas que incluyen el gas cloro, las soluciones de hipoclorito y otros compuestos clorinados en forma sólida o líquida.

La selección de un desinfectante adecuado para una instalación de tratamiento depende de los siguientes criterios:

- La capacidad de penetrar y destruir los gérmenes infecciosos en condiciones normales de operación.
- La factibilidad y seguridad en el manejo, almacenamiento y transporte.
- La ausencia de residuos tóxicos y de compuestos mutagénicos o carcinógenos.
- Costos razonables de inversión de capital y de operación y mantenimiento (O/M)

El cloro es un desinfectante que tiene ciertos limitantes en términos de salubridad y seguridad, pero al mismo tiempo tiene un largo historial como un desinfectante efectivo.

Ventajas:

- La cloración es una tecnología bien establecida
- En la actualidad la cloración es más eficiente en términos de costo que la radiación UV o la desinfección con ozono
- El cloro residual que permanece en el efluente del agua residual puede prolongar el efecto de desinfección aún después del tratamiento inicial, y puede ser medido para evaluar su efectividad.
- La desinfección con cloro es confiable y efectiva para un amplio espectro de organismos patógenos.



- El cloro es efectivo en la oxidación de ciertos compuestos orgánicos e inorgánicos
- La cloración permite un control flexible de la dosificación
- El cloro puede eliminar ciertos olores molestos durante la desinfección.

Desventajas:

- El cloro residual, aún a bajas concentraciones, es tóxico a los organismos acuáticos y por ello puede requerirse la descloración.
- Todas las formas de cloro son muy corrosivas y tóxicas. Como consecuencia, el almacenamiento, el transporte y el manejo presentan riesgos cuya prevención requiere normas más exigentes de seguridad industrial.
- El nivel total de sólidos disueltos se incrementa en el agua efluente.
- El cloro oxida ciertos tipos de materiales orgánicos del agua residual generando compuestos más peligrosos.
- El cloro residual es inestable en presencia de altas concentraciones de materiales con demanda de cloro, por lo cual pueden requerirse mayores dosis para lograr una desinfección adecuada.
- Algunas especies parásitas han mostrado resistencia a dosis bajas de cloro, incluyendo ocistos de *Cryptosporidium parvum*, los quistes de *Entamoeba histolytica* y *Gardia lamblia*, y los huevos de gusanos parásitos
- Se desconocen los efectos a largo plazo de la descarga de compuestos de la descloración al medio ambiente.

15.1.3.10 DESINFECCIÓN CON OZONO

Las actividades de desinfección son consideradas como los mecanismos principales en la desactivación o destrucción de los organismos patógenos para prevenir la dispersión de enfermedades transmitidas a través del agua.



Es muy importante que las aguas residuales sean tratadas adecuadamente antes de realizarse las actividades de desinfección para que la acción de cualquier desinfectante sea eficaz.

El ozono se produce cuando las moléculas de oxígeno (O_2) son disociadas por medio de una fuente de energía produciendo átomos de oxígeno que posteriormente chocan con una molécula de oxígeno para formar un gas inestable, el ozono (O_3), que se utiliza para la desinfección de las aguas residuales.

El ozono es un oxidante y agente germicida de virus muy eficaz. Los mecanismos de desinfección asociados con el uso del ozono incluyen:

- La oxidación o destrucción directa de la pared de la célula con la salida de componentes celulares fuera de la misma.
- Las reacciones con los subproductos radicales de la descomposición del ozono
- El daño a los componentes de los ácidos nucleicos (purinas y piridinas)
- La ruptura de las uniones de carbono- nitrógeno que conduce a la despolimerización.

La desinfección con cloro se utiliza generalmente en plantas de tamaño mediano o grande una vez que el agua residual haya recibido por lo menos tratamiento secundario. La desinfección con ozono tiene la capacidad de lograr niveles más altos de desinfección en comparación con el cloro o la luz ultravioleta; sin embargo, los costos de inversión así como los gastos de mantenimiento no son competitivos con las alternativas disponibles.

Ventajas:

- El ozono es más eficaz que la utilización del cloro para la desinfección o destrucción de virus y bacterias.



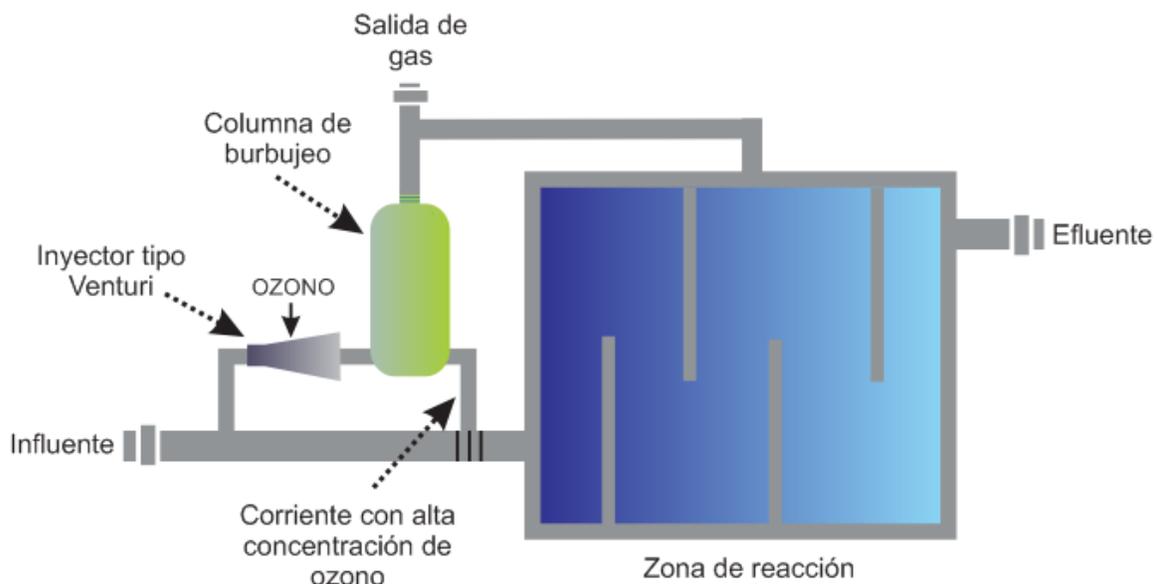
- El proceso de ozonización utiliza un período corto de contacto (aproximadamente de 10 a 30 minutos).
- No existen residuos peligrosos que necesiten ser removidos después del proceso de ozonización porque el ozono se descompone rápidamente.
- Después del proceso de ozonización, los microorganismos no crecen nuevamente, a excepción de aquellos que están protegidos por las partículas en la corriente de agua residual.
- El ozono es generado dentro de la planta, existiendo así muy pocos problemas de seguridad industrial asociados con el envío y el transporte.
- El proceso de ozonización eleva la concentración de oxígeno disuelto (O.D.) del efluente. El incremento O.D. puede eliminar la necesidad de reaeración y también puede incrementar el nivel de O.D. en la corriente de agua receptora.

Desventajas:

- La baja dosificación no puede desactivar efectivamente algunos virus, esporas o quistes.
- El proceso de ozonización es una tecnología más compleja que la cloración o la desinfección con luz ultravioleta, por lo cual se requieren equipos complicados y sistemas de contacto eficientes.
- El ozono es muy reactivo y corrosivo, requiriendo así de materiales resistentes a la corrosión tales como el acero inoxidable.
- El proceso de ozonización no es económico para las aguas residuales con altas concentraciones de sólidos suspendidos (SS), demanda bioquímica del oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno, o carbono orgánico total.



- El ozono es extremadamente irritante y posiblemente tóxico, así que los gases de escape que salen de la cámara de contacto deben ser destruidos para evitar que los trabajadores estén expuestos a ellos.
- El costo del tratamiento puede ser relativamente alto en cuanto a la inversión de capital y la demanda de energía eléctrica.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.95 Sistema de desinfección con Ozono

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** es uno de los sistemas que habitualmente se usan para la desinfección con ozono donde con un inyector tipo Venturi se mezcla la fase gas-acuosa y la columna de burbujeo optimiza la transferencia de ozono y la desgasificación de la corriente de agua. Esta corriente, con alta concentración de ozono, se incorporaría al flujo principal mediante mezcladores y pasa a la zona gas-líquido y a la zona de reacción.

15.1.3.11 Intercambio iónico



Remueve ciertos iones de la corriente residual, cediendo a cambio una cantidad equivalente de otros iones del mismo signo, además de proporcionar una remoción directa de amonio, nitrato, índice de fenol, arsénico, bromo y mercurio. Las operaciones de intercambio iónico con básicamente reacciones químicas de sustitución, entre el electrolito en solución y un electrolito insoluble, con el cual se pone en contacto la solución

De esta forma, cationes inocuos, como el hidrógeno (H^+), pueden sustituir metales pesados tóxicos, mientras que iones inocuos, como el hidróxido (OH^-) puede sustituir aniones tóxicos como los fenoles y cianuros. Las resinas más utilizadas son las constituidas por poliestireno y poliamidas. Son muy útiles para la eliminación de trazas de metales pesados y para obtener aguas desmineralizadas.

Ventajas:

- Operación simple
- Utiliza espacios pequeños
- No genera lodos
- Gran adaptación a fluctuaciones de concentraciones de elementos contenidos en las aguas a tratar.

Desventajas:

- Costos operacionales por consumo de reactivos químicos
- Requiere el uso de regenerantes
- Genera efluentes que deben ser tratados
- Requiere pre-tratamiento en efluentes con alta carga de SSR

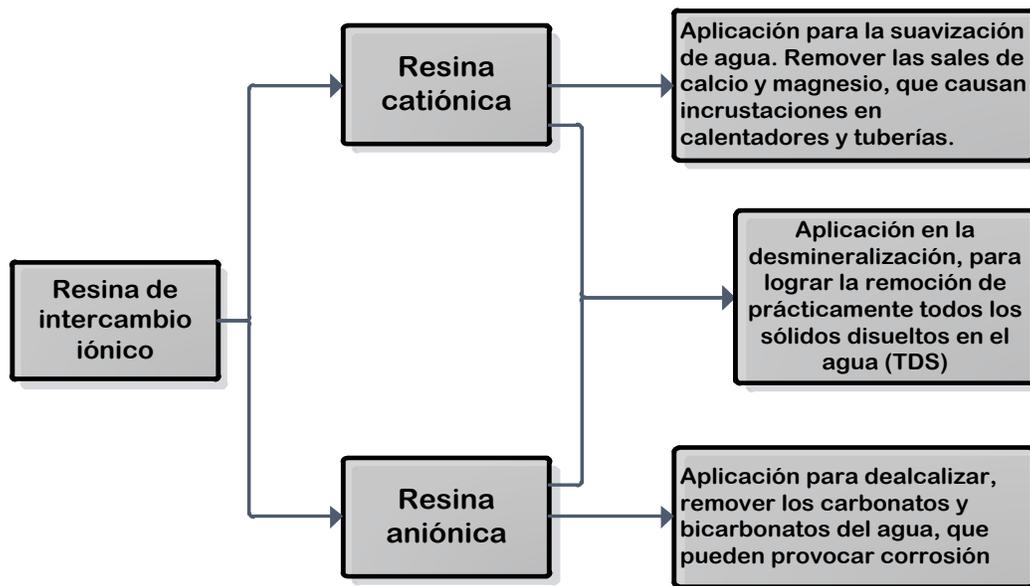


Figura 1.96 Resinas de intercambio iónico

15.1.3.12 Precipitación química

Es el proceso de formación de sales insolubles, o la transformación química de un ión en otro con mayor o menor estado de oxidación que provoque la formación de un compuesto insoluble. Una instalación de precipitación consiste normalmente de uno o dos tanque de mezcla con agitación, en los que se agrega el agente y posiblemente otros agente químicos, un tanque de sedimentación y tanques de almacenamiento para los agentes químicos.

Los agentes químicos de precipitación típicos son:

- Cal
- Dolomita.
- Hidróxido de Sodio.
- Sosa comercial. Metales pesados
- Sales de calcio. Sulfatos o fluoruros
- Sulfuro Sódico. Mercurio
- Poliorganosulfuros. Mercurio



Floculantes para facilitar una mayor precipitación:

- Sales ferrosas y férricas
- Sulfatos de aluminio
- Polímeros
- Poliorganosulfuros

Se aplica a metales tóxicos o no Fe, Cu, Zn, Be, Ti, Al, Pb, Hg, Cr. También se precipitan sulfitos, fosfatos, sulfatos y fluoruros por adición de Ca^{++} . Precipitan como sales o complejos de hierro los sulfuros, fosfatos, cianuros y sulfocianuros.

Ventajas:

Cal como agente.

- Prevención del aumento del contenido de sales en el agua residual
- Mejora en la sedimentación del lodo
- Mejora la deshidratación del lodo.
- Bajo costo

Sulfuro Sódico

- Reducción de la cantidad de lodo (alrededor de un 30% en volumen en comparación con el tratamiento con cal)
- Reducción de la cantidad de agentes químicos empleados (alrededor del 40% en comparación con el tratamiento con cal).
- Produce niveles de metales más bajos en el efluente tratado.
- Alta eficiencia en la remoción de metales suspendidos y disueltos de una corriente de agua residual.



Desventajas:

Cal como agente.

- Problemas operativos asociados con la manipulación, almacenaje y alimentación de la cal.
- Aumento de la cantidad de lodo debido al exceso de hidróxido de cálcico.
- Problemas de mantenimiento

Sulfuro Sódico

- Generación de sulfuro de hidrógeno cuando el lote disminuye su pH.
- Problemas de olor asociados con el sulfuro sódico.



15.2 Anexo II

Actualización de índices y costos en Capdetworks®

Tabla 1.40 Costos unitarios para el D.F.

Concepto	Costo original en CAPDET (\$UDS)	
Edificios	557.27	\$/m2
Movimiento de tierra	1.7	\$/m3
Concreto en muros	292.79	\$/m3
Techumbres	128.71	\$/m3
Pasamanos	17.01	\$/m2
Renta de grúa	89.23	\$/m
Electricidad	72.36	\$/hr
Cal	0.08	\$/kg
Sales de hierro	0.14	\$/kg
Polímeros	3.86	\$/kg
Mano de obra de construcción	14.47	\$/hr
Mano de obra de operadores	8.1	\$/hr
Mano de obra de instaladores	15.88	\$/hr

(CONAGUA, 2007)

Año	Índice de Marshall	Chemical Engineering Plant Cost Index CEPCI ¹	ENR ²
2003	1123.6	-----	-----
2004	1178.5	-----	-----
2005	1244.5	-----	-----
2006	1302.3	499.6	-----
2007	1373.3	525.4	-----
2008	1449.3	575.4	-----
2009	1468.6	521.9	-----
2010	1457.4	550.8	-----
2011	1518.13	585.7	-----



Año	Índice de Marshall	Chemical Engineering Plant Cost Index CEPCI ¹	ENR ²
2012	-4519313.86	584.6	-----
2013	1541.88	567.3	-----
2014	1561.41	-986579.6072	9870.12

1- (Chemical Engineering, 2014)

2- (ENR, 2014)

