



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

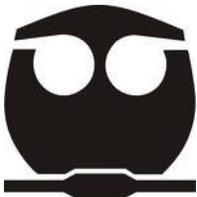
PROPUESTA DE MEJORA TECNOLÓGICA DE LA
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DE
UN COMPLEJO PETROQUÍMICO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

EVER PARIS PÉREZ VALLE



MÉXICO, D.F.

2011



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: Reynaldo Sandoval González

VOCAL: Profesor: Víctor Manuel Luna Pabello

SECRETARIO: Profesor: Alfonso Durán Moreno

1er. SUPLENTE: Profesor: Eduardo Flores Palomino

2° SUPLENTE: Profesor: Humberto Hinojosa Gómez

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: Torre de Ingeniería, grupo de trabajo de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Química, UNAM.

Asesor del tema: Alfonso Durán Moreno

Supervisor técnico: Mauro Aguilar Castro

SUSTENTANTE: Ever Paris Pérez Valle

Dedicatorias

A mis padres, por todo el cariño, apoyo y confianza que me han brindado a lo largo de toda mi vida, no tengo palabras para agradecer todo lo que me han dado.

A mi Papá Eve, por sus consejos y por siempre impulsarme a mejorar.

A Jessilulix, por su amor y por estar siempre a mi lado. Eres el amor de mi vida!

A mis hermanos.

A mis tíos, Efrén, Edgar, Vero, Romina, y en particular a mi tía Nancy, por quererme tanto y apoyarme siempre.

A mi tía Dona, la madre de la familia.

A mis Abuelos Ramón y Eugenia.

A míos tíos, Juan, César y Rosa.

A mis primos y a toda mi familia.

A Oso, Magic, Ricci, Cat, Carlitos, Nuria, Marco, Capi, Mary, Sandy, Topy, Zague, Yos, Nano, Lalo, Cástelan, Benji, Jocelyn, Ro, Profe, Tony, Gaby, Flaco, Chucho, Pipi, Pichi, Miguelón, Ayú, Baruch, Rubens, Alex, Chino, Alets, Hanz, y todos aquellos que han sido verdaderos amigos a lo largo de mi vida.

Agradecimientos

Agradezco a Dios, por la bondad que ha tenido conmigo.

A la UNAM y sus profesores, por la preparación académica que he recibido de ellos.

Al Dr. Alfonso Durán, por su asesoría y apoyo durante el desarrollo de este trabajo, así como por las enseñanzas que me brindó.

Al Ingeniero Mauro, por sus comentarios, consejos y soporte durante la realización del presente, pero sobre todo por convertirse en un amigo.

Al Dr. Víctor Manuel Luna y al Dr. Reynaldo Sandoval, por sus acertados y valiosos comentarios al revisar este trabajo.



CONTENIDO

Resumen	1
Capítulo I. Introducción	2
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.2 PROBLEMÁTICA.....	6
1.3 OBJETIVOS Y ALCANCES	7
Capítulo II. Antecedentes. La industria petroquímica y el tratamiento de sus aguas residuales.	8
2.1 LA PETROQUÍMICA	8
2.1.1 Historia	8
2.1.3 Transformación de los hidrocarburos.....	11
2.1.4 Descomposición de hidrocarburos	12
2.1.5 Esquema general de un complejo petroquímico	12
2.1.6 Uso del agua en la Industria Petroquímica.....	14
2.2 EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LA INDUSTRIA PETROQUÍMICA	15
2.2.1 Aguas residuales	15
2.2.1.1 Fuentes de aguas residuales.....	15
2.2.2 Tipos de efluentes generados en un Complejo Petroquímico	17
2.2.3 Tratamiento de aguas residuales.....	18
2.2.3.1 Niveles de tratamiento de aguas residuales	18
2.2.3.2 Tipos de tratamiento de aguas residuales.....	19
2.2.3.3 Tratamiento primario.....	21
2.2.3.4 Tratamiento secundario (biológico).....	23
2.2.3.5 Tratamiento terciario	25
2.3 SITUACIÓN ACTUAL DEL COMPLEJO PETROQUÍMICO EN ESTUDIO.....	28
2.3.1 Descripción general de los procesos	28
2.3.1.1 Planta de etilbenceno-estireno.....	28
2.3.1.2 Planta reformadora de BTX	30
2.3.1.3 Planta de etileno.....	31
2.3.1.4 Planta de óxido de etileno y glicoles.....	32
2.3.1.5 Planta de polietileno de baja densidad.....	33
2.3.1.6 Planta estabilizadora de crudo	33
2.3.1.7 Sección de desalado y calentamiento.....	34
2.3.1.8 Sección de estabilización y fraccionamiento	35
2.3.1.9 Planta hidrosulfuradora de naftas	36
2.3.1.10 Planta isomerizadora de pentanos	37
2.4 MARCO JURÍDICO	40
2.4.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.....	40



2.4.2 Ley de Aguas Nacionales.....	41
2.4.3 Normas Oficiales Mexicanas.....	42
Capítulo III. Metodología	43
Capítulo IV. Caso de estudio. Estudio de la tecnología actual del Complejo Petroquímico, análisis y selección de las nuevas opciones tecnológicas para tratar sus aguas residuales.	48
4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA SITUACIÓN ACTUAL EN EL ÁREA DE EFLUENTES DEL COMPLEJO PETROQUÍMICO.....	48
4.1.1 Tratamiento primario	48
4.1.2 Tratamiento secundario.....	52
4.1.3 Problemática en la sección de tratamiento primario.....	57
4.1.4 Problemática en la sección de tratamiento secundario.....	59
4.2 DESCRIPCIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS OPCIONES DE TRATAMIENTO	61
4.2.1 Tratamiento primario	61
4.2.2 Tratamiento secundario.....	79
Capítulo V. Resultados y discusión. Planteamiento de la mejor opción de modernización para la planta de tratamiento de aguas residuales del Complejo Petroquímico.	93
5.1 DEFINICIÓN DE LAS MEJORES OPCIONES A NIVEL TÉCNICO	93
5.1.1 Planteamiento de las alternativas elegidas de acuerdo a la evaluación técnica.....	93
5.1.2 Análisis de las propuestas planteadas.....	95
5.2 EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	102
5.2.1 Premisas económicas.....	102
5.2.2 Definición de los costos del proyecto.....	103
5.2.2.1 Costos variables.....	103
5.2.2.2 Costos fijos directos.....	104
5.2.2.3 Costos fijos indirectos.....	104
5.2.2.4 Beneficios, ahorros e impactos.....	105
5.2.3 Estimación de costos de las propuestas planteadas.....	106
5.2.3.1 Estimación de costos de la propuesta P1.....	106
5.2.3.2 Estimación de costos de la propuesta P2.....	113
5.2.3.3 Estimación de costos de la propuesta P3.....	120
5.2.4 Determinación de la viabilidad de las propuestas, mejor opción técnico-económica	126
Capítulo VI. Conclusiones y recomendaciones	129
Bibliografía	132
Anexos	136
ANEXO A.....	136
ANEXO B.....	138
ANEXO C.....	139



Índice de tablas

TABLA 2.1 DESCARGAS DE AGUA RESIDUAL MUNICIPAL Y NO MUNICIPAL, A NIVEL NACIONAL (2002 A 2007)*.....	16
TABLA 2.2 NIVELES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	20
TABLA 2.3 RESUMEN DE AGUAS RESIDUALES GENERADAS POR PLANTA DE PROCESO, CON TRATAMIENTO Y CONTAMINANTES.....	39
TABLA 4.1 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO ACEITOSO	50
TABLA 4.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE MOTORES DE BOMBAS DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO ACEITOSO	51
TABLA 4.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO SECUNDARIO	53
TABLA 4.4 PARÁMETROS PRINCIPALES PARA CADA SECCIÓN DE TRATAMIENTO.....	53
TABLA 4.5 BALANCE DE AGUA Y CONTAMINANTES DEL COMPLEJO PETROQUÍMICO EN EL ÁREA DE EFLUENTES.	56
TABLA 4.6 PROBLEMÁTICA EN EL PRESEPARADOR DE ACEITE.....	57
TABLA 4.7 PROBLEMÁTICA EN LOS SEPARADORES DE ACEITE	58
TABLA 4.8 PROBLEMÁTICA EN EL SEPARADOR DE ACEITE DE PLANTA ESTABILIZADORA DE CRUDO	58
TABLA 4.9 PROBLEMÁTICA EN LAS FOSAS DE IGUALACIÓN.....	59
TABLA 4.10 PROBLEMÁTICA EN LA FOSAS DE DEMASÍAS.....	59
TABLA 4.11 PROBLEMÁTICA EN LA LAGUNA DE OXIDACIÓN.....	60
TABLA 4.12 PROBLEMÁTICA EN LA LAGUNA DE ESTABILIZACIÓN	60
TABLA 4.13 PROBLEMÁTICA EN EL CLORADOR 2	61
TABLA 4.14 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SEPARADORES API	63
TABLA 4.15 VENTAJAS Y DESVENTAJAS SEPARADORES CPI	65
TABLA 4.16 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS CENTRÍFUGAS.....	67
TABLA 4.17 VENTAJAS DE LOS SEPARADORES HIDROCICLÓNICOS.....	69
TABLA 4.18 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL DAF.....	71
TABLA 4.19 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SISTEMA DE FLOTACIÓN POR AIRE INDUCIDO.....	73
TABLA 4.20 CUADRO COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS DE REMOCIÓN DE GRASAS Y ACEITES.....	74
TABLA 4.21 EVALUACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE REMOCIÓN DE ACEITE.....	77
TABLA 4.22 RESULTADO DE LA EVALUACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE REMOCIÓN DE ACEITE.....	77
TABLA 4.23 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS CONVENCIONAL	80
TABLA 4.24 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS (AERACIÓN EXTENDIDA).....	82
TABLA 4.25 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE SISTEMAS SBR.	84
TABLA 4.26 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SISTEMAS MBR.....	86
TABLA 4.27 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS REACTORES DE BIOPELÍCULA EMPACADA.	88
TABLA 4.28 CUADRO COMPARATIVOS DE LAS TECNOLOGÍAS DISPONIBLES DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO.....	89
TABLA 4.29 EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS EN FUNCIÓN DE LOS CRITERIOS SELECCIONADOS	91



TABLA 4.30 RESULTADO DE LA EVALUACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS PARA LA ETAPA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO	92
TABLA 5.1 CALIDAD DEL EFLUENTE ESPERADO PARA CADA OPCIÓN DE MODERNIZACIÓN PLANTEADA .	101
TABLA 5.2 EQUIPOS QUE CONFORMAN LA PROPUESTA P1.....	106
TABLA 5.3 ESTIMADO DE INVERSIÓN DE LA PROPUESTA P1	110
TABLA 5.4 EQUIPOS QUE CONFORMAN LA PROPUESTA P2.....	113
TABLA 5.5 ESTIMADO DE INVERSIÓN DE LA PROPUESTA P2	117
TABLA 5.6 EQUIPOS QUE CONFORMAN LA PROPUESTA P3.....	120
TABLA 5.7 ESTIMADO DE INVERSIÓN DE LA PROPUESTA P3	123
TABLA 5.8 INDICADORES DE RENTABILIDAD DE LAS 3 PROPUESTAS.....	126
TABLA 5.9 PARÁMETROS PRINCIPALES CON EL TREN DE TRATAMIENTO PROPUESTO	127



Índice de figuras

FIGURA 2.1 ELABORACIÓN DE PETROQUÍMICOS EN MÉXICO (AÑOS 1998-2008).....	10
FIGURA 2.2 EXPORTACIONES DE PETROQUÍMICOS EN MÉXICO (AÑOS 2000-2006).....	10
FIGURA 2.3 DIAGRAMA GENERAL DE UN COMPLEJO PETROQUÍMICO.....	13
FIGURA 3.1 METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DE LAS ACTIVIDADES.....	47
FIGURA 4.1 DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE LA SITUACIÓN ACTUAL DEL ÁREA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES DEL C.P.	55
FIGURA 4.2 SEPARADOR API CONVENCIONAL.....	63
FIGURA 4.3 SEPARADOR DE ACEITE DE PLACAS COALESCENTES.....	65
FIGURA 4.4 BOMBA CENTRÍFUGA DE SEPARACIÓN AGUA-ACEITE.....	66
FIGURA 4.5 HIDROCICLÓN PARA SEPARAR DE MEZCLAS LÍQUIDO/LÍQUIDO.....	67
FIGURA 4.6 SISTEMA DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO (DAF).....	70
FIGURA 4.7 SISTEMA DE FLOTACIÓN POR GAS INDUCIDO (IGF)	72
FIGURA 4.8 DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO DE LODOS ACTIVADOS (CONVENCIONAL)	80
FIGURA 4.9 SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS CON AERACIÓN EXTENDIDA.....	81
FIGURA 4.10 FASES EN UN REACTOR SECUENCIAL POR LOTES (SBR).	83
FIGURA 4.11 BIOREACTOR DE MEMBRANA (MBR)	85
FIGURA 4.12 REACTOR DE PÍOPELÍCULA EMPACADA	87
FIGURA 5.1 DIAGRAMA DE LA PROPUESTA 1	112
FIGURA 5.2 DIAGRAMA DE LA PROPUESTA 2	119
FIGURA 5.3 DIAGRAMA DE LA PROPUESTA 3	125
FIGURA 5.4 DIAGRAMA SIMPLIFICADO DEL TREN DE TRATAMIENTO PROPUESTO.....	128



Resumen

La industria petroquímica se encarga de transformar algunos derivados del petróleo en materias primas que no forman parte de la industria petroquímica básica, y las cuales constituyen la base de diversas cadenas productivas. Los productos no básicos son: amoniaco, benceno, dicloroetano, etileno, metanol, óxido de etileno, paraxileno, propileno, tolueno, xilenos entre otros.

En este proyecto, se estudiará el caso particular de un complejo petroquímico, cuya planta de tratamiento de aguas residuales, ha sido diseñada para eliminar grasas y aceites, sólidos suspendidos y DBO, principalmente.

La planta en estudio cuenta con una capacidad de diseño para tratar 13492 m³/día (156 L/s) y cuenta con dos secciones, tratamiento primario y tratamiento secundario, el tratamiento primario, consta de 3 diferentes sistemas; sección de neutralización, sección de separación de grasas y aceites y sección de igualación, y el secundario cuenta con sección de oxidación biológica (laguna de oxidación) y sección de maduración o estabilización (laguna de estabilización).

El objetivo de este proyecto, es encontrar las alternativas tecnológicas más adecuadas para modernizar la planta de tratamiento de efluentes del complejo petroquímico en estudio, para reducir la carga de contaminantes en el efluente descargado al emisor final.



Capítulo I. Introducción

En el presente trabajo se planteó como objetivo evaluar y proponer opciones de modernización de una planta de tratamiento de aguas residuales de un Complejo Petroquímico con una antigüedad aproximadamente de 30 años. Este trabajo se justificó por la necesidad de incrementar la capacidad de tratamiento, y para mejorar la calidad del efluente final de la planta de tratamiento de aguas residuales, con el propósito de cumplir con la normatividad actual en materia de descarga de aguas residuales y estar preparados para disposiciones futuras.

Para el análisis del caso de estudio, se presentaron los fundamentos teóricos del funcionamiento de los diferentes procesos que constituyen el tren de tratamiento, así como conceptos de tecnologías modernas aplicables para el mejoramiento del citado tren.

Aplicando conceptos de ingeniería de tratamiento de aguas, se plantearon y evaluaron diversas opciones de modernización de la planta de tratamiento, analizando cada uno de los escenarios planteados, y concluyendo con la selección de la mejor opción que permite alcanzar los objetivos perseguidos.

El trabajo consta de 6 capítulos, en los cuales se tocan los siguientes puntos: Una introducción en donde se justifica el proyecto, un marco



teórico, la situación actual del complejo y las diferencias que existen con respecto a diseño, las opciones de modernización que existen y se plantea finalmente la mejor opción técnico-económica de modernización para la planta de tratamiento de aguas residuales del Complejo Petroquímico.

1.1 JUSTIFICACIÓN

Visto de una forma superficial, el agua podría parecer un recurso ilimitado, ya que cubre aproximadamente el 70 % de la superficie del planeta, no obstante, del total de agua en el planeta, más del 97% corresponde a agua salada presente en mares y océanos, y más del 70% de los recursos de agua dulce se encuentran en forma de hielo, en su mayor parte en la región de los polos.

Debido a esta manera superficial de ver las cosas por parte de la gente, enfrentamos un serio problema, y es que hoy en día, el agua para consumo humano ha disminuido críticamente, y peor aún, según las proyecciones, seguirá disminuyendo en los próximos años de una forma muy acelerada. El crecimiento industrial ha hecho, no sólo que aumente la cantidad de agua contaminada, sino también, que sea mayor la variedad de contaminantes presentes; en este sentido, el agua ha ido adquiriendo progresivamente el carácter de un bien cuya utilización queda sujeta a diversas políticas de consumo.



EL 59% del consumo total de agua en los países desarrollados se destina a uso industrial, el 30% a consumo agrícola y un 11% a gasto doméstico, según se constata en el primer informe de Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos del mundo, Agua para todos, agua para la vida (marzo, 2003), además, en este informe, se prevé que en 2025, el consumo de agua destinada a uso industrial alcanzará los 1170 km³/año, cifra que en 1995 se situaba en 725 km³/año. El sector productor no sólo es el que más gasta, también es el que más contamina. Más de un 80% de los desechos peligrosos del mundo se producen en los países industrializados, mientras en los países en vías de desarrollo, un 70% de los residuos que se generan en las fábricas se vierten al agua sin ningún tipo de tratamiento previo, contaminando así los recursos hídricos disponibles

En consecuencia, desde hace varias décadas, se comenzó a buscar solución a estos problemas, por lo tanto, los métodos para tratar el agua han evolucionado, y sobre todo en los últimos años se han desarrollado procesos más complejos y eficientes para tratar y acondicionar el agua. De esta manera, tratar las aguas residuales domésticas e industriales de una forma óptima requiere modificaciones del enfoque tradicional (Ramalho, 1996), por esta razón se deben empezar a considerar nuevas tecnologías, nuevos procesos y en general nuevas líneas de tratamiento, así como modificaciones a las actuales.

En México, varios sectores de la industria, incluyendo la del petróleo, han implantado plantas para el tratamiento de sus aguas residuales que les han permitido autoabastecerse de agua en algunos de sus procesos,



y disminuir el uso de agua de consumo humano de lagos, ríos o de la red municipal. El problema radica en que muchas de estas plantas tienen varios años de servicio, lo cual implica que los caudales y los porcentajes de remoción de contaminantes no sean los mismos de acuerdo a diseño, y es necesario que éstas sean rehabilitadas o modernizadas para que cumplan con la normatividad actual, así como con su compromiso con el medio ambiente.

La finalidad del presente trabajo, es encontrar las alternativas tecnológicas más adecuadas para modernizar la planta de tratamiento de efluentes de un Complejo Petroquímico, esto se llevará a cabo mediante el estudio de su proceso, la investigación de datos históricos y el análisis técnico y económico de las nuevas tecnologías; de forma tal que se elija la mejor opción para disminuir la carga de contaminantes que se encuentren presentes en los efluentes, lo cual significará una disminución en la descarga al receptor final y permitirá recircular el agua residual pretratada que sea factible reutilizar en el complejo petroquímico, esto impactará positivamente al ambiente, y al mismo tiempo, representará un beneficio económico para el complejo.



1.2 PROBLEMÁTICA

El Complejo Petroquímico en estudio cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales con una antigüedad de alrededor de 30 años, por lo cual, se asumió que las condiciones actuales en las que se encuentra no son las óptimas de acuerdo a diseño, y es necesaria una modernización.

Al realizar el análisis de las condiciones actuales de la planta de tratamiento del Complejo, se observa que no cumple con la normatividad nacional vigente en materia de descarga de aguas residuales, en cuanto al límite máximo permisible de Grasas y Aceites en la descarga, ya que actualmente ésta es de 18 mg/L, y la norma indica un valor máximo permisible de 15 mg/L. Por otro lado, la capacidad de tratamiento de la planta actualmente es 2600 m³/d, mientras que la capacidad de diseño es 7657 m³/d, esto indica que está trabajando al 34% de su capacidad de diseño, por lo cual, es necesario hacer modificaciones al proceso actual de tratamiento de aguas residuales del complejo petroquímico.



1.3 OBJETIVOS Y ALCANCES

Objetivo General

- ❖ Evaluar opciones para la modernización de la planta de tratamiento de aguas residuales de un Complejo Petroquímico, que aseguren el funcionamiento eficiente y permitan incrementar su capacidad de remoción de contaminantes.

Objetivos particulares:

- Estudiar el proceso actual de la planta de tratamiento de aguas residuales y realizar un balance de materia.
- Identificar las etapas en las que sea necesaria una adecuación.
- Proponer modernizaciones a las etapas que así lo requieran.

Alcances:

- ✓ Proponer opciones tecnológicas de modernización para cada etapa del proceso en la que sea necesaria una adecuación.
- ✓ Evaluar técnicamente las opciones tecnológicas propuestas.
- ✓ Evaluar económicamente las opciones tecnológicas propuestas.
- ✓ Definir la mejor opción técnico-económica.



Capítulo II. Antecedentes. La industria petroquímica y el tratamiento de sus aguas residuales.

2.1 LA PETROQUÍMICA

Los procesos fundamentales de la petroquímica tienen su origen en el petróleo y el gas natural. Proporcionan los hidrocarburos alifáticos, que hoy en día representan uno de los pilares sobre los que se edifica la industria química orgánica.

Entre estos hidrocarburos alifáticos, indudablemente, los de mayor importancia para la industria son las olefinas y los acetilenos, es decir, los hidrocarburos no saturados, sin embargo, también los hidrocarburos saturados se han convertido en la actualidad en materias primas imprescindibles para la industria. Los métodos de la química moderna han posibilitado la obtención de un número muy elevado de productos químicos orgánicos a partir de hidrocarburos, de ahí la importancia de la petroquímica.

2.1.1 Historia

La primera producción petroquímica fue el isopropanol, obtenido en 1920 por la Standard Oil norteamericana. A partir de entonces la industria petroquímica inicia un desarrollo progresivo que, después del año 1942, con motivo de la entrada de los Estados Unidos a la segunda guerra mundial, se hace tan extraordinario que constituye un ejemplo único en la química industrial de todos los tiempos. Hacia el año 50 se extiende también a Europa y al resto del mundo, donde ha crecido igualmente a ritmo acelerado. La enorme demanda de productos



petroquímicos existente en la década de los 70's, así como el precio barato del petróleo durante los años 80's, supuso un aumento del sector petroquímico, ya que se llevaron a cabo fuertes inversiones en este tipo de industria en todo el mundo. Pero en los últimos años se ha empezado a observar que la producción de productos petroquímicos se ha acercado sustancialmente a la demanda; esto, unido a otros condicionantes económicos como la desaceleración de la economía en todo el mundo y un ligero aumento en el precio del crudo, ha hecho que los márgenes de beneficios de este sector sean menores, lo que ha producido un sustancial descenso de la inversión en esta industria (Vian, 1994).

En México, la producción de petroquímicos, comenzó a tener auge en los años cincuentas, cuando Petróleos Mexicanos inicia un programa de desarrollo de la industria petroquímica, contemplando la construcción de 28 plantas en 5 años, representando quizá el esfuerzo de mayor alcance realizado en el país. A finales de los años sesentas la industria petroquímica en México era ya una realidad, y PEMEX elaboraba ya 26 productos petroquímicos, del año 1970 a 1985, comienza un crecimiento acelerado y se llegan a producir más de 16 millones de toneladas de petroquímicos, sin embargo, la producción disminuyó drásticamente a finales de los ochentas y principios de los noventas por los elevados costos de producción y, en los últimos años, su producción ha sido irregular (PEMEX, memorias de labores) , como se observa en la figura 2.1, no obstante, las exportaciones se han mantenido constantes, aproximadamente en 3 millones de toneladas al año, mientras que el valor de los petroquímicos ha aumentado en un 88%, tal y como se aprecia en la figura 2.2.

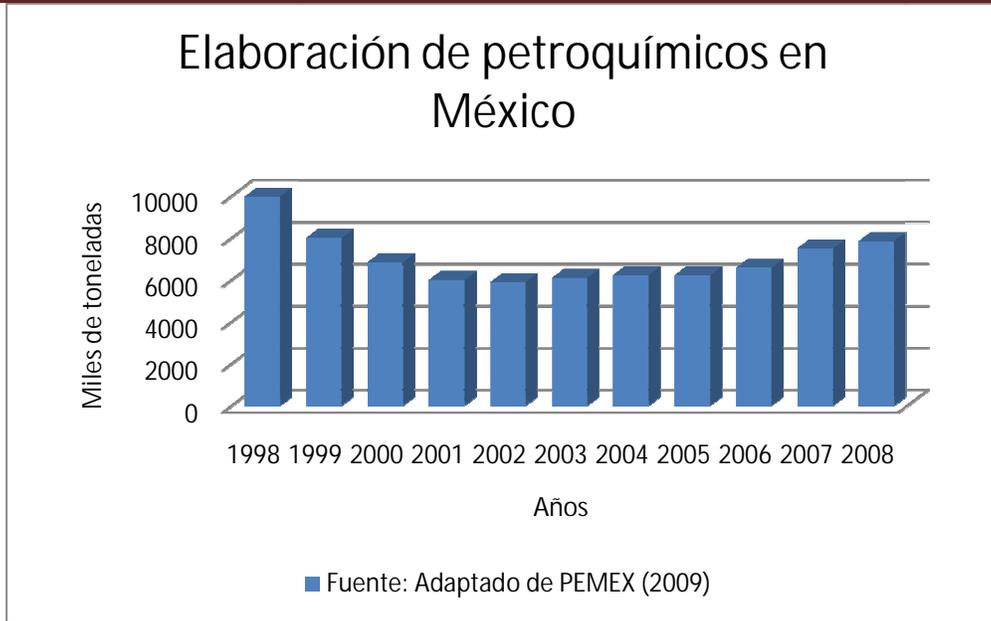


Figura 2.1 Elaboración de petroquímicos en México (años 1998-2008)

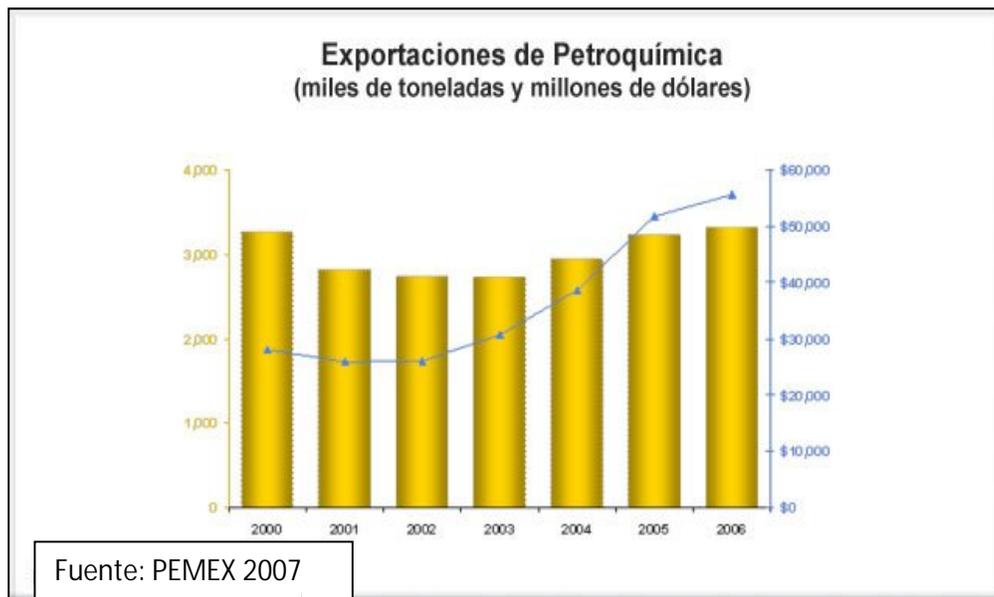


Figura 2.2 Exportaciones de petroquímicos en México (años 2000-2006)



2.1.2 La materia prima

Las materias base de las que se nutre la industria petroquímica son hidrocarburos de los siguientes orígenes: gas natural, gases de refinería (saturados y de craqueo), naftas, gasóleos.

En términos generales, con cualquiera de estas sustancias es posible conseguir –en lo cualitativo– los mismos resultados. El empleo de una u otra está regido principalmente por la disponibilidad y el precio. En Estados Unidos se utiliza en gran parte el gas natural, ya que lo hay en abundancia. En Europa la producción está basada en las naftas, si bien cabe esperar la reconversión de las fábricas a medida que se construyen las grandes redes de gasoductos con cabecera en el norte de África y en los yacimientos de Siberia.

Existen 3 grupos generales de técnicas base en la petroquímica:

1. Transformación estructural de los hidrocarburos en materia idónea, creando en ellos grupos de reactividad química adecuada.
2. Descomposición de los hidrocarburos con producción de especies no hidrocarbonadas, como H_2 , CO y C (negro de humo).
3. Separación de especies relativamente puras, o fracciones, de una materia prima o de la que resulta de la primera técnica, para llevar la transformación química de cada una por separado, y separación y acondicionamiento, en su caso, de los productos de la descomposición según la segunda técnica.

2.1.3 Transformación de los hidrocarburos

La técnica de transformación de los hidrocarburos en olefinas, en aromáticos o en acetileno es el craqueo, con las variantes propias de cada caso.



La transformación en aromáticos es idéntica al reformado catalítico utilizado en las refinerías para obtener gasolinas de alto índice de octano a partir de fracciones nafténicas, preferentemente, y por deshidrogenación.

La diferencia es que en las refinerías la totalidad de la fracción líquida producida, que es el producto principal, constituye la gasolina, mientras en la industria petroquímica las especies producidas se separan por destilación (benceno, tolueno y xilenos: BTX).

2.1.4 Descomposición de hidrocarburos

Esta descomposición puede dirigirse hacia dos objetivos: descomposición pirolítica total de hidrocarburos, para obtener C (negro humo) o descomposición por combustión incompleta para obtener H_2 por reacción con oxígeno insuficiente o con vapor de agua. (Vian, 1994).

2.1.5 Esquema general de un complejo petroquímico

De forma general, las áreas que se encuentran en un Complejo Petroquímico son:

- Área de plantas de proceso
- Área de producción de vapor
- Área de torres de enfriamiento
- Área de unidad desmineralizadora
- Área de sistema contraincendio
- Área de efluentes

A continuación se presenta el esquema general de un Complejo Petroquímico, en el cual se ilustran las áreas citadas anteriormente.

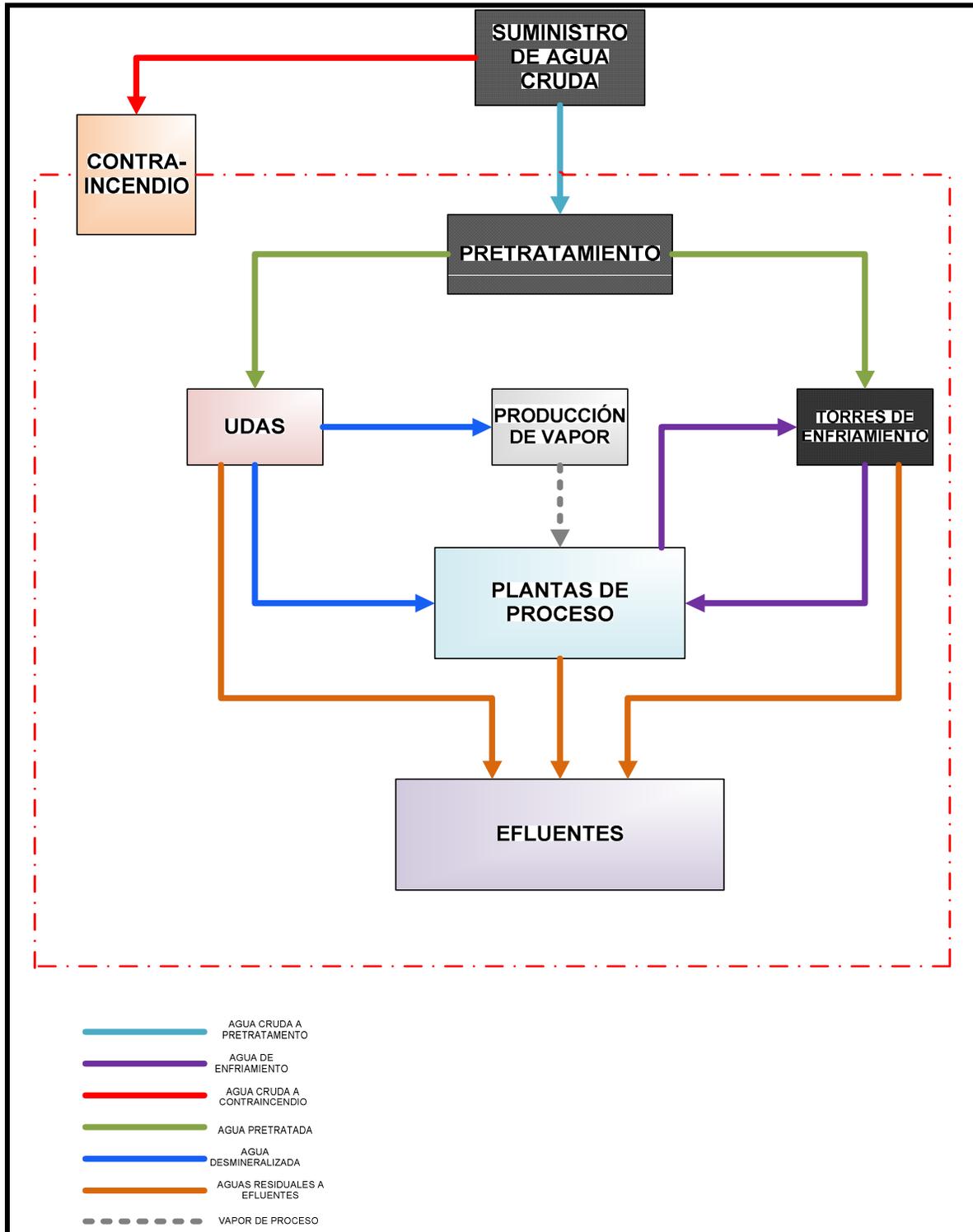


Figura 2.3 Esquema general de un Complejo Petroquímico



2.1.6 Uso del agua en la Industria Petroquímica

En la industria petroquímica, el consumo de agua, suele ser del orden de miles de metros cúbicos por día, y por la diversidad de usos que se le da, se requieren de diferentes calidades de agua, por lo tanto puede que el agua a utilizarse requiera de un pretratamiento o de un acondicionamiento específico.

El consumo de agua en un Complejo Petroquímico, abarca en general los siguientes aspectos:

- Agua para proceso
- Agua de enfriamiento
- Agua para contraincendio
- Agua para generación de vapor
- Agua para estabilización de crudo
- Agua para servicios generales

El consumo principal de agua dentro de la industria del petróleo es para enfriamiento, con aproximadamente el 60% del consumo total, seguido de agua enviada a desmineralización para generación de vapor con el 17%, agua para servicios con el 8% y agua potable, agua para riego y otros, el 15% restante (Baron et al., 2000).

Además del impacto desfavorable, tanto ambiental como social, que conlleva el gran consumo de agua dentro de un Complejo Petroquímico, existe también el impacto adverso como consecuencia de la alta generación de agua residual por parte de este tipo de industrias. Por ejemplo, las descargas de las purgas provenientes de las torres de enfriamiento generan un considerable impacto ambiental debido a los efectos de emisión de calor, descarga de químicos acondicionantes y contaminación con sustancias o productos químicos de los procesos. Debido a esto, se han realizado estudios para encontrar alternativas de



sistemas de enfriamiento que permitan disminuir no sólo la cantidad de agua empleada, sino además, minimizar el impacto ambiental que este tipo de industrias genera sobre su entorno (Bloemkolk et al., 1996).

2.2 EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LA INDUSTRIA PETROQUÍMICA

En este punto se presentará una clasificación general de los tipos de aguas residuales que se generan, poniendo especial interés en las aguas residuales industriales, para posteriormente enfocarse en el caso particular de las aguas residuales generadas por un Complejo Petroquímico.

2.2.1 Aguas residuales

2.2.1.1 Fuentes de aguas residuales

Las cuatro fuentes fundamentales de aguas residuales son: aguas residuales domésticas, aguas residuales industriales, escorrentías de usos agrícolas, y aguas pluviales.

a) Aguas residuales domésticas

Las principales fuentes de agua residual doméstica de una comunidad las constituyen las zonas residenciales e industriales, otras fuentes importantes son las instalaciones públicas y de recreo.

Las temperaturas de las aguas residuales oscilan, normalmente, entre 10 y 20°C. En general, la temperatura de un agua residual será mayor que la del suministro de agua, debido a la adición de agua tibia de los hogares y al calentamiento dentro del sistema de drenaje de la estructura.



b) Aguas residuales industriales

Los procesos industriales generan una gran variedad de contaminantes en las aguas residuales. Las características y concentraciones de los contaminantes varían mucho de una industria a otra. La industria que se estudiará en este caso será la petroquímica, en el caso de un Complejo Petroquímico en particular; más adelante se detallarán los tipos de contaminantes del agua residual a tratar en el Complejo en estudio.

En la siguiente tabla se ilustran las descargas de agua residual municipal y no municipal (industrial) a nivel nacional.

Tabla 2.1 Descargas de agua residual municipal y no municipal, a nivel nacional (2002 a 2007)*

Año	2002	2003	2005	2006	2007
Agua residual Municipal (km ³ /año)	7.95	8.04	8.05	7.63	7.66
Agua residual No municipal (industria) (km ³ /año)	5.39	8.14	5.62	5.77	5.98

Fuente: Adaptada de INEGI, con datos de CONAGUA

*Los datos del año 2004 no se encuentran reportados

Como se puede ver, según los datos reportados por el INEGI y CONAGUA, la cantidad de agua residual municipal y no municipal (industria), es muy parecida, la mayor parte de los años el volumen de agua residual municipal es mayor que el volumen de agua residual generado por la industria, sin embargo, la cantidad de agua residual generada por la industria es también considerable. El promedio de agua residual municipal descargada en los años reportados fue 7.86 km³/año, mientras que el promedio de agua residual no municipal fue 6.18 km³/año, lo cual da una idea de la relación que existe entre ambos tipos de aguas residuales.



c) Escurrimiento agrícola

El agua generada por los escurrimientos agrícolas es otra fuente importante de aguas residuales, el principal contaminante de éstas es el fósforo, el cual se encuentra presente en los fertilizantes, debido a su importancia para los vegetales como nutriente.

d) Agua pluvial

El agua pluvial se define como el agua resultante de la escorrentía superficial, es decir, el agua de lluvia depositada. El factor importante en el análisis del agua de lluvia es que ésta es ligeramente ácida, ya que la concentración de equilibrio del H_2CO_3 causa un pH aproximado de 5.6 en el agua de lluvia. Así, se suele definir al agua de lluvia como una precipitación con un pH menor que 5.6.

2.2.2 Tipos de efluentes generados en un Complejo Petroquímico

Es conveniente separar las diferentes corrientes de aguas residuales en un complejo petroquímico, con el fin de optimizar su posterior tratamiento, esta separación se puede llevar a cabo de acuerdo a la siguiente clasificación.

Tipo 1. Efluentes libres de aceite y otros contaminantes, como el agua de lluvia procedente de zonas que se encuentren fuera del área de las plantas de proceso, de tal forma que se pueden descargar de forma directa a un cuerpo receptor.

Tipo 2. Efluentes ácidos o alcalinos, los cuales necesitan una neutralización antes de ser tratados o descargados a un cuerpo receptor.



Tipo 3. Efluentes sanitarios, que a diferencia de las aguas urbanas tienen mayor concentración de aceite y suelen conducirse a los drenajes municipales o las instalaciones de tratamiento de las refinerías o de los complejos petroquímicos.

Tipo 4. Efluentes aceitosos que comprenden las aguas que escurren sobre las superficies de las áreas de proceso, patios con tanques, así como el agua de enfriamiento que se ha contaminado con aceite, ya sea por fugas en intercambiadores o derrames.

Tipo 5. Efluentes de procesos que han estado en contacto directo con el petróleo y efluentes de proceso con altas concentraciones de sulfuros y fenoles (adaptado de Villalobos, 2005).

2.2.3 Tratamiento de aguas residuales

En este apartado se realizará una descripción general de los tratamientos de aguas residuales que existen, y posteriormente se describirán los tratamientos utilizados en el caso particular de un Complejo Petroquímico.

2.2.3.1 Niveles de tratamiento de aguas residuales

El grado de tratamiento requerido para un agua residual depende esencialmente de los límites que se establezcan en las normas sobre los límites máximos permisibles de vertido para el efluente. El tratamiento primario se emplea para la eliminación de los sólidos en suspensión y los materiales flotantes, impuesta por los límites, tanto de descarga al medio receptor como para poder llevar los efluentes a un tratamiento secundario, ya sea directamente, o pasando por una neutralización u homogenización. Los objetivos que persigue el tratamiento biológico del agua residual son la coagulación y eliminación de los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica. El



tratamiento terciario o avanzado tiene como objetivo la eliminación de contaminantes que no se eliminan con los tratamientos biológicos convencionales.

2.2.3.2 Tipos de tratamiento de aguas residuales

En la tabla 2.2 se enlistan los principales tipos de tratamiento de aguas residuales, así como los niveles de tratamiento que existen.



Tabla 2.2 Niveles de tratamiento de aguas residuales

NIVEL DE TRATAMIENTO	PROCESO
Tratamiento primario	Cribado Sedimentación Flotación Separación de Grasas y Aceites Homogenización Neutralización
Tratamiento secundario	Lodos activados Aeración prolongada (procesos de oxidación total) Modificaciones del sistema convencional de lodos activos: aeración por fases, mezcla completa, aeración descendente, alta carga, aeración con oxígeno puro Lagunas de oxidación Estabilización por medio de lagunas Filtros biológicos (percoladores) Discos biológicos Tratamientos anaerobios: procesos de contacto, filtros (sumergidos)
Tratamiento terciario	Microfiltración Nanofiltración Ultrafiltración Filtración (lecho de arena, antracita, diatomeas) Precipitación y coagulación Intercambio iónico Ósmosis inversa Electrodialisis Cloración y ozonización

(Ramalho, 1996)



A continuación se describirá el tratamiento común de los efluentes de un Complejo Petroquímico, la situación actual de la planta de tratamiento de aguas residuales del Complejo Petroquímico en estudio se detallará en el capítulo siguiente.

2.2.3.3 Tratamiento primario

Neutralización y homogenización.

Cabe mencionar que estas técnicas, en ocasiones no son consideradas como un tratamiento primario, sino como un pretratamiento.

La homogenización consiste en la mezcla de las corrientes de aguas residuales ácidas y alcalinas en un tanque de homogenización, cuando el objetivo es la neutralización de dos corrientes. La homogenización se utiliza a menudo para otros objetivos a parte de la neutralización, como son:

- 1) Aminorar las variaciones de ciertas corrientes de aguas residuales, intentando conseguir una corriente mezclada, con un caudal relativamente constante, que sea el que llegue a la planta de tratamiento.
- 2) Aminorar las variaciones de la DBO del influente a los sistemas de tratamiento. Con este propósito se utilizan tanques de homogenización de nivel constante o variable. (Mackenzie, 2005).

La neutralización consiste en controlar el pH de las aguas residuales que posteriormente se descargarán a un medio receptor, o aquellas que recibirán un tratamiento químico o biológico, para estos últimos es muy importante el control adecuado del pH, ya que éste se debe mantener en un intervalo de 6.5 a 8.5 para asegurar una actividad biológica óptima. (Metcalf y Eddy, 2003).



Separación de sólidos suspendidos y aceites por sedimentación y flotación

Los separadores por gravedad más utilizados son los API, los cuales reciben su nombre del American Petroleum Institute, que fue el organismo que desarrolló esta tecnología, existen otros separadores que han estado reemplazando a los API, éstos son los separadores de placas corrugadas (CPI, por sus siglas en inglés, Corrugated Plate Interceptor) y los separadores de placas paralelas (PPI, por sus siglas en inglés, Parallel Plate Interceptor). En ocasiones, es necesaria una segunda separación de Grasas y Aceites, la cual se puede llevar a cabo mediante la flotación por aire disuelto (DAF, por sus siglas en inglés, Dissolved Air Flotation). En esta etapa se puede recurrir al uso de desestabilizantes para romper las emulsiones aceite-agua, y mejorar las eficiencias de remoción.

A continuación se describen dos experiencias relacionadas con el DAF, la primera a nivel laboratorio y la segunda a nivel industrial, en un Complejo Petroquímico.

La combinación de los procesos coagulación-flotación por aire disuelto, permite obtener una remoción de Grasas y Aceites y DQO de más del 99.5% y 99% respectivamente. Las mejores remociones del aceite se obtienen previa coagulación, a presiones bajas (35-40 lb/in²), en un tanque de saturación, y con una recirculación alrededor de 7%, según estudios realizados en laboratorio (Mijaylova, et al., 2001).

Según un estudio realizado en un Complejo Petroquímico ubicado en Israel, el equipo de flotación por aire disuelto con el que cuentan, permitió remover del 50 al 90% de las Grasas y Aceites totales presentes en sus efluentes, removiendo más del 40% de las Grasas y Aceites que se encontraban disueltos. El contenido de Grasas y Aceites en el influente del DAF, se encontraba en el rango de 20 a 77



mg/L, de los cuales del 70 al 80% estaban emulsificados, del 10 al 20% disueltos, y sólo el 10% se encontraban en forma libre (Galil et al., 2001).

2.2.3.4 Tratamiento secundario (biológico)

El tratamiento biológico consiste en reducir el contenido en materia orgánica de las aguas residuales, reducir su contenido en nutrientes y eliminar patógenos y parásitos (Cheremisinoff, 1994), además, se busca la coagulación y eliminación de los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica. Entre los procesos biológicos se encuentran: lodos activados y sus modificaciones, filtros percoladores y lagunas aeradas (Ramírez-Camperos et al., 2003).

Lodos activados

El proceso consiste en poner en contacto en un medio aerobio, normalmente en un tanque aerado, el agua residual con flóculos biológicos previamente formados, en los que se absorbe la materia orgánica y donde es degradada por las bacterias presentes. Junto con el proceso de degradación, y para separar los flóculos del agua, se lleva a cabo una sedimentación, donde se realiza una recirculación de los lodos, para mantener una elevada concentración de microorganismos en el interior del reactor, además de una purga equivalente a la cantidad crecida de organismos (Letón, 2006).

La remoción de materia orgánica y de sólidos suspendidos mediante el proceso de lodos activados es mayor al 80%, sin embargo, la remoción de nitrógeno total es baja, debido a la transformación de nitrógeno orgánico y amoniacal a nitratos (Mijailova et al., 2002).

Filtros percoladores

El filtro percolador moderno consiste en un lecho formado por un medio sumamente permeable al que se adhieren los microorganismos



y a través del cual se filtra el agua residual. El medio filtrante consiste generalmente en piedras cuyo tamaño oscila de 2.5 a 10 cm de diámetro. Existen filtros percoladores que utilizan unos medios filtrantes plásticos, que constituyen una innovación más reciente y que se construyen de sección cuadrada u otra cualquiera, con profundidades de 9 a 12 m. El lecho del filtro es generalmente circular y el líquido a tratar se rocía por encima del lecho mediante un distribuidor rotatorio.

Lagunas aeradas.

El proceso de lagunas aeradas es esencialmente el mismo que el de lodos activados de aeración prolongada convencional, excepto que se usa un depósito excavado en el terreno como reactor, y que el oxígeno requerido por el sistema es suministrado por aeradores de superficie o mediante difusores. En una laguna aerobia se mantienen en suspensión la totalidad de los sólidos. En el pasado, las lagunas aeradas se operaban como los sistemas de lodos activados sin recirculación y eran seguidas, generalmente por grandes estanques de sedimentación, en la actualidad se utilizan muchas lagunas aeradas, seguidas de instalaciones de sedimentación e incorporando recirculación de sólidos biológicos (Metcalf y Eddy, 1994).

Con el objetivo de proporcionar el oxígeno suficiente a las lagunas aeradas, se ha desarrollado un nuevo hidroeyector, el cual mejora la absorción de oxígeno atmosférico. Esta nueva tecnología ha obtenido valores de 12 kgO₂/h, y trabaja aproximadamente a 1.5 kgO₂/kWh, también se ha comprobado que es más eficiente colocar en la laguna pequeños hidroeyectores, con el fin de distribuir las regiones en donde se lleva a cabo la transferencia de oxígeno (Fonade et al., 2000).



Reactores anaerobios

Este tipo de reactores constituyen un tratamiento en el cual, la materia orgánica es convertida en CH_4 y CO_2 . Durante los últimos 20 años ha aumentado considerablemente su demanda, debido a los bajos costos que presenta en comparación con otras tecnologías, como tratamientos biológicos aerobios o tratamientos fisicoquímicos.

En promedio, los reactores anaerobios remueven del 70 al 80% del carbono orgánico disuelto, según datos reportados desde los años ochenta (Macarie et al., 2000).

2.2.3.5 Tratamiento terciario

Esta etapa, también conocida como tratamiento avanzado, es utilizada cuando se necesita un efluente con condiciones de pureza mayores que las entregadas por el tratamiento secundario, básicamente es un tratamiento de pulimento, los más utilizados en los Complejos Petroquímicos son los de filtración con membranas.

Filtración

La filtración es una operación en la que se hace pasar agua a través de un medio poroso, con el objetivo de retener la mayor cantidad de materia en suspensión. El medio poroso utilizado tradicionalmente es un lecho de arena, de altura variable, dispuesta en distintas capas de diverso tamaño de partícula, siendo la superior la más pequeña (entre 0.15 y 0.3 mm). Es una operación muy utilizada en el tratamiento de aguas potables, así como en el tratamiento de aguas para 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 de diatomeas. También es habitual, para mejorar la eficiencia, realizar una coagulación-floculación previa.



Microfiltración y ultrafiltración

Estas dos tecnologías, utilizan membranas como barreras físicas semipermeables, las cuales separan dos fases, impidiendo su íntimo contacto y restringiendo el movimiento a través de ellas de forma selectiva, utilizando como fuerza impulsora un gradiente de presión. La relación tamaño de sustancias contaminantes/distribución de tamaño de poros permite la exclusión de contaminantes en el permeado. De esta manera, las sustancias mayores que el mayor tamaño de los poros serán totalmente rechazadas por la membrana, y las sustancias cuyo tamaño esté comprendido entre el mayor y menor tamaño de poros serán parcialmente rechazadas.

Aunque los procesos de ultrafiltración y microfiltración se basan en el mismo principio que la filtración clásica, hay que resaltar que ésta sólo es aplicable a suspensiones, mientras que en la microfiltración y en la ultrafiltración, la exclusión de partículas por la membrana tiene lugar en el caso de dispersiones coloidales y soluciones.

La microfiltración utiliza valores de diferencia de presión transmembranal comprendidos en el intervalo de 100-500 kPa, y puede separar tamaños de partículas dentro del rango 0.1 μm -10 μm , de distinta naturaleza: sólidos suspendidos, partículas finas y algunos coloides.

La ultrafiltración, por otro lado, utiliza diferencias de presión transmembranal de 100-800 kPa, con un intervalo de poro de 10-1000 \AA , y puede realizar separaciones de microsolutos como coloides y macromoléculas.

El porcentaje de recuperación de agua en la ultrafiltración, es habitualmente de 88%, utilizando como pretratamiento un filtro de arena (Duyvesteijn et al., 1998).



Según estudios realizados, la ultrafiltración presenta una eficiencia de remoción del 98% para turbidez y sólidos suspendidos totales y del 30% para carbono orgánico disuelto (Teodosiu et al., 1998).

Ósmosis inversa

El proceso de ósmosis inversa consiste en generar, mediante una membrana permeable al agua, una solución acuosa con bajo contenido en sal. Tal como en microfiltración y ultrafiltración, la causa que genera la fuerza impulsora para lograr la separación de la sal, es una diferencia de presión transmembranal. Sin embargo, en la ósmosis inversa el proceso de separación se debe a las diferentes solubilidades y difusividades de los componentes de la solución acuosa. Los valores de operación de la diferencia de presión transmembranal y concentración de la solución son 7-70 bar y 200-30000 ppm, respectivamente.

El porcentaje de recuperación de agua en la ósmosis inversa es aproximadamente del 73%, utilizando como pretratamiento un sistema de ultrafiltración, de acuerdo a estudios experimentales realizados en un Complejo Petroquímico (Wong, 2000).

Nanofiltración

Las prestaciones de esta tecnología se encuentran entre las de la ultrafiltración y la ósmosis inversa. Trabaja con coeficientes de rechazo de cloruro sódico de 0.2-0.80%. La nanofiltración se aplica para el tratamiento de aguas con una concentración salina de 200-5000 mg/L con presiones de trabajo de 7-14 bar.

Electrodiálisis

En el proceso de electrodiálisis los componentes iónicos de una solución son separados por el uso de membranas semipermeables selectivas de iones. La aplicación de un potencial eléctrico entre los dos electrodos causa una corriente eléctrica que atraviesa la solución,



la cual, a su vez, origina una migración de cationes hacia el electrodo negativo y de aniones hacia el electrodo positivo. Dado el espaciado alternado de las membranas permeables a los cationes y aniones, se forman células de sales concentradas y diluidas.

El agua residual se bombea a través de las membranas que están separadas por unos espaciadores y dispuestas en pilas. El agua residual se retiene, generalmente, de 10 a 20 segundos aproximadamente en cada pila individual o etapa. Este proceso puede funcionar tanto en modo continuo como discontinuo (batch). Las unidades pueden disponerse en paralelo para obtener la capacidad hidráulica necesaria o bien en serie para alcanzar el grado de desmineralización deseado (Metcalf y Eddy, 1994).

2.3 SITUACIÓN ACTUAL DEL COMPLEJO PETROQUÍMICO EN ESTUDIO

En esta sección, se llevará a cabo una descripción general de las plantas de proceso y de otras áreas que actualmente generan aguas residuales en el complejo petroquímico. Cabe mencionar que la situación actual del área de efluentes del complejo se analizará en el siguiente capítulo.

2.3.1 Descripción general de los procesos

2.3.1.1 Planta de etilbenceno-estireno

Esta planta tiene una capacidad de 150000 ton/año y actualmente opera al 100% de su capacidad. La planta se divide en 4 áreas, las cuales son:

- Área 1. Alquilación y transalquilación
- Área 2. Destilación de licor alquilado
- Área 3. Deshidrogenación
- Área 4. Destilación del estireno



En el proceso clásico (LUMMUS) de producción de estireno a partir de etilbenceno se utilizan reactores de lecho fijo con flujo radial. El etilbenceno sufre una reacción de deshidrogenación catalítica a estireno en presencia de vapor. La reacción de deshidrogenación es favorecida a presiones bajas y se realiza normalmente en condiciones de vacío. Además del estireno, se producen como subproductos principales el benceno y el tolueno junto con otros productos más ligeros. A la reacción se le aporta calor mediante una corriente de vapor sobrecalentado.

La salida del reactor tiene un calor residual que se aprovecha para precalentar la alimentación y para la producción del vapor que se utiliza en el proceso. Después pasa a un condensador donde se obtiene una corriente líquida con agua e hidrocarburos y una corriente gaseosa, ésta pasa a la sección de recuperación tras comprimirse. De la unidad de recuperación se obtiene por un lado una corriente gaseosa que se introduce como combustible en el "superheater" que se utiliza para producir vapor y por el otro lado una corriente líquida que se separa en una fase acuosa que se junta con el condensado y una fase orgánica.

La mezcla deshidrogenada pasa a la sección de fraccionamiento para separar los diferentes productos. La primera columna separa por la cabeza etilbenceno, junto con tolueno y benceno, y por el fondo estireno junto con subproductos pesados.

La corriente de cabeza pasa a una segunda columna donde se obtiene el etilbenceno por el fondo y se recicla. Por cabeza sale una mezcla de benceno y tolueno que pasa a otra columna donde se separan los dos subproductos. La corriente de fondo pasa a otra columna donde se separa el estireno monómero, producto de los compuestos pesados.



En cuanto a las aguas residuales resultantes de este proceso, se generan dos: agua ácida proveniente del área 1, a la cual se le ajusta el pH a un valor alcalino antes de ser mandada a efluentes y condensado sucio.

Los contaminantes presentes en los efluentes de esta planta son: AlCl_3 , HCl y trazas de estireno y etilbenceno.

2.3.1.2 Planta reformadora de BTX

La planta reformadora de Benceno, Tolueno y Xileno consta de una capacidad de 45000 BPD. La materia prima es la nafta desbutanizada de la planta hidrodesulfuradora de naftas. La planta consta de las siguientes secciones:

- Sección de preparación de carga
- Sección de estabilización de reformado
- Sección de reacción
- Sección de generación de vapor

En el proceso se emplean cuatro reactores en serie más un "reactor de cambio", los reactores son de lecho fijo. El catalizador es de alta actividad pero es susceptible a envenenarse por la mayoría de los metales y es rápidamente desactivado por el azufre, por lo que, la carga a esta planta, se trata previamente en la unidad hidrodesulfuradora de naftas que desulfura y elimina los venenos de la carga antes de entrar a esta planta.

La sosa gastada generada es enviada a una fosa química, localizada en la planta, y posteriormente, enviada al área de efluentes, a la torre de oxidación de sulfuros. La sosa oxidada es enviada a la planta de tratamiento de aguas para su uso en la etapa de neutralización. Los contaminantes presentes son hidróxido de sodio y Grasas y Aceites.



2.3.1.3 Planta de etileno

Esta planta está diseñada para producir y separar las siguientes corrientes de subproductos: corriente rica en hidrógeno, corriente rica en metano, propileno de alta pureza, propano, butano producto, pentanos y pesados (gasolina de pirólisis). Actualmente la capacidad de la planta es de 600000 ton/año.

Para producir etileno a partir de petróleo, se parte de etano o de propano, procurando no trabajar con mezclas de éstos, sino con cada uno de los gases previamente separados.

Primero, se calienta el etano rápidamente a 820 °C en un calentador a una presión de 3.5 atm., y después de una permanencia muy corta en las columnas se le enfría con agua. El agua que sale de la columna pasa a un separador, en el que se separan el agua y los hidrocarburos ligeros. El agua vuelve al ciclo de refrigeración, mientras que los hidrocarburos son recogidos. El gas que se desprende de la columna está a una temperatura de 38 °C y pasa a un separador, en el que se separa una parte de los componentes de alto punto de ebullición, mientras que el gas rico en etileno escapa por la cabeza de la columna. Con el objeto de eliminar del gas otros componentes indeseables, se le comprime en tres etapas hasta 35 atm.

La última de las etapas de compresión es un separador, de donde se obtiene un gas muy rico en etileno, pero que aún contiene etano inalterado y otros productos que limitarían el empleo ulterior del etileno. Por ello se lleva el gas a un absorbedor, regado desde su parte superior con un aceite de lavado que disuelve al etileno. Para expulsar las partes más volátiles, se le calienta en la parte inferior de la columna a 95° C. se conduce el aceite caliente al desflemador, que se calienta en su parte inferior a 22 °C. El etileno escapa por la cabeza, mientras que del fondo de la columna se retira el aceite



pobre que, después de ser refrigerado a 15.5 °C, vuelve al absorbedor. El gas que escapa por la cabeza se enfría en varias etapas a -16 °C, se deseca, se calienta de nuevo ligeramente y se le conduce a 6 °C a la torre de etileno. Un cambiador de calor calienta el contenido de la columna a 28 °C, con una presión de 25 atm. Por la cabeza escapa etileno, que todavía vuelve a enfriarse a -18 °C para eliminar todas las impurezas que pudieran persistir en él (Mayer, 1987).

El agua de desecho que se genera en esta planta está constituida por agua de apagado y sosas gastadas, los contaminantes presentes son Grasas y Aceites, hidróxido de sodio, sosa carbonatada, carbonato de sodio y sulfuro de sodio.

2.3.1.4 Planta de óxido de etileno y glicoles

Esta planta tiene una capacidad actual de operación de 120000 ton/año. El proceso consiste en alimentar etileno gaseoso fresco a la succión del compresor de recirculación y oxígeno de alta pureza a la descarga del mismo. El gas de recirculación es una mezcla de etileno y oxígeno, metano, bióxido de carbono, nitrógeno, argón y etano. Toda la mezcla gaseosa se alimenta a los reactores en donde se forma óxido de etileno por medio de la reacción a base de un catalizador de plata soportado en alúmina, liberando una gran cantidad de calor, el cual es removido con aceite, generando vapor de 19.3 kg/cm². La mezcla gaseosa fluye a una columna lavadora, en donde por absorción con agua se separa el óxido de etileno de los gases de reacción. El agua rica en óxido de etileno se alimenta a una columna agotadora para separar el óxido de etileno y regresar el agua a la columna lavadora. Esta agua contiene glicoles y una parte es desviada a la planta recuperadora de monoetilenglicol. El destilado pasa a una torre agotadora, posteriormente a una reabsorbadora, después es enviado a una torre purificadora, para luego pasar a una



columna purificadora de donde finalmente se envía a almacenamiento de óxido de etileno.

Los efluentes generados en el proceso provienen de la sección de recuperación de monoetilenglicol. El agua contenida en esta corriente se genera como subproducto de la reacción para producir óxido de etileno, pero también hay un consumo de agua debido a la formación de glicoles a partir del óxido de etileno y agua. Los contaminantes presentes son glicoles y aldehídos.

2.3.1.5 Planta de polietileno de baja densidad

La planta de polietileno de baja densidad tiene una capacidad de 315000 ton/año. Esta planta está constituida por tres trenes y el proceso se desarrolla en cuatro etapas que son: preparación de carga, separación de etileno-polietileno, extrusión y cortado, mezclado y formulación. En la etapa de extrusión y cortado se genera una purga intermitente de agua que proviene del tanque de agua de un decantador.

En el extrusor y cortador se emplea agua de proceso, la cual es utilizada como un medio de transporte para el "pellet". Esta agua es recirculada después de que el "pellet" se ha decantado. A esta recirculación se le adiciona agua del secador centrífugo, la cual puede contener partículas finas o pelusa. El efluente generado en este proceso es la purga del agua desmineralizada utilizada para la separación y el lavado de producto. Los contaminantes presentes en el efluente de esta planta son trazas de etileno.

2.3.1.6 Planta estabilizadora de crudo

La planta estabilizadora de crudo, tiene una capacidad de 200000 BPD de crudo, sin embargo, actualmente se generan 145000 BPD. La estabilización se lleva a cabo mediante destilación atmosférica convencional, condicionada a separar del crudo los hidrocarburos C_8 y



más ligeros, mismos que se fraccionan posteriormente para obtener dos cortes, uno de $C_1 - C_4$ y otro de $C_5 - C_8$ (nafta desbutanizada), que se enviarán como alimentaciones a las plantas fraccionadoras de hidrocarburos e hidrodesulfuradora de naftas, respectivamente. En el funcionamiento de la planta, se consideran dos secciones: desalado y calentamiento, estabilización y fraccionamiento. En ambas secciones existen descargas de agua que posteriormente son enviadas al área de efluentes para su tratamiento. Los contaminantes presentes en el agua que se envía a efluentes son: Grasas y Aceites, fenoles y ácido sulfhídrico.

2.3.1.7 Sección de desalado y calentamiento

Esta sección cuenta con dos trenes A y B. El crudo de alimentación a la planta llega a la succión de las bombas a una temperatura de 27°C . En la succión de las bombas se inyecta el desemulsificante con el fin de abatir emulsiones ocasionadas por los componentes del petróleo.

En el tren A y B el crudo pasa por cinco cambiadores antes de entrar a las desaladoras. Así, el crudo incrementa su temperatura de 27°C a 90°C ó a 127°C . Antes de entrar a las desaladoras, a esta corriente se le inyecta agua de servicios y condensado limpio en proporción de 4 a 6% con respecto al crudo. Ahora crudo y agua entran a la desaladora. El efluente de esta desaladora consiste en crudo desalado. El promedio del consumo de agua para desalado en las condiciones reales de operación es de $31.5 \text{ m}^3/\text{día}$.

La salmuera efluente de las desaladoras sale de éstas a control de nivel, y es enviada a efluentes con un flujo de $36.3 \text{ m}^3/\text{día}$. Los contaminantes que se encuentran en esta salmuera son: Grasas y Aceites, sales minerales, metales pesados, cloruros, sólidos suspendidos, fenoles y sulfuros.



2.3.1.8 Sección de estabilización y fraccionamiento

Esta sección está constituida por la torre estabilizadora, la fraccionadora y sus equipos complementarios. El crudo desalado se termina de calentar en dos calentadores a fuego directo para alimentarse a la torre estabilizadora. Los fondos de la estabilizadora se envían a almacenamiento como crudo estabilizado.

Los domos de la torre estabilizadora se acumulan y se separan en una fase líquida y una fase gas en el tanque acumulador de reflujo. La fase líquida se alimenta a la torre desbutanizadora de la cual se obtiene por los fondos un corte de $C_5 - C_8$ que se enviará como carga de gasolina desbutanizadora a la hidrodesulfuradora de naftas y por el domo dos corrientes, una líquida y una gaseosa; la líquida es un corte de C_4 y más ligeros que se envían como carga a la planta fraccionadora de hidrocarburos y la gaseosa constituida por gas amargo que también se envía a la misma planta a sus sección de tratamiento. La fase gas del domo de la estabilizadora, se comprime, se condensa parcialmente y se separa en un acumulador, de donde la fase líquida del domo de la estabilizadora que se alimenta a la torre desbutanizadora y la fase gas se incorporan a la corriente gaseosa de la desbutanizadora que se alimenta a la sección de hidrocarburos.

El acumulador de reflujo tiene una pierna de separación donde se colecta el agua que sale del domo de la torre y que se inyecta para lavado de sales. Esta agua es extraída de la pierna a control de nivel y es enviada a efluentes. Cada media hora se desfoga el agua amarga de la bota del acumulador, esta bota tiene una capacidad aproximada de 40L.

Actualmente el flujo de agua amarga que se manda a efluentes es de aproximadamente $2.65 \text{ m}^3/\text{día}$ y los contaminantes presentes en ella son Grasas y Aceites, fenoles, sales de amonio y ácido sulfhídrico.



2.3.1.9 Planta hidrodesulfuradora de naftas

La hidrodesulfuración es un proceso de refinación catalítica, que utiliza un catalizador selectivo en combinación con una corriente de gas rica en hidrógeno, para descomponer los compuestos de azufre, oxígeno, nitrógeno, cloruros y compuestos metálicos, así como para saturar las olefinas presentes. Los metales se eliminan por fijación sobre la superficie del catalizador. También se elimina agua, obteniéndose finalmente un producto seco y libre de impurezas.

La carga se mezcla con una corriente de gas rica en hidrógeno proveniente de las plantas reformadoras, vaporizándose en el tren de precalentamiento y en el calentador de fuego directo, antes de entrar al reactor la hidrogenación se lleva a cabo a través de un lecho fijo. Las reacciones que se efectúan son las siguientes:

- a) Saturación de olefinas con producción de parafinas y naftalenos.
- b) Hidrogenación de los compuestos de azufre con producción de parafinas y H_2S .
- c) Hidrogenación de los compuestos de nitrógeno con producción de parafinas y amoniaco.
- d) El oxígeno es eliminado con producción de hidrocarburos y agua.

Las tres primeras reacciones son altamente exotérmicas. La hidrogenación se lleva a cabo en dos reactores catalíticos a una temperatura de entre 320 y 340°C aproximadamente y bajo una presión de entre 28 y 30 kg/cm². El efluente de los reactores se enfría y condensa a través de una serie de 3 intercambiadores, oscilando a una temperatura de operación a la salida del tren de intercambiadores de 140-160°C. El fluido pasa a través de otro intercambiador enfriándose hasta la temperatura de salida de 98°C, corriente arriba se inyecta una carga de hidrógeno proveniente de la



planta reformadora de BTX, con un flujo de 30 m³/h. la separación de fases se efectúa en los separadores de producto. Las dos corrientes se unen para formar la alimentación del tanque separador de productos desulfurados, manteniéndose de manera constante a un nivel de separación del 39% y 22 kg/cm² de presión. En este tanque se separa la corriente de agua de desecho, ésta se une al cabezal de desecho de la planta, el cual tiene como destino un tanque de desecho. Dicho tanque sirve como almacenamiento temporal de los desechos generados en la planta, en donde, una vez acumulados se desfogan hacia el área de efluentes para su respectivo tratamiento.

Los contaminantes presentes en los efluentes de esta planta son: Grasas y Aceites, sales de amonio, trazas de BTX y metales pesados.

2.3.1.10 Planta isomerizadora de pentanos

La carga líquida es el producto de la planta deshexanizadora de la planta BTX. La carga de hidrógeno proviene de la unidad HPU. La carga líquida pasa a través de la cama de guarda de azufre donde las trazas de azufre se agotan, a continuación la carga es secada.

El sistema emplea dos reactores con una configuración de flujo en serie. Las reacciones de isomerización e hidrogenación del pentano y hexano son exotérmicas, la temperatura se incrementa a través de los reactores, al equilibrio de la reacción conviene que la temperatura de salida sea tan baja como la actividad del catalizador lo permita.

El efluente del sistema fluye a una columna estabilizadora de producto, en donde los hidrocarburos ligeros de la conversión y el hidrógeno son removidos, dejando en el fondo el producto isomerizado.

Pequeñas cantidades de tetracloruro de carbono se adicionan continuamente a la carga como promotor de la catálisis, éste es convertido en ácido clorhídrico dentro del reactor. La cantidad de gas



que sale de la estabilizadora es muy pequeña. El gas de la estabilizadora contiene el hidrógeno que no se consumió en el reactor más gases ligeros. Al gas efluente de la estabilizadora se le remueve el HCl mediante un lavado cáustico de gas neto, antes de enviarse al sistema de gas combustible. Es aquí en donde se genera el efluente de esta planta, una solución de sosa gastada, con concentración menor del 2% en peso.

En la siguiente tabla, se muestra el tipo de agua residual generada por planta, su recuperación o sitio en donde se genera, así como el tipo de tratamiento recibido antes de ser enviada al área de efluentes.



Tabla 2.3 Resumen de aguas residuales generadas por planta de proceso, con tratamiento y contaminantes

PLANTA DE PROCESO	TIPO DE EFLUENTE	TIPO DE TRATAMIENTO DEL EFLUENTE	TIPO DE CONTAMINANTE
Etilbenceno - Estireno	Agua ácida	Ajuste de pH alcalino y se envía al área de efluentes	$AlCl_3/HCl$
	Condensado Sucio	Ninguno, se envía al área de efluentes	Etilbenceno-Estireno
Transformadora y Extractora de Aromáticos (TEA)	Purgas intermitentes de agua con aromáticos	Ninguno, se envía al área de efluentes	Bencenos, Xilenos HC no aromáticos
Etileno	Agua de Apagado	Ninguno, se envía al área de efluentes	Grasas y Aceites
	Sosas Gastadas	Ninguno, se envía al área de efluentes	$Na_2S/Na_2CO_3/NaOH$ /sosa carbonatada
Óxido de Etileno y Glicoles	Condensado del Evaporador	Ninguno, se envía al drenaje glicolado y posteriormente al área de efluentes	Glicoles, aldehídos
	Agua de pozo caliente	Ninguno, se envía a drenaje glicolado y posteriormente al área de efluentes	Glicoles, aldehídos
Polietileno de Baja Densidad	Purga intermitente de Agua desmineralizada para separación y lavado de producto	Ninguno, se envía al área de efluentes	Trazas de Etileno
Estabilizadora de Crudo	Salmuera	Ninguno, se envía al área de efluentes	Grasas y Aceites, sales minerales, metales pesados, cloruros, SST, fenoles, sulfuros
Isomerizadora de Pentanos	Sosas gastadas	No aplica	No aplica



2.4 MARCO JURÍDICO

El marco jurídico en el que se desarrolla el presente trabajo incluye la legislación existente en materia hídrica, dentro de esta legislación existe una gran cantidad de textos legales, incluyendo tratados internacionales y bilaterales, no obstante, en el ámbito nacional, esta normatividad se puede resumir a 3 normas jurídicas principales, las cuales son la Constitución Mexicana de los Estados Unidos Mexicanos, la Ley de Aguas Nacionales y la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA).

2.4.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos

En la Constitución, se establece, en el artículo 27, que las aguas dentro del territorio mexicano son propiedad de la nación, además hace referencia a la facultad que tiene el Estado para transferir el dominio de este bien a particulares mediante concesiones otorgadas por el poder Ejecutivo Federal; también deben mencionarse los artículos 73, 115 y 122, los cuales establecen las facultades legislativas del Congreso de la Unión, de los municipios y las facultades de la Asamblea Legislativa del Distrito Federal en materia de agua.



2.4.2 Ley de Aguas Nacionales

La Ley de Aguas Nacionales es una ley que se desprende del artículo 27 de la Constitución Política, tiene como finalidad regular el uso, aprovechamiento o explotación del agua que se encuentra dentro del territorio nacional, así como su distribución y la preservación de su calidad y cantidad. Establece a la Comisión Nacional de Aguas (CONAGUA) como la autoridad administrativa en materia de aguas nacionales, la CONAGUA se encarga de vigilar el cumplimiento y aplicación de la Ley en la materia, además entre sus principales atribuciones está expedir títulos de concesión, asignar permisos de descarga y llevar el Registro Público de Derechos de Agua, además tiene como mandato apoyar y acreditar la participación y organización de los usuarios para mejorar la gestión del agua.

La LGEEPA se enfoca principalmente en procurar la prevención y el control de la contaminación del agua y de los ecosistemas acuáticos, señala por ejemplo, que la prevención y control de la contaminación del agua, es fundamental para evitar que se reduzca su disponibilidad y para proteger los ecosistemas del país, también establece que existe una responsabilidad compartida entre el Estado y la sociedad para prevenir la contaminación de las aguas superficiales, así como de las que se encuentran en el subsuelo. De la misma forma, indica que las aguas residuales deben recibir tratamiento previo a su descarga a los diferentes cuerpos de agua receptores.

Los criterios que se señalan en la LGEEPA han sido considerados al emitir normas oficiales mexicanas para el uso, tratamiento y disposición de aguas residuales, para el tratamiento del agua para el uso y consumo humano, así como para la infiltración y descarga de aguas residuales en cuerpos receptores considerados aguas nacionales.



2.4.3 Normas Oficiales Mexicanas

Las principales normas oficiales mexicanas en materia de agua son la NOM-001-SEMARNAT-1996, la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. La NOM-002-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. La NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público y la NOM-127-SSA1-1994, que establece los límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

La norma a la que se debe apegar el complejo petroquímico en estudio es la NOM-001-SEMARNAT-1996, ya que el complejo descarga hacia un cuerpo receptor propiedad de la nación, las demás normas no aplican en este caso, debido a que no se ha planteado reutilizar el agua tratada en servicios al público, y el efluente no se descargará en el alcantarillado municipal. Otra norma a la que se debe ceñir cualquier planta de tratamiento de aguas residuales que produzca como residuo algún tipo de lodo o biosólido es la NOM-004-SEMARNAT-2002, que enmarca las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para el aprovechamiento y disposición final de los lodos producidos en ésta.



Capítulo III. Metodología

En este apartado, se describirán las acciones y actividades que se siguieron durante la elaboración del presente trabajo, la información de la cual se dispuso fue obtenida de la literatura, datos proporcionados por el complejo, experiencia descrita en artículos científicos y de tecnólogos.

A continuación se presentan, de manera resumida, las actividades que se llevaron a cabo.

Recopilación de información

La primera acción llevada a cabo, después de haber identificado el tema a realizar, fue la recopilación de toda la información disponible para identificar el esquema en el que trabaja el complejo y los procesos con los que éste cuenta.

Entre la información clave que se recopiló se encuentra:

- Datos de diseño
- Calidad del influente y del efluente en cada etapa
- Condiciones actuales de operación
- Condiciones normales de operación de equipos reportados en la literatura
- Planos y diagramas
- Datos históricos de análisis de agua en el laboratorio

Análisis de la información

Se llevó a cabo un análisis detallado de la información que se recopiló, poniendo especial interés en áreas en las cuales las condiciones de operación se encontraran alejadas de las condiciones



de diseño, de esta manera podría identificarse la problemática existente.

Se identificaron los lugares en los cuales se generaban aguas residuales, así como los tipos de éstas, las corrientes, y la carga de contaminantes en cada corriente.

Se identificaron los equipos principales en el área de efluentes, se analizó su función y las condiciones en las cuales se encontraban.

Para facilitar la identificación de los puntos en los cuales sería adecuada una modernización, se realizó un balance general de agua con los flujos reales de las corrientes del área de efluentes.

Identificación de la problemática en el complejo petroquímico.

El balance general de agua y de contaminantes del agua fue una herramienta muy importante para la identificación de las corrientes en las cuales existe cierta problemática, o bien existen áreas de oportunidad para un adecuado manejo o tratamiento de las aguas residuales generadas.

El desarrollo del balance de agua debe llevarse en dos etapas principales: establecer el circuito de distribución de agua de suministro y definir el sistema de evacuación de aguas residuales en los diferentes drenajes identificando plenamente los puntos de origen y de intersección de los cabezales.

Además de los balances de materia se compararon datos de diseño contra datos actuales de operación para poder identificar de una forma adecuada la problemática existente.

Evaluación de nuevas tecnologías y comparación con las tecnologías actuales, a nivel técnico.

Existen diferentes metodologías para la evaluación de alternativas tecnológicas, la metodología utilizada en este caso tomó en cuenta



aspectos tecnológicos, económicos, y en cierta medida, contractuales y ambientales, la ponderación está basada en la importancia relativa que éstos tengan, de acuerdo al criterio del autor.

La evaluación técnica involucra el análisis del proceso (bases de diseño, características, flexibilidad y condiciones del proceso, mantenimiento), el análisis de documentación técnica, así como de servicios adicionales y experiencia técnica administrativa. La evaluación contractual implica el análisis de la tecnología, de los servicios técnicos y profesionales, entre otros aspectos. En la evaluación económica se toma en cuenta la inversión en equipo y materiales (insumos, servicios auxiliares, reactivos y otros), mantenimiento, costo de ingeniería y capital de trabajo. Finalmente, en el aspecto ambiental se analiza el impacto que las tecnologías evaluadas tendrían en el medio ambiente.

La mayor parte de esta información se obtuvo de tecnólogos y de la experiencia reportada en artículos científicos.

Propuesta de alternativas de modernización

Con base en la evaluación de las nuevas tecnologías y la identificación de las áreas de oportunidad, se realizaron propuestas de modernización para la planta de tratamiento de aguas residuales del complejo, de forma tal, que en cada etapa, se cumpliera con la remoción de contaminantes necesaria para que en la descarga al emisor final se cumpliera con la normatividad vigente, además de estar preparados para posibles modificaciones a la normatividad en el futuro.



Análisis económico de las propuestas

Después de realizar la evaluación técnica, se elaboró el estudio económico de las propuestas para conocer cuál sería la inversión total y para saber si ésta sería redituable o no, de esta forma se efectuó la selección final de la mejor alternativa de modernización. La viabilidad económica de las opciones se evaluó con base en dos factores: la tasa interna de retorno y el valor presente neto.

El análisis de costos de cada propuesta, se llevo a cabo mediante estimados y cotizaciones disponibles.

En la figura 3.1 se representa esquemáticamente la metodología seguida durante la realización del trabajo.

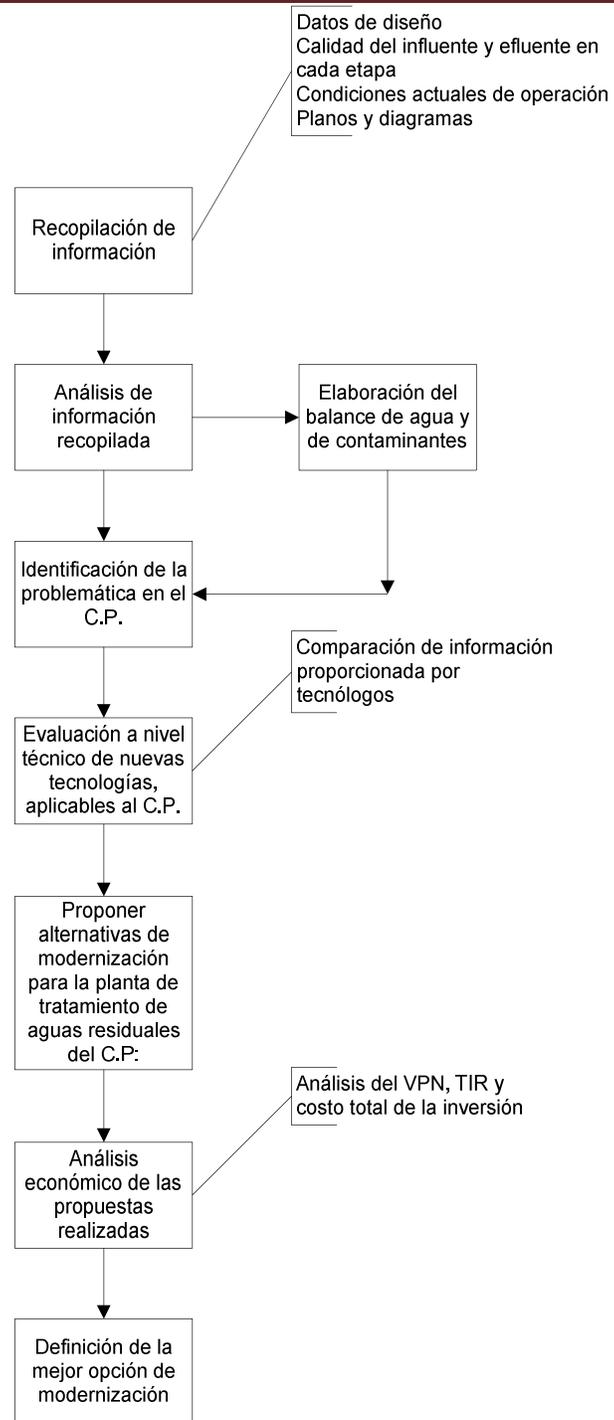


Figura 3.1 Metodología del desarrollo de las actividades



Capítulo IV. Caso de estudio. Estudio de la tecnología actual del Complejo Petroquímico, análisis y selección de las nuevas opciones tecnológicas para tratar sus aguas residuales.

En este capítulo se dará una breve descripción de las condiciones actuales del complejo en el área de efluentes, se detallarán los problemas que existen en los equipos actuales y posteriormente se estudiarán las tecnologías disponibles, con el fin de seleccionar las más adecuadas para el complejo.

4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA SITUACIÓN ACTUAL EN EL ÁREA DE EFLUENTES DEL COMPLEJO PETROQUÍMICO

La planta de tratamiento de aguas residuales del complejo fue diseñada para tratar los efluentes de las diversas áreas que lo integran, las cuales son: las plantas de procesos, la unidad desmineralizadora de agua y el área de condensados y producción de vapor, este sistema de tratamiento se divide en dos secciones:

- Sección de tratamiento primario
- Sección de tratamiento secundario

A continuación se describirán las dos secciones de tratamiento con las que cuenta el Complejo Petroquímico.

4.1.1 Tratamiento primario

Consiste básicamente en un sistema de tratamiento de aguas aceitosas, el cual se utiliza para reducir el contenido de Grasas y Aceites, así como sólidos gruesos que arrastran las corrientes que llegan al preseparador y a los separadores de aceite.



Para tratar las corrientes aceitosas que llegan a la planta, se cuenta con un preseparador de aceite que emplea un sistema de separación denominado sistema trapezoidal y dos separadores de aceite de placas corrugadas para la separación de Grasas y Aceites.

La corriente de las purgas de las desaladoras provenientes de la planta estabilizadora de crudo se recibe en un registro y pasa al separador de Grasas y Aceites.

Los hidrocarburos se recuperan mediante el sistema trapezoidal, dirigiendo los hidrocarburos a dos cárcamos y, tras haber drenado el agua, éstos se bombean a los tanques de almacenamiento.

La corriente del drenaje aceitoso general, pasa por el preseparador y por el separador para dirigirse después a dos lagunas de igualación, cuya función es homogenizar la calidad de las corrientes, evitar variaciones grandes de pH, temperatura, carga orgánica, así como separar y recuperar los hidrocarburos que no hayan sido recuperados por los separadores de Grasas y Aceites, esto para evitar que se vea afectado el funcionamiento de los sistemas de tratamiento biológico. Además, se cuenta con una laguna de demasías para desvío y recepción del agua residual, en caso de rebreflujo hacia el sistema.

En la tabla 4.1 se presentan las características de los equipos que integran actualmente la sección de tratamiento primario.



Tabla 4.1 Características del sistema de tratamiento aceitoso

EQUIPO	CONDICIONES DE OPERACIÓN	DIMENSIONES	FUNCIÓN
Preseparador de Aceite	Flujo de 2428.6 m ³ /d Temperatura de 30°C	N/D	Separar las Grasas y Aceites en su mayoría
Separador de aceite 1	Gasto normal 221,573 kg/h Gasto máximo 289,933 kg/h Gasto de diseño 567,750 L/h Concentración de aceite en agua: 0.02 % en peso Temperatura del agua: 36.5°C pH: 7 Densidad relativa del agua: 1 Densidad relativa del aceite: 0.86 Diámetro de partícula: 50 micras Concentración de aceite en el efluente del separador: 50 ppm	Largo: 11.6 m Ancho: 10.8 m Altura: 4.7 m	Separar las Grasas y Aceites del agua proveniente de áreas de proceso y purga de la planta Estabilizadora de Crudo (desaladora) por medio de dos paquetes de placas corrugadas; contiene 5 celdas cada separador.
Separador de aceite 2	Gasto normal 68,360 kg/h Gasto máximo 68,360 kg/h Gasto de diseño 113,550 L/h Concentración de aceite en agua: 0.00037 % en peso Temperatura del agua: 70°C pH: 7 Densidad relativa del agua: 1 Densidad relativa del aceite: 0.86 Diámetro de partícula: 50 micras Concentración de aceite en el efluente del separador: 50 ppm	Largo: 6 m Ancho: 4 m	Separar las Grasas y Aceites del agua de la planta Estabilizadora de Crudo (desaladora) por medio de dos paquetes de placas corrugadas.
Fosa de igualación	Tiempo de residencia 48 h	Largo: 100 m Ancho: 43 m Altura: 3.25m	Amortiguar e igualar las variaciones en concentración, temperatura, DBO ₅ y



EQUIPO	CONDICIONES DE OPERACIÓN	DIMENSIONES	FUNCIÓN
			DQO.
Fosa de aceite recuperado	Operación intermitente depende del aceite recuperado	N/D	Recuperar el aceite de los separadores
Tanque de almacenamiento de mezcla de aceites y disolventes gastados recuperados	Almacenamiento intermitente no tiene un flujo continuo de entrada	Capacidad: 10,000 BLS 1,590 m ³	Almacena los aceites y disolventes gastados para enviarlos a servicios auxiliares para generación de vapor.
Calentador de aceite recuperado	Consumo de vapor de Calentamiento: 72 kg/h	N/D	Calentar aceite recuperado para mantenerlo con ciertas características.

Tabla 4.2 Características principales de motores de bombas del sistema de tratamiento aceitoso

EQUIPO	CONDICIONES DE OPERACIÓN
Bomba de aceite	Volts: 440 Fases: 3 kW consumidos: 18.64 kW instalados: 37.28
Bomba de recuperación de aceite del separador de aceite No. 1	Volts: 440 Fases: 3 kW consumidos: 0.74 kW instalados: 1.49
Bomba de recuperación de aceite del separador de aceite No. 2	Volts: 440 Fases: 3 kW consumidos: 1.12 kW instalados: 2.24
Bomba de aceite de recuperado de la fosa de igualación	Volts: 440 Fases: 3 kW consumidos: 1.12 kW instalados: 2.24
Bomba de lodos	Volts: 440 Fases: 3 kW consumidos: 11.2 kW instalados: 11.2
Bomba de lodos	Volts: 440 Fases: 3 kW consumidos: 5.6 kW instalados: 5.6
Filtros de rejilla	Volts: 440 Fases: 3 kW consumidos: 0.37 kW instalados: 0.74



4.1.2 Tratamiento secundario

El tratamiento secundario tiene como objetivo principal biodegradar la materia orgánica contenida en el agua residual, sedimentar los sólidos suspendidos, estabilizar y desinfectar las corrientes antes de incorporarse al canal emisor, para este fin, el Complejo Petroquímico cuenta con una laguna de oxidación biológica.

La laguna de oxidación proporciona oxígeno a los microorganismos para oxidar la materia orgánica, además de mantener en movimiento el agua residual para evitar sedimentación de sólidos y proporcionar una distribución adecuada de los nutrientes que se le agregan, los cuales son: Fosfato diamónico, urea y ácido fosfórico.

El efluente de la laguna de oxidación, pasa a las lagunas de estabilización para que sedimenten los sólidos y se le dé un tratamiento final al agua.

El efluente entra a un cárcamo de bombeo, y posteriormente es vertido por gravedad a un canal de cloración, ya que las bombas del cárcamo están actualmente fuera de servicio.

Finalmente, el efluente es mandado al canal emisor, donde se combina con la corriente de drenaje pluvial proveniente de todo el Complejo Petroquímico. En la tabla 4.3 se presentan las características de los equipos que integran el sistema de tratamiento secundario.



Tabla 4.3 Características de los equipos del sistema de tratamiento secundario

EQUIPO	CONDICIONES DE OPERACIÓN	DIMENSIONES	FUNCIÓN
Laguna de oxidación	2 mg de oxígeno/L Tiempo de retención: 5 días Consumo de nutrientes: DAP: 635 kg/d, Urea: 1,330 kg/d	Largo: 150 m Ancho: 108 m Altura diseño: 5.1 m Altura de operación: 3.30 m	Oxidar materia orgánica y reducir la DBO ₅ .
Laguna de estabilización	Temperatura: 28°C Flujo de 7213m ³ /d.	Largo: 138.5 m Ancho: 80 m Altura diseño: 3 m Altura operación 2 m	Sedimentación de sólidos y tratamiento final del efluente.
Clorador 2	Concentración máxima de cloro en el agua 3 ppm	N/D	Desinfección del agua tratada.

En la tabla 4.4 se muestran los parámetros principales de cada sección del tratamiento

Tabla 4.4 Parámetros principales para cada sección de tratamiento

PARAMETRO	UNIDADES	EFLUENTE DE TRATAMIENTO PRIMARIO	EFLUENTE DE TRATAMIENTO SECUNDARIO	DRENAJE PLUVIAL	DESCARGA A EMISOR
Flujo	T/h	188	186	807	993
pH	Unidad de pH	10	9	7.3	7.9
G Y A	mg/L	120	18	15	18
DBO ₅	mg/L	137	24	4.5	11

En la figura 4.1 se muestra el diagrama simplificado de la situación actual en el área de efluentes del Complejo Petroquímico. En éste, es posible observar que las corrientes del drenaje pluvial y de la fosa de neutralización no entran propiamente al sistema de tratamiento, sino



que son dos corrientes que se unen al final del tren, únicamente para la descarga al emisor final.

El balance de materia de la planta de fluentes se presenta en la tabla 4.5.

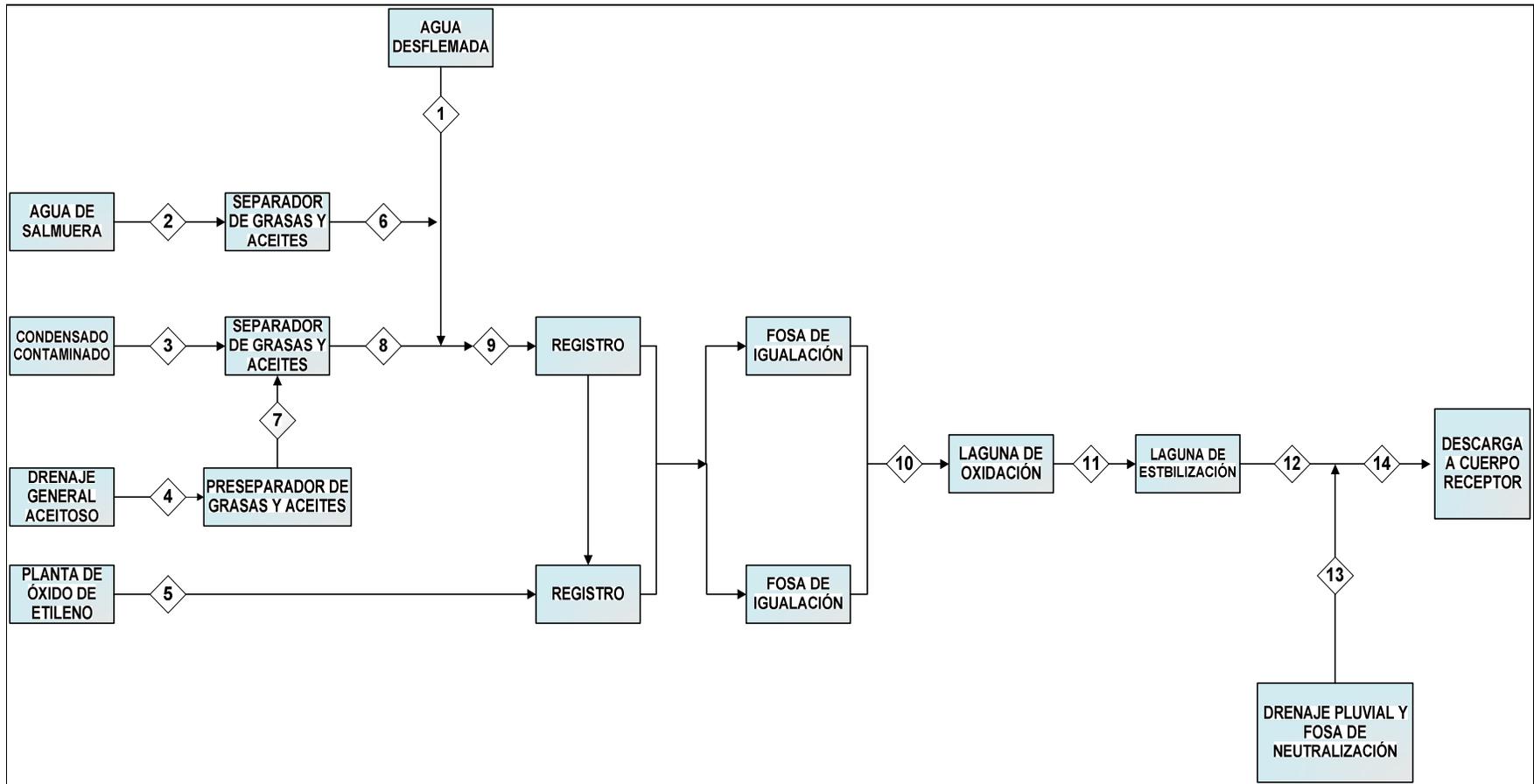


Figura 4.1 Diagrama simplificado de la situación actual del área de tratamiento de efluentes del C.P.



4.1.3 Problemática en la sección de tratamiento primario

En este apartado se planteará la problemática particular que existe actualmente en el complejo petroquímico en la sección de tratamiento primario, para posteriormente plantear opciones que puedan solucionar esta problemática.

Preseparador de aceite

El preseparador de aceite consiste en un sistema denominado trapezoidal y utiliza como transporte un mecanismo de tornillo sinfín, este preseparador presenta algunos detalles que ocasionan una disminución en la eficiencia del equipo, estos detalles se describen en la tabla 4.6

Tabla 4.6 Problemática en el preseparador de aceite

EQUIPO	PROBLEMÁTICA
Preseparador de aceite	El agua aceitosa en ocasiones no pasa por el preseparador de aceite y es desviada a los separadores
	Sólo se tiene operando una bomba
	Se tiene acumulación de Grasas y Aceites en el preseparador
	No se tiene medidor de flujo a la entrada ni analizadores de pH ni de Grasas y Aceites.

Separadores de aceite

Estos separadores tienen un sistema de separación de Grasas y Aceites denominado de medias cañas, cada separador cuenta con 5 celdas y 5 medias cañas y operan con suministro de vapor de media presión a través de una línea de 3" con cabezal para la inyección de vapor en cada celda con el fin de facilitar la eliminación de lodos que se acumulan en el fondo del separador. La problemática existente en los separadores de aceite se describe en la tabla 4.7



Tabla 4. 7 Problemática en los separadores de aceite

EQUIPO	PROBLEMÁTICA
Separadores de aceite	Las rejillas separadoras de sólidos no se encuentran operando debido a taponamiento
	Se tiene acumulación de Grasas y Aceites en el preseparator
	Dos bombas se encuentran fuera de operación, teniendo que utilizar las bombas de combustión interna, para la recuperación de aceites
	No cuenta con analizadores de parámetros ni con medidor de flujo a la entrada de condensado.

Separador de aceite de planta estabilizadora de crudo

Este separador de Grasas y Aceites está constituido por cuatro celdas de separación conteniendo cada una dos paquetes de placas corrugadas con el fin de separar el aceite. La problemática en el separador de aceite se anexa en la tabla 4.8.

Tabla 4.8 Problemática en el separador de aceite de planta estabilizadora de crudo

EQUIPO	PROBLEMÁTICA
Separador de aceites	Al momento de recolectar las Grasas y Aceites también pasa exceso de agua a la fosa recuperadora de Grasas y Aceites
	Dos bombas se encuentran fuera de operación, teniendo que utilizar las bombas de combustión interna, para la recuperación de aceites
	No se cuenta con un medidor de flujo a la entrada de agua de salmuera de la planta estabilizadora de crudo ni analizadores de parámetros

Fosas de igualación

Su función es homogenizar la calidad de las corrientes, amortiguar las variaciones de pH, temperatura y carga orgánica. La problemática en las fosas de igualación se encuentra descrita en la tabla 4.9.



Tabla 4.9 Problemática en las fosas de igualación

EQUIPO	PROBLEMÁTICA
Fosas de igualación	Una de las lagunas de igualación se encuentra con acumulación de grasas, aceites y sólidos
	La membrana hypalon está fisurada en algunos puntos
	De tres aeradores que deben de estar operando en cada laguna, ninguno se encuentra en operación
	No tienen analizadores de Grasas y Aceites ni de pH

Fosa de demasías

Este sistema tiene como objetivo la recepción de agua residual en caso de sobreflujos o de que alguna planta que envía agua hacia el área de efluentes llegase a salir de operación normal, evitando con ello poner en riesgo la operación del sistema secundario. La problemática en la fosa de demasías se describe en la tabla 4.10.

Tabla 4.10 Problemática en la fosas de demasías

EQUIPO	PROBLEMÁTICA
Fosa de demasías	La fosa de demasías está fuera de operación, por lo que no se cuenta con ninguna fosa para recibir descargas contaminadas y se retira el agua con bombas de combustión interna, ya que las de diseño están fuera de operación

4.1.4 Problemática en la sección de tratamiento secundario

En esta sección se describirá la problemática que existe en los equipos que integran el tratamiento secundario, para posteriormente encontrar las soluciones específicas que existan para dicha problemática.

Laguna de oxidación

La laguna de oxidación biológica opera con flujo continuo y cuenta con 20 aeradores cuya función es proporcionar oxígeno para que los microorganismos puedan oxidar la materia orgánica. Además los



aeradores mantienen en movimiento el agua residual que tiene la laguna de oxidación y evitan que los sólidos sedimenten. En la tabla 4.11 se muestra la problemática que existe actualmente en la laguna de oxidación.

Tabla 4.11 Problemática en la laguna de oxidación

EQUIPO	PROBLEMÁTICA
Laguna de oxidación	Sólo funcionan 14 aeradores de los 20 que deberían estar en operación en la laguna
	La membrana hypalon presenta daños
	La laguna no cuenta con analizadores de pH, oxígeno disuelto ni de Grasas y Aceites.

Laguna de estabilización

La corriente de agua residual proveniente de la laguna de oxidación biológica con flujo turbulento por acción de los aeradores, pasa a flujo laminar en las lagunas de estabilización, donde tendrá un tiempo de residencia de 2 días.

La problemática en la laguna de estabilización se describe a continuación, en la tabla 4.12.

Tabla 4.12 Problemática en la laguna de estabilización

EQUIPO	PROBLEMÁTICA
Laguna de estabilización	La membrana hypalon presenta daños
	La laguna de estabilización no cuenta con analizadores ni medidor de flujo a la salida

Clorador 2

Antes de mandar el agua residual tratada al canal emisor principal, ésta es clorada para abatir los coliformes fecales que pudiera arrastrar la corriente. La problemática que existe en el clorador se describe en la tabla 4.13.



Tabla 4.13 Problemática en el clorador 2

EQUIPO	PROBLEMÁTICA
Clorador 2	No se tiene un control exacto de la dosificación de cloro gas

4.2 DESCRIPCIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS OPCIONES DE TRATAMIENTO

En este punto se estudiarán las diversas tecnologías que son aplicables al caso de estudio, a partir del análisis de sus características, así como de la carga de contaminantes que pueden remover, se propondrán 3 opciones de modernización a la planta de tratamiento de aguas residuales del complejo petroquímico. En el siguiente capítulo se llevará a cabo el estudio económico de las tres propuestas y a partir de este estudio se definirá cuál de estas propuestas es la mejor en el aspecto técnico y en el aspecto económico.

4.2.1 Tratamiento primario

Esta sección tiene como objetivo principal lograr la mayor remoción posible de Grasas y Aceites y de sólidos suspendidos, de tal forma que al entrar el efluente en el tratamiento secundario, los niveles de contaminantes no interfieran con el mismo, y los equipos trabajen de una forma adecuada, este límite de Grasas y Aceites a la salida del tratamiento primario, se fija mediante los valores máximos que aceptan a la entrada las diferentes tecnologías disponibles aplicables al tratamiento secundario.

Tecnologías de la primera etapa de remoción (Grasas y Aceites)

Separadores agua/aceite tipo API

El principio del sistema es hacer pasar el agua con Grasas y Aceites mediante un flujo continuo. Las partículas de Grasas y Aceites suben



a la superficie con un flujo que depende de la diferencia de densidad con el agua, de su tamaño y de la viscosidad del agua. La eficiencia del sistema de separación depende, sobre todo, del área de los estanques de separación, del tiempo de retención, de la profundidad y de la eficiencia que se haya alcanzado en la destrucción de la energía cinética del agua contaminada afluyente, antes de que entre a los depósitos.

La mayoría de las Grasas y Aceites que entran en el agua contaminada lo hace en forma de gotas grandes que se separan muy fácilmente, pero también en forma de gotas más pequeñas que tienen una recuperación más difícil.

El agua que contiene estas últimas partículas, así como el hidrocarburo en forma de emulsión, las partículas solubles y las partículas en suspensión, pasan a través de un sistema invertido, y llegan al último depósito, desde el cual pasan por gravedad, o mediante bombeo, a la siguiente fase de tratamiento.

Los sólidos de elevada densidad se depositan simplemente por gravedad en el fondo, y son arrastrados de acuerdo con la tecnología que se haya aplicado en el tratamiento general de separación.

La separación del hidrocarburo de la superficie se efectúa mediante un tubo sumergido parcialmente en un líquido, con apertura longitudinal y que gira mediante unos discos que van recuperando el producto. La capa fina del agua se bombea hacia la parte superior del separador, y la capa de petróleo a su vez se bombea hacia los tanques de almacenamiento del producto recuperado.

Los separadores API necesitan una superficie bastante grande, sin embargo tienen muchas ventajas. Pueden recibir proporciones variables de hidrocarburos, tanto en cantidad como en composición, y también pueden recibir productos sólidos viscosos y productos con



ceras, y pueden retener cantidades muy grandes de Grasas y Aceites después de haber ocurrido accidentes graves o problemas de contaminación elevada (Seoáñez, 2000). En la tabla 4.14 se describen las ventajas y las desventajas de los separadores API. En la figura 4.2 se presenta un separador API convencional.

Tabla 4.14 Ventajas y desventajas de los separadores API

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none">• No contiene partes móviles.• Mínimo mantenimiento.• Opera por gravedad.• Opera con altos caudales• Gotas de aceite removidas de 150 micras.• Puede ser utilizado incluso con influentes que contienen Grasas y Aceites altamente viscosos y/o gran cantidad de sólidos.• Soporta variaciones significativas en las cargas hidráulicas y de contaminantes.	<ul style="list-style-type: none">• La eficiencia depende de la temperatura del agua de entrada.• Estos equipos están generalmente abiertos a la atmósfera, condición que provoca emisión de compuestos orgánicos volátiles.• Requiere áreas muy amplias.• Tiempo de residencia grande para la separación.• Se requiere obra civil.• Problemas de separación dependiendo de contaminantes adicionales.

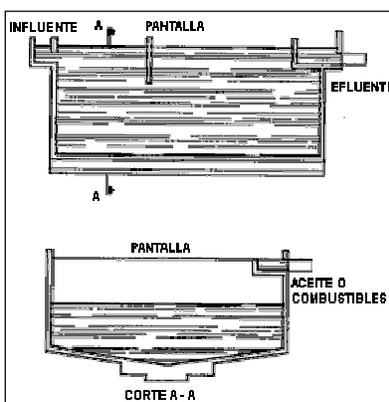


Figura 4.2 Separador API convencional



Separadores CPI

Con el fin de aumentar el rendimiento y la capacidad de los procesos de separación de Grasas y Aceites por gravedad, se desarrollaron los separadores de placas, los cuales aumentaron los rendimientos y disminuyeron la superficie requerida.

En este tipo de separadores se ve aumentada la superficie de contacto de las Grasas y Aceites con el agua, lo que significa una reducción importante en el terreno precisado para su instalación. Estos separadores agua/aceite denominados CPI (por sus siglas en inglés Corrugated Plate Interceptor), remueven Grasas y Aceites no emulsionadas hasta de 10,000 ppm, permitiendo en algunos casos obtener efluentes con menos de 10 mg/L de gotas de aceite mayores a 20 μ m. El proceso de separación se realiza por medio de placas perforadas inclinadas dispuestas de tal manera que inducen a las gotas de Grasas y Aceites a adherirse a las mismas.

Las Grasas y Aceites separados pueden almacenarse temporalmente en una cámara dispuesta para tal fin.

Las placas inclinadas facilitan la decantación de sólidos sin obturar los canales de circulación de líquido. Una cámara de lodos permite almacenar los sólidos decantados lejos de la corriente líquida de manera que no interfiriera en el proceso de separación. El aceite separado y el agua clarificada son descargados por gravedad cuando existe una diferencia de densidad entre ellos. El proceso admite la operación con caudales variables.

El equipo consiste en un tanque rectangular conteniendo baffles y vertederos especiales para controlar y direccionar el flujo, remover las Grasas y Aceites y controlar los niveles de líquidos. Adicionalmente contiene recintos para separar los sólidos decantados, las Grasas y Aceites y el agua tratada (ver figura 4.3).

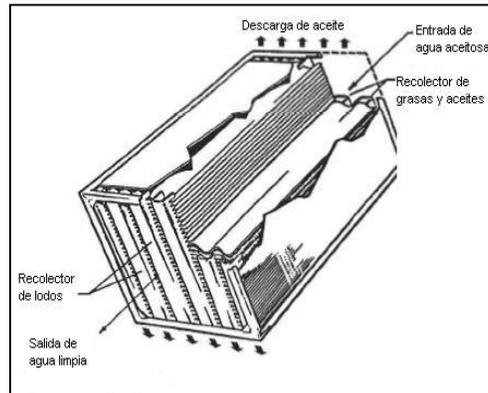


Figura 4. 3 Separador de aceite de placas coalescentes

El separador es capaz de trabajar sólo por gravedad o bien, cuando se desee, por equipos de bombeo acoplados al mismo (Sainz Sastre, 2004). En la tabla 4.15 se describen las ventajas y desventajas de los separadores CPI.

Tabla 4.15 Ventajas y desventajas separadores CPI

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none">• No contiene partes móviles• Poco mantenimiento.• Opera por gravedad.• Gracias a sus placas coalescentes, permite tiempos de retención cortos (de 3 a 10 minutos).• Gotas de aceite removidas de 20 hasta 50 micras.• El equipo puede ser de tipo cerrado, para evitar la emisión de compuestos orgánicos volátiles a la atmósfera.	<ul style="list-style-type: none">• La eficiencia depende de las propiedades de ciertos materiales (paquete de placas).• Los influentes con contenido de Grasas y Aceites altamente viscosos y/o gran cantidad de sólidos puede provocar obstrucciones en las placas.• La distribución hidráulica del influente debe ser alimentada con una dirección transversal para utilizar la totalidad el paquete coalescente.• Posible daño de placas por agentes externos como solventes.• Variaciones significativas en las cargas pueden afectar su eficiencia.



Centrífugas

En la centrifugación, se aprovechan los mismos principios que en la separación estática (diferencia de densidades y de peso específico), sólo que en ésta, la separación ocurre a una velocidad mucho mayor, mediante fuerzas centrífugas.

En una centrífuga (figura 4.4), el agua y los lodos pesados que estén presentes, salen por la boquilla o toberas, ya que es el radio por el que debe salir el líquido más denso; y el aceite y lodos livianos se concentran en el centro y son descargados por un tubo recolector llamado "recuperador", la salida de este tubo es el radio de la superficie de líquido en contacto con el aire del interior del recipiente (Forero et al, 2007).



Figura 4. 4 Centrífuga de separación agua-aceite

Las centrífugas tienen la capacidad de remover gotas de aceite de diámetros de entre 3 y 7 micras, sin embargo, este método de separación no es competitivo con otras tecnologías cuando las gotas poseen un diámetro menor a 20 micras, debido a los altos costos de mantenimiento y energía. Las ventajas y desventajas de las centrífugas se describen en la tabla 4.16.



Tabla 4.16 Ventajas y desventajas de las centrífugas

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none">• Remueve gotas de aceite de hasta 3 micras• Ocupa espacio relativamente reducido• Separa influentes de concentración de aceite de 500- 3,000 mg/L.• Evita la emisión de Compuestos Orgánicos Volátiles (equipo cerrado a la atmósfera).• Puede remover aceites emulsificados	<ul style="list-style-type: none">• Poco tolerante a cambios de flujo y de la carga contaminante.• Requiere altos costos por la energía consumida• Altos costos de mantenimiento

Separadores hidrociclónicos

Los hidrociclones líquido/líquido (la figura 4.5) para separación de Grasas y Aceites, separan líquidos con diferentes densidades, la fuerza impulsora con la que trabajan es generalmente la presión del proceso, sin embargo, esta presión debe ser de al menos 35 psi para lograr la separación. Las fuerzas centrífugas acentúan la diferencia en la gravedad específica entre el agua y el aceite, lo cual permite la remoción del aceite en un espacio muy reducido.

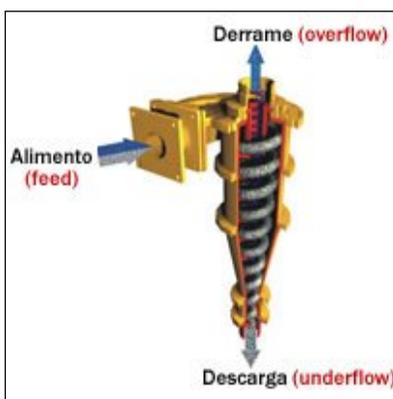


Figura 4.5 Hidrociclón para separar de mezclas líquido/líquido



En el proceso que se lleva a cabo en el hidrociclón, el agua con aceite entra a la línea a través de la toma hasta la cámara involuta y el flujo es dirigido a lo largo de la pared del revestimiento, forzado a descender por el revestimiento, el fluido acelera en la cámara cuya sección se va reduciendo y se van generando las fuerzas necesarias para separar las gotas de aceite.

Las fuerzas centrífugas que actúan sobre la fase más pesada, el agua, le obligan a migrar hacia la pared de la sección.

La fase más liviana, el aceite, es desplazada como resultado de esta acción y se forma un núcleo central de baja presión que se elimina vía el rechazo. El vórtice exterior limpio sale en el flujo inferior.

Los separadores de tipo hidrociclón, presentan alta eficiencia en la remoción de gotas de aceite de hasta 10 micras.

A pesar de la eficiencia que presentan los hidrociclones, éstos no son comúnmente utilizados en las refinerías ni en plantas petroquímicas, debido a que las altas presiones de alimentación que se requieren, más allá de hacer eficiente el proceso, pueden ocasionar que las partículas de aceite se rompan, formando emulsiones que los hidrociclones no son capaces de separar (Schultz, 2006). En la tabla 4.17 se presentan las ventajas y las desventajas de los separadores de aceite hidrociclónicos.



Tabla 4. 17 Ventajas de los separadores hidrociclónicos.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none">• Remueve gotas de aceite de hasta 10 micras.• Ocupa poco espacio.• Separa influentes de concentración de aceite de 500- 10,000 mg/L.• Evita la emisión de Compuestos Orgánicos Volátiles (equipo cerrado a la atmosfera).	<ul style="list-style-type: none">• Poco tolerante a cambios de flujo y de la carga contaminante.• No separa aceites emulsificados.• Requiere presión de alimentación >35 psi.• Las altas presiones en el hidrociclón pueden formar emulsiones.• Elevados consumos de energía

Segunda etapa de remoción de Grasas y Aceites

Esta etapa afina el tratamiento primario, de forma tal que se utiliza después de los separadores tipo API, CPI, hidrociclones, o centrífugas, y en ocasiones se realizan en conjunto con un sistema de floculación-coagulación.

Sistema de flotación por aire disuelto (DAF)

La flotación por aire disuelto es utilizada principalmente para separar sólidos disueltos coloidales y suspendidos, disminuyendo su densidad aparente, no obstante, con este sistema es posible separar aceites emulsionados de una manera muy eficiente. El sistema de flotación cuenta con 4 componentes principales: bomba presurizadora, tanque de retención, cámara de flotación y tanque de aire.

En este sistema, el aire se disuelve en el agua residual bajo una presión de varias atmósferas, y a continuación se procede a la liberación de la presión hasta el nivel atmosférico. En las instalaciones de pequeño tamaño, la totalidad del caudal a tratar puede ser presurizado mediante una bomba a 275-350 kPa añadiendo el aire comprimido en la aspiración de la bomba. El caudal se mantiene en un tanque de retención bajo presión durante varios



minutos para dar tiempo al aire a que se disuelva. Se deja pasar, a través de una válvula reductora de presión, al tanque de flotación, donde el aire deja de estar en disolución y se desprende en forma de burbujas diminutas por todo el volumen del líquido. En la figura 4.6 se ilustra un sistema de flotación por aire disuelto.

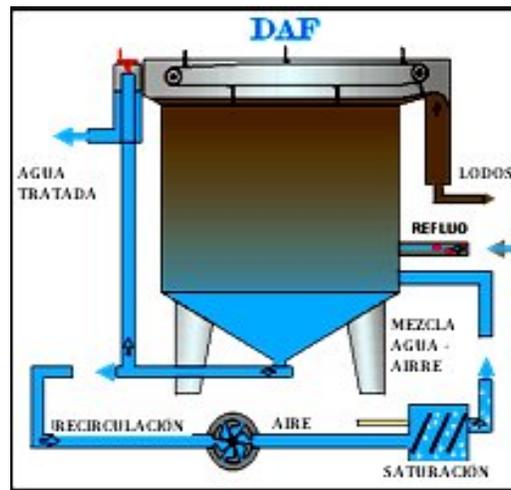


Figura 4. 6 Sistema de flotación por aire disuelto (DAF)

En las instalaciones de mayor tamaño, parte del efluente se recircula (15 a 20%), se presuriza y se semisatura con aire. El caudal recirculado se mezcla con la corriente principal sin presurizar justamente antes de la entrada al tanque de flotación, dando como resultado que el aire abandone la solución y entre en contacto con partículas sólidas a la entrada del tanque. Se han utilizado diversas instalaciones de flotación a presión para el tratamiento de residuos industriales y para la concentración de lodos (Wang, 2006). En la tabla 4.18 se describen las ventajas y desventajas de los equipos DAF.



Tabla 4. 18 Ventajas y desventajas del DAF

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiencia (incluyendo cinética) en la remoción de sólidos. • Incrementa la remoción de DBO₅ (asociada a los hidrocarburos removidos) • Alta tasa de separación (o flujo superficial). Existen unidades modernas con capacidad hasta de 40 m/h (m³/m²/h). Aplicación en efluentes voluminosos. • Remoción de microorganismos y precipitados, difíciles de sedimentar y filtrar. • El proceso permite la formación de una gran cantidad de burbujas de pequeño tamaño, lo que incrementa la eficiencia de remoción respecto a otras tecnologías. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es sensible a variaciones de temperatura, concentración de sólidos, cargas hidráulicas y a variaciones en las características químicas y físico químicas de las grasas, aceites, y los sólidos en suspensión. • Costos operacionales elevados, principalmente cuando existe necesidad de un riguroso control automático, de parámetros y dosis de reactivos. • Requiere personal operativo capacitado. • Área requerida para instalación. • Equipo abierto a la atmósfera, puede generar emisiones de COV's.

Sistema de flotación por gas inducido (IGF)

La separación mediante flotación por gas inducido, se lleva a cabo al inducir burbujas del gas dentro de una corriente líquida químicamente tratada. Los productos químicos adicionados forman flóculos con los contaminantes que luego, por efecto de las burbujas del gas que se adhieren a los mismos, son llevados hasta la superficie en donde son eliminados del sistema mediante barrido mecánico.

El separador tipo IGF es una unidad de flotación por auto inducción mecánica de gas. Generalmente tienen una capacidad de recepción de agua con concentración de Grasas y Aceites menor de 300 mg/L, para obtener un efluente con concentración entre 20-75 mg/L. En la figura 4.7 se ilustra un sistema de flotación por gas inducido.



Figura 4. 7 Sistema de flotación por gas inducido (IGF)

Este sistema de flotación, utiliza celdas de flotación en serie lo que maximiza el contacto entre el líquido y el gas. Las celdas son ajustables individualmente de manera tal de lograr la máxima eficiencia de separación y optimizar la introducción del gas para las diferentes condiciones de trabajo.

En este proceso, se introduce un gas, generalmente aire, mediante compresión o aspiración, de donde un agitador mecánico produce un íntimo contacto del gas con la corriente líquida produciendo la dispersión del gas. Las burbujas producidas arrastran a los contaminantes hasta la superficie en donde un sistema de barrido los remueve inmediatamente a fin de evitar una redispersión de los contaminantes en el líquido. En la tabla 4.19 se presentan las ventajas y las desventajas de los separadores de aceite de flotación por gas inducido.



Tabla 4.19 Ventajas y desventajas del sistema de flotación por aire inducido

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none">• Diseño compacto, requiere poca área para instalación.• Alta eficiencia de remoción• Mínima caída de presión de entrada y salida de las burbujas.• No tiene impactos por cambios de temperatura o del tipo de gas usado.• Equipo cerrado que minimiza la emisión de COV's al ambiente.	<ul style="list-style-type: none">• No están diseñados para remover Sólidos Suspendidos Totales• Altos costos de operación• No es viable para remover gotas de menores de 25 micras.• Requiere bombeo.• Poco tolerante a los cambios de carga.• Requiere sistema de automatización.• Requiere personal operativo capacitado.

En la tabla 4.20, se presenta un comparativo con las características principales de las opciones tecnológicas aplicables a la etapa del tratamiento primario de la planta de tratamiento de efluentes del complejo.

Tabla 4.20 Cuadro comparativo de tecnologías de remoción de Grasas y Aceites

EQUIPO/PRODUCTO	SEPARADORES API	SEPARADORES CPI	HIDROCICLÓN	CENTRÍFUGA	DAF	IGF
Concentración de influente aceitoso (mg/L)	500-20000	500-10000	500-5000	500-3000	<500	<300
Concentración de efluente aceitoso (mg/L)	100-300	100-300	100-300	200-400	10-30	20-75
Gotas de aceite removidas (µm)	150	20-50	10	>20	<5	<5
Aplicación	Separador primario agua/aceite	Separador primario agua/aceite	Separador primario agua/aceite	Separador primario agua/aceite	Separador secundario agua/aceite	Separador secundario agua/aceite
Capacidad para procesar SST	SST en influentes mayores a 20000 mg/L	SST en influentes <100 mg/L	Se requiere un hidrociclón separado para remover SST	SST en influentes mayores a 500 mg/L	95% de SST removidos para influentes con SST mayores a 1000 mg/L	No diseñado para remover SST
Sensibilidad a variaciones de flujo y carga	Tolerantes	Menos tolerantes	poco tolerantes	Poco tolerantes	Poco tolerantes	Menos tolerantes
Sensibilidad a variaciones de temperatura, concentración y características de los SST	Tolerantes	Menos tolerantes	Menos tolerantes	Poco tolerantes	Poco tolerantes	No tiene impactos
Emisión de COV's	Alta: tanques grandes abiertos a la atmósfera	Media: tanques pequeños, pueden ser cerrados	Nula. (equipo cerrado a la atmósfera)	Nula.(equipo cerrado a la atmósfera)	Media: tanques medios, abiertos a la atmósfera	Baja o Nula. (equipo cerrado a la atmósfera)
Requerimiento de espacio	Ocupa grandes extensiones de espacio	Ocupa poco espacio	Ocupa el mínimo espacio	Ocupa poco espacio	Mediana ocupación de espacio	Diseño compacto
Notas Especiales	Para caudales mayores. Tiempo de residencia del líquido alto. Se requiere obra civil considerable	Paquetes de placas propensos a taponamientos en condiciones de altas concentraciones de SST.	Requiere alimentación presurizada >35 psi. Se necesita control e instrumentación.	Requiere altos niveles de energía, debido a que la alimentación debe ser presurizada. Se necesita control e	El volumen de lodos y de flotación es 0.1-0.5% del flujo. En algunas aplicaciones, pueden procesar	El volumen de flotación es del 1% al 10 % del flujo de avance.

EQUIPO/PRODUCTO	SEPARADORES API	SEPARADORES CPI	HIDROCICLÓN	CENTRÍFUGA	DAF	IGF
		Posible daño de placas por agentes externos como solventes.	No separa Grasas y Aceites emulsificadas.	instrumentación. A pesar de que existe la posibilidad de separar gotas dentro del rango de 3 a 7 micras, esto es poco factible debido al gran incremento de los costos de operación y mantenimiento.	concentraciones de influente aceitoso mayores a 1000 mg/L.	



La evaluación de las tecnologías se llevó a cabo de acuerdo a los criterios descritos en la tabla 4.20, para realizar esta evaluación se llevó a cabo una ponderación, en la cual, los parámetros que se consideraron más importantes recibieron un mayor valor, en este caso, la capacidad para remover Grasas y Aceites que se nombra en la tabla como concentración a la salida, tiene un mayor peso en la evaluación, debido a que se consideró que el principal objetivo de estos equipos es remover las grasas y aceites, y por lo tanto debería ser de importancia en la evaluación, de esta forma se le asignó un valor de 30%. A continuación se consideró la capacidad para procesar SST. La eliminación de los SST no es el objetivo de estos equipos, no obstante, es necesario que posean cierta capacidad para procesarlos y que no existan atascamientos, por lo tanto, se le asignó un valor de 15% a esta característica. En el mismo nivel de importancia se consideraron la concentración de aceite máxima aceptable a la entrada de los equipos, el tamaño de gota de aceite removida y la emisión de COV's a la atmósfera, ya que son características que se deben tomar en cuenta, pero que no representan una diferencia significativa para diferenciar a un equipo de otro. Por último se evaluó el espacio que ocupan estos equipos, a este rubro se le asignó un valor de 5%, ya que puede influir en la toma de decisión al adquirir un equipo, pero no es significativo en cuanto al desempeño ni en cuanto a la consecución del objetivo principal que es retirar las grasas y aceites del efluente. Las calificaciones asignadas van de 0 a 10, en donde 0 es muy malo y 10 es excelente. En las tablas 4.21 y 4.22 se presentan los resultados de dicha evaluación.



Tabla 4.21 Evaluación de las tecnologías de remoción de aceite

PONDERACIÓN	CRITERIO	HIDROCICLÓN	API	CPI	CENTRÍFUGA	DAF	IGF
10%	Co de aceite a la entrada	8	10	9	8	6	5
30%	Co de aceite a la salida	7	6	7	6	10	9
10%	Tamaño de gota removida	8	5	8	8	10	10
15%	Capacidad para procesar SST	4	9	7	6	9	3
10%	Emisión de COV's	10	4	8	10	8	10
5%	Espacio	9	6	8	8	7	8
20%	Costos generales	6	10	9	5	5	5

Tabla 4.22 Resultado de la evaluación de las tecnologías de remoción de aceite

CRITERIO	HIDROCICLÓN	API	CPI	CENTRÍFUGA	DAF	IGF
Co de aceite a la entrada	0.8	1	0.9	0.8	0.6	0.5
Co de aceite a la salida	2.1	1.8	2.1	1.8	3	2.7
Tamaño de gota removida	0.8	0.5	0.8	0.8	1	1
Capacidad para procesar SST	0.6	1.35	1.05	0.9	1.35	0.45
Emisión de COV's	1	0.4	0.8	1	0.8	1
Espacio	0.45	0.3	0.4	0.4	0.35	0.4
Costos generales	1.2	2	1.8	1	1	1
Total	6.95	7.35	7.85	6.7	8.1	7.05

De acuerdo a la tabla 4.22 se puede concluir que la tecnología que presenta las mejores cualidades para la etapa de tratamiento



primario es la flotación por aire disuelto, esto resulta fácil de explicar, si se toma en cuenta que el objetivo de esta fase del tratamiento es la remoción de Grasas y Aceites, los equipos DAF, son los que presentan mayor capacidad de remoción, según se constata en la tabla 4.21, no obstante, esta tecnología constituye una segunda etapa de remoción de Grasas y Aceites, y como tal, requiere que el influente posea cierta calidad, por lo tanto, es necesaria una primera etapa de remoción de Grasas y Aceites, en este contexto, la tecnología para esta etapa que obtuvo la mejor evaluación fue la de separación de Grasas y Aceites por medio de placas corrugadas, ya que es un equipo que presenta buena flexibilidad a cambios en el proceso, y también logra una buena remoción de Grasas y Aceites, además es un equipo cerrado, lo que disminuye la emisión de COV's.



4.2.2 Tratamiento secundario

Lodos activados (convencional)

El sistema de lodos activados es un sistema de tratamiento biológico en el cual se mantiene una alta concentración de biomasa en el reactor para lograr la remoción de materia orgánica soluble y otros contaminantes presentes en el agua residual, por acción de bacterias en suspensión y con suministro de aire para llevar a cabo la degradación de los compuestos presentes. El sistema consta de 2 etapas básicas:

- Biorreactor aerado. Donde la biomasa natural (lodos activados) degrada/metaboliza los componentes orgánicos; se forman flóculos.
- Sedimentador. Donde los flóculos (lodos) son separados del líquido clarificado y parcialmente recirculados al reactor.

La existencia de recirculación de biomasa, implica mantener una población microbiana más alta en el reactor, alcanzando mayores tasas de conversión para un volumen y tiempo de residencia dado (Zaror, 2000)

El ambiente aerobio en el reactor se consigue mediante el uso de difusores o aeradores mecánicos que, a su vez, sirven para mantener el líquido mezcla (contenido del reactor) en un régimen de mezcla completa. (Metcalf and Eddy, 1994).

El esquema de operación de un sistema convencional de lodos activados se muestra en la figura 4.8.

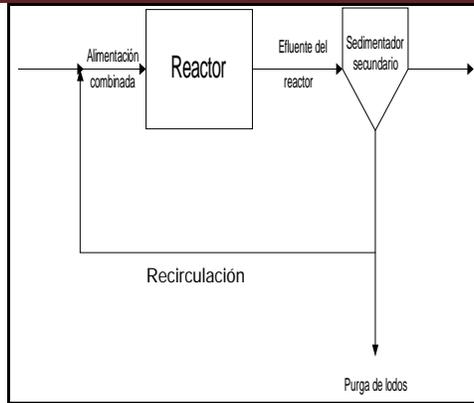


Figura 4. 8 Diagrama de flujo de proceso de lodos activados (convencional)

Tabla 4.23 Ventajas y desventajas del sistema de lodos activados convencional

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiencia de remoción de contaminantes orgánicos disueltos en el agua residual. • Baja generación de malos olores. • Existe cuantiosa información disponible y de libre acceso, del proceso, su diseño y operación. • Las variables de operación son conocidas y controlables. • Tecnología altamente probada a nivel mundial. 	<ul style="list-style-type: none"> • La presencia de compuestos tóxicos, concentración de sales, etc. en el agua residual, pueden inhibir la actividad de los microorganismos. • El espacio destinado a la construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales. • Alto consumo energético para cubrir requerimientos de aeración y recirculación de lodos. • Se requiere estabilizar los lodos purgados antes de disposición.

Lodos activados (aeración extendida)

El proceso de aeración extendida es una variación del proceso de lodos activados convencional, en donde el tiempo de retención hidráulico, así como el tiempo de retención celular requerido es mucho mayor.



Este periodo de aeración permite que la carga orgánica de las aguas residuales se remueva de manera más eficiente, lo cual producirá una menor cantidad de lodos comparada con los sistemas de lodos activados convencionales, siendo ésta su principal característica y beneficio.

El esquema de este proceso es equivalente al sistema de lodos activados convencional mostrado en la figura 4.8, con la excepción de que en este sistema no se requiere un sedimentador primario, debido principalmente al alto tiempo de retención hidráulico, mientras que el proceso convencional suele requerirlo. En la figura 4.9 se ilustra un sistema de lodos activados con aeración extendida.



Figura 4.9 Sistema de lodos activados con aeración extendida

En este proceso se remueve principalmente la materia orgánica disuelta en el agua cruda de entrada disminuyendo considerablemente la DBO_5 . Se aplica principalmente para el tratamiento de aguas residuales con cargas orgánicas bajas ($DBO_5 \leq 200 \text{ mg/L}$) las cuales corresponden a pequeñas comunidades, urbanizaciones y áreas de recreo. Asimismo, se emplea para el tratamiento de agua residual con contaminantes orgánicos difíciles de remover. Los porcentajes de remoción de otros contaminantes como



fósforo, nitrógeno orgánico y amoniacal, DQO y sólidos suspendidos son similares a los obtenidos mediante el sistema de lodos activados convencional.

El uso de este proceso disminuye problemas de tratamiento y disposición de lodos, debido a que el lodo se digiere de manera aerobia dentro del mismo sistema, sin embargo, puede ser necesario considerar un sistema de tratamiento y disposición del exceso de sólidos. Debido en parte a esta característica, se tienen altos consumos de energía para realizar una correcta aeración del sistema.

Si se diseñan y manejan adecuadamente no presentan problemas de olores y de esa forma pueden instalarse dentro de zonas pobladas.

Se deben controlar algunas condiciones de operación, poniendo especial atención en mantener los niveles de oxígeno disuelto en el tanque de aeración (1-2 mg/L). Además resultará necesario regular la recirculación y purga de los lodos. En la tabla 4.24 se presentan las ventajas y desventajas del sistema de lodos activados de aeración extendida.

Tabla 4.24 Ventajas y desventajas del sistema de lodos activados (aeración extendida).

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none">• Obtención de un efluente de alta calidad.• Su diseño y operación son relativamente fáciles de realizar.• Baja generación de lodos.• Obtención de lodos relativamente estabilizados, que facilita su disposición.• Soporta de manera más efectiva variaciones en cargas y flujos que un sistema convencional.• Permite una mejor degradación y remoción de compuestos recalcitrantes.	<ul style="list-style-type: none">• Elevados consumos de energía para realizar la aeración.• Son necesarios tanques relativamente grandes y por tanto también áreas para instalación grandes.• La calidad puede verse afectada por un incremento en los sólidos en el influente.



Reactor secuencial por lotes (SBR)

Este nombre se le da a un sistema de tratamiento de aguas residuales basado en el principio de lodos activados, pero operado en un ciclo de cinco fases. La diferencia más importante entre un SBR y un sistema convencional de lodos activados es que en el SBR, tanto la reacción como la sedimentación se llevan a cabo en el mismo reactor. Las 5 fases que se llevan a cabo en un SBR son (figura 4.10):

1. Llenado o alimentación. El agua residual es introducida en el reactor y se mezcla con la biomasa presente en el tanque.
2. Reacción. Se lleva a cabo, bajo condiciones controladas, una reacción anaerobia, anóxica o aerobia, dependiendo del tipo de tratamiento aplicado.
3. Sedimentación. Se detienen el mezclado y la aeración, de esta forma se permite que la biomasa sea separada de, líquido, resultando un efluente clarificado.
4. Decantación. El efluente es removido del tanque, sin necesidad de una etapa adicional de clarificación.
5. Purgado: Esta etapa se realiza entre ciclos y no siempre es efectuada, además, puede haber pérdida de lodos al ser llevada a cabo.

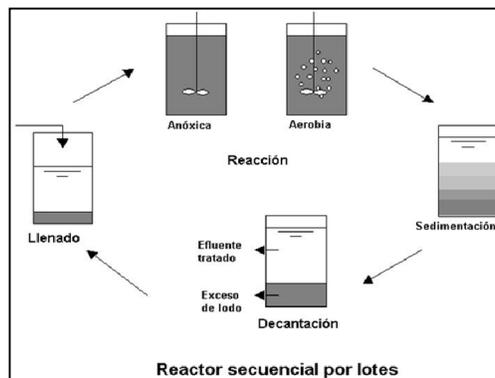


Figura 4.10 Fases en un reactor secuencial por lotes (SBR).



Las condiciones aplicadas durante las fases de llenado y de reacción, deben ser ajustadas de acuerdo a los objetivos del tratamiento (remoción de materia orgánica, fósforo o nitrógeno).

Este tratamiento genera un efluente de buena calidad, con la ventaja de que existen menos pérdidas de lodos y no es necesario un clarificador a la salida del reactor (Vives, 2005). En la tabla 4.25 se describen las ventajas y desventajas de los sistemas SBR.

Tabla 4.25 Ventajas y desventajas de sistemas SBR.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Bajo requerimiento de espacio debido a que sólo se requiere un tanque para realizar el proceso. • Permite eliminación de nutrientes. Los sistemas SBR pueden ser utilizados para realizar un proceso completo de nitrificación-desnitrificación, así como para la eliminación de fósforo. Estos dos parámetros son los que suelen dar más problemas cuando se trabaja con tecnologías convencionales. • Menor tiempo de control requerido. • Gran flexibilidad de operación en función de la duración de los ciclos. • Fácil reconocimiento y corrección de los problemas de decantación. • No requiere recirculación de lodos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere un sistema de control y de instrumentación para que la operación y el manejo del sistema sean adecuados. • Se requieren equipos en paralelo para permitir la flexibilidad del sistema. • Posee altos costos de operación.



Reactores biológicos de biomembrana (MBR)

Los reactores biológicos de membrana (MBR por sus siglas en inglés de Membrane Biological Reactor), combinan la tecnología de separación con membrana con un tratamiento biológico para aplicaciones en las aguas residuales municipales y de la industria. Consiste en un reactor biológico (biorreactor) con biomasa suspendida y separación de sólidos por medio de membranas de microfiltración o ultrafiltración las cuales presentan un tamaño de poros nominal de 0.1 a 0.4 μm , como una sola unidad de proceso. Los MBR pueden ser utilizados en reactores biológicos de crecimiento suspendidos aerobio o anaerobio para separar el agua residual tratada de la biomasa activa. En la figura 4.11 se esquematiza un reactor biológico de membrana.

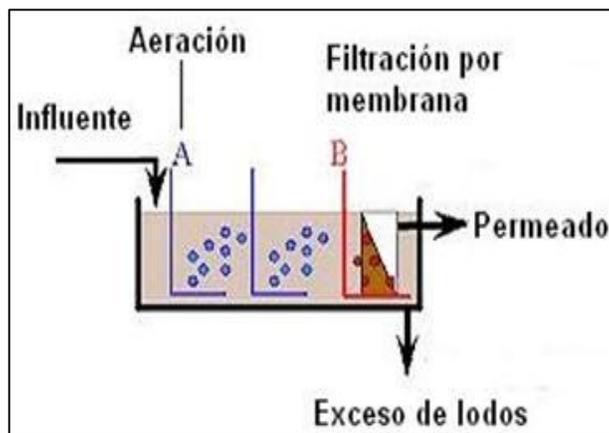


Figura 4. 11 Reactor biológico de membrana (MBR)

Este sistema produce un efluente de calidad igual a la combinación de una clarificación secundaria y un efluente de microfiltración. El sistema reemplaza el tratamiento convencional y combina la clarificación, la aeración y la filtración en un proceso simple y que reduce los costos de capital y de operación. El resultado es un



efluente de alta calidad disponible para cualquier aplicación de descarga o de reuso municipal o industrial (Metcalf and Eddy, 2003). En la tabla 4.26 se detallan las ventajas y las desventajas de los sistemas MBR.

Tabla 4.26 Ventajas y desventajas de los sistemas MBR

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none">• Se elimina el decantador secundario, debido a que el agua tratada se descarga a través de las membranas• Existe un aumento de los sólidos en el reactor, lo que significa disminución en el espacio requerido.• Reducción de lodos en exceso.• Flexibilidad de ajuste de etapas anóxicas y anaerobias.• El proceso aerobio produce mínimos olores• Reduce o elimina la necesidad de desinfección• Limpieza in-situ simplifica el mantenimiento del sistema	<ul style="list-style-type: none">• La principal desventaja radica en que es una tecnología con altos costos de inversión.• Requiere personal capacitado.• Costos de operación elevados.• Un mantenimiento y operación inadecuados, puede dar lugar a taponamientos de las membranas.• Requiere un sistema de control e instrumentación, lo cual significa mayores costos.

Reactores de biopelícula empacada

Este tipo de procesos, suele ser descrito como "proceso de lodos activados con biopelícula fija integrada". Estos procesos van dirigidos a mejorar el proceso de lodos activados, pues proporcionan una gran concentración de biomasa en el tanque de aeración, lo cual permite una disminución en el tamaño requerido del reactor o bien el tratamiento a mayores cargas. En la figura 4.12 se esquematiza un reactor MBBR.

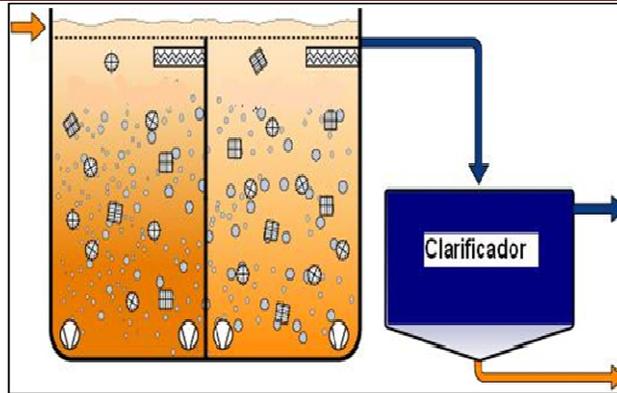


Figura 4. 12 Reactor de biopelícula empacada

También conocidos como reactores de biopelícula en lecho móvil (MBBR, por sus siglas en inglés de Moving-Bed Biofilm Reactor), fueron desarrollados en Noruega desde finales de los 80's y principios de los 90's (Odergaard et al., 1994). Estos reactores se emplean tanto para remoción de material carbonoso como de nitrógeno (Pastorelli et al., 1997; Rusten et al., 2006).

Actualmente, existen varios ejemplos de procesos de este tipo, los cuales suelen diferir principalmente del tipo de material de empaque empleado y del diseño de etapas del sistema. Por ejemplo, algunos procesos utilizan empaques de espuma de poliuretano con densidades de 0.95 g/cm^3 aproximadamente, los cuales son colocados en el biorreactor en flotación libre y retenidos por mallas en el efluente. El volumen que ocupan dichos empaques puede ser del 20 al 50% del volumen total del reactor. El mezclado por medio de difusores permite la circulación de los empaques de espuma en el sistema pero sin métodos adicionales de mezclado se puede tender a la acumulación de empaques en la descarga del efluente del tanque de aeración o a la flotación de estos empaques en la superficie. La rejilla en el efluente es limpiada continuamente con aire y se bombean los empaques a la descarga del influente al reactor. Los sólidos son removidos en un sedimentador secundario convencional y la purga de



lodos se realiza desde la línea de retorno de lodos (Islas, 2007). En la tabla 4.27 se presentan las ventajas y desventajas de los reactores de biopelícula empacada

Tabla 4.27 Ventajas y desventajas de los reactores de biopelícula empacada.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none">• Evita la recirculación de lodos (excepto con etapa anóxica).• La alta concentración de biomasa en el material de soporte permite volúmenes de equipo menores que lodos activados convencionales.• Incremento de la capacidad y de la calidad del efluente.• Remoción eficiente de nutrientes.• Mejora del IVL (índice volumétrico de lodos), logrando una mayor reducción de sólidos y carga en el clarificador final.• Producción baja de lodos• Remoción intensiva del DBO, SST y Amoniac	<ul style="list-style-type: none">• Costo alto de relleno.• Ausencia de control sobre la purga de los lodos.• La limpieza de los difusores suele requerir un vaciado total de los tanques junto con los soportes.

La tabla 4.28 presenta una comparación de las tecnologías de tratamiento secundario disponibles para el complejo.

Tabla 4. 28 Cuadro comparativos de las tecnologías disponibles de tratamiento biológico.

CARACTERÍSTICAS	LODOS ACTIVADOS CONVENCIONAL	AEREAION EXTENDIDA	SBR	MBR	MBBR
Clarificador	Si	Si	No	No	Si
SSLM	1,500-4,000 mg/L	2,000-5,000 mg/L	2,000-10,000 mg/L	5,000 a 20,000 mg/L	5,000-9,000 mg/L
SRT	3-15 días	20-40 días	10-40 días	10–100 días	No aplica
Carga orgánica (DBO)	0.3-1.6 kg/m ³ d	0.3-0.6 kg/m ³ d	1-2.5 Kg/m ³ d	1.2 a 5 kg/m ³ d	1.5-4 kg/m ³ d
Oxígeno Disuelto	2 mg/L	2 mg/L	3 mg/L en fase aerobia	0.5 – 1.0 mg/L	5-8 mg/L
Área requerida	Determinada por flujo a tratar, cinética microbiana, y diseño mismo	Mayor que un sistema convencional	Típicamente menor que un sistema convencional	Típicamente 4-5 veces más pequeño que un sistema convencional	Típicamente menor que un sistema convencional
Estabilidad del proceso	Susceptible a abultamiento de lodos	Susceptible a abultamiento de lodos	Poco susceptible a abultamiento de lodos	No susceptible a abultamiento de lodos	Poco susceptible a abultamiento de lodos
Recirculación de lodos	Si	Si	No	No	Si
Remoción de nutrientes	Poca	Poca	Alta	Alta	Alta
Adaptabilidad al tratamiento de aguas industriales	Baja	Media	Alta	Alta	Alta
Consumo de energías	Media	Alto	Bajo	Alto	Alto
Costos	Bajo	Medio	Bajo	Alto	Medio



La evaluación de las tecnologías se realizó de forma numérica, con base en los criterios descritos en la tabla 4.28, de acuerdo a una ponderación realizada con base en la importancia relativa de los principales criterios tomados en cuenta en la tabla 4.28. En primer lugar se consideró el oxígeno disuelto en el proceso, debido a que este factor impacta directamente en la oxidación de materia orgánica, que es el contaminante que se busca remover en esta etapa, en este contexto, se le asignó un valor de 20% en la escala de ponderación. La remoción de nutrientes no es el objetivo primordial que se persigue en esta etapa, sin embargo, el efluente puede contener nitrógeno o algún otro nutriente, por lo cual se consideró este aspecto, asignándole un valor de 10%. La adaptabilidad al tratamiento de aguas industriales es un aspecto que se debe tomar en cuenta, ya que en el caso del tratamiento de aguas, no todos los procesos son factibles de utilizar a escala industrial, por esta razón, se le asignó un valor de 20%, el consumo de energía es un factor que puede ser definitivo al inclinarse por una u otra tecnología, por esta razón, se le asignó un valor de 20% a este aspecto. A la estabilidad del proceso se le asignó un valor de 10%, ya que se debe tomar en cuenta que ante cambios en el proceso, no existan grandes consecuencias, o grandes variaciones en el desempeño de la tecnología, por esta razón se tomó en cuenta este aspecto y se le asignó un valor de 10%. Finalmente, se tomaron en cuenta los costos generales, los cuales se refieren a los costos de operación principalmente.

Las puntuaciones en la evaluación van del 0 al 10, en donde 0 es muy malo y 10 es excelente, la evaluación se presenta en las siguientes tablas.



Tabla 4.29 Evaluación de tecnologías en función de los criterios seleccionados

PONDERACIÓN	CRITERIO	LODOS ACTIVADOS CONVENCIONAL	AERACIÓN EXTENDIDA	SBR	MBR	MBBR
20%	Oxígeno disuelto	7	8	8	9	9
10%	Remoción de nutrientes	6	8	9	9	10
20%	Adaptabilidad al tratamiento de aguas industriales	6	8	9	9	9
20%	Consumo de energía	9	7	8	5	5
10%	Estabilidad del proceso	7	7	8	10	7
20%	Costos generales	8	7	8	5	6

El resultado de esta evaluación, tomando en cuenta la ponderación establecida, se presenta a continuación.



Tabla 4.30 Resultado de la evaluación de las tecnologías para la etapa de tratamiento biológico

CRITERIO	LODOS ACTIVADOS CONVENCIONAL	AERACIÓN EXTENDIDA	SBR	MBR	MBBR
Oxígeno disuelto	1.4	1.6	1.6	1.8	1.8
Remoción de nutrientes	0.6	0.8	0.9	0.9	1
Adaptabilidad al tratamiento de aguas industriales	1.2	1.6	1.8	1.8	1.8
Consumo de energía	1.8	1.4	1.6	1	1
Estabilidad del proceso	0.7	0.7	0.8	1	0.7
Costos generales	1.6	1.4	1.6	1	1.2
Total	7.3	7.5	8.3	7.5	7.5

En la tabla 4.30 se puede observar que la tecnología de tratamiento biológico que presenta una mejor evaluación en cuanto a los criterios seleccionados es el reactor secuencial por lotes, también se tomarán en cuenta el reactor de biomembrana y el sistema de lodos activados con aeración extendida para generar tres propuestas a evaluarse económicamente, con el objetivo de encontrar la opción más viable de implementarse en el complejo petroquímico en estudio.



Capítulo V. Resultados y discusión. Planteamiento de la mejor opción de modernización para la planta de tratamiento de aguas residuales del Complejo Petroquímico.

5.1 Definición de las mejores opciones a nivel técnico

5.1.1 Planteamiento de las alternativas elegidas de acuerdo a la evaluación técnica

En esta sección se presentarán las 3 opciones elegidas para modernizar la planta de efluentes del complejo en estudio, y se evaluaron económicamente con el fin de elegir la alternativa más viable. La elaboración de estas 3 propuestas se llevó a cabo con base en la evaluación técnica elaborada en la sección anterior, tomando para la propuesta número 1 las mejores alternativas tecnológicas, en las otras dos propuestas se tomaron alternativas que podrían también representar beneficios al Complejo.

Propuesta 1

- Sustitución de los equipos CPI, instalación de dos nuevos CPI's.
- Implementación de una segunda etapa de remoción de Grasas y Aceites al instalar un equipo de flotación por aire disuelto.
- Sustitución de la laguna de oxidación por un reactor secuencial discontinuo.

Propuesta 2

- Sustitución de los equipos CPI, instalación de 2 nuevos CPI's.



- Implementación de una segunda etapa de remoción de Grasas y Aceites al instalar un equipo de flotación por gas inducido.
- Sustitución de la laguna de oxidación por un reactor biológico de biomembrana.

Propuesta 3

- Sustitución de los equipos CPI, instalación de 2 nuevos CPI's.
- Implementación de una segunda etapa de remoción de Grasas y Aceites al instalar un equipo de flotación por aire disuelto.
- Instalación de aeradores faltantes y rehabilitación del proceso lagunar actual, incluyendo la instalación de la instrumentación requerida.



5.1.2 Análisis de las propuestas planteadas

Análisis de la propuesta 1 (P1)

- La instalación de los dos CPI's significaría implementar equipos equivalentes pero con tecnología moderna, con todos los sistemas nuevos y operando, incluyendo sistemas auxiliares e instrumentos.
- La eficiencia de remoción podría ser equivalente o mayor, debido a los avances en configuración del equipo, operación, materiales y tipos de placas empleados actualmente.
- Con base en los datos de concentración de Grasas y Aceites en el influente y en datos de remociones típicas de este tipo de equipos (85-95%), se esperaría la obtención de un efluente con contenidos de Grasas y Aceites entre 25-125 mg/L.
- El tratamiento del efluente no requeriría grandes presiones de bombeo.
- La instalación de un equipo de flotación por aire disuelto permitiría la remoción de Grasas y Aceites emulsionados.
- Sería necesario que la concentración de Grasas y Aceites en el influente no excediera 500 mg/L.
- El equipo DAF evitaría el paso de Grasas y Aceites a concentraciones que puedan afectar el tratamiento secundario o biológico (por encima de los 50 mg/L), tal y como llega a suceder actualmente.
- Con base en los contenidos actuales de grasas del influente, la remoción de las mismas en una etapa primaria, y la eficiencia de estos equipos para remoción de Grasas y Aceites emulsionadas (90-95%, con el apoyo de químicos), se esperaría la obtención de



un efluente final de tratamiento primario con contenidos no mayores a 15 mg/L, e incluso menores a 5 mg/L.

- Los contenidos prácticamente nulos de Grasas y Aceites en el efluente final de tratamiento global, permitirían incrementar la factibilidad de un futuro reuso del agua tratada obtenida en el área de efluentes.
- La instalación de un reactor secuencial discontinuo resultaría en implementar un proceso cuya calidad en el efluente final será mayor a la actual (DBO 10-20 mg/L).
- Los requerimientos de energía serían similares a los actuales.
- Supondría mayores requerimientos en automatización y control que los actuales.
- No requeriría la instalación de sedimentador secundario ni retorno de lodos.
- Esta tecnología ha sido probada con aguas residuales municipales e industriales.

Residuos generados en la propuesta 1

Los hidrocarburos recuperados serán enviados a tanques SLOP

Los lodos inorgánicos generados en los separadores de Grasas y Aceites, así como residuos de sosas gastadas y gases se enviarán a un incinerador, el cual generará cenizas inertes y gases.

Los lodos biológicos generados en el Reactor Secuencial deberán recibir un tratamiento (deshidratación, digestión, secado) para su posterior incineración.

Los separadores de aceite deben ser cerrados, con el objetivo de evitar la emisión de COV's a la atmósfera, con la opción de implementar una columna de absorción a la salida de éstos.



Análisis de la propuesta 2 (P2)

- La instalación de los dos CPI's significaría implementar equipos equivalentes pero con tecnología moderna, con todos los sistemas nuevos y operando, incluyendo sistemas auxiliares e instrumentos.
- La eficiencia de remoción podría ser equivalente o mayor, debido a los avances en configuración del equipo, operación, materiales y tipos de placas empleados actualmente.
- Con base en los datos de concentración de Grasas y Aceites en el influente y en los datos de remociones típicas de este tipo de equipos (85-95%), se esperaría la obtención de un efluente con contenidos de Grasas y Aceites entre 25-125 mg/L.
- El tratamiento del efluente no requeriría grandes presiones de bombeo.
- La implementación de un equipo de flotación por gas inducido permitiría la remoción de Grasas y Aceites emulsionados.
- Requeriría contar con un proceso primario de Grasas y Aceites que entregara un efluente con contenido de Grasas y Aceites no mayor a 500 mg/L.
- Este equipo evitaría el paso de Grasas y Aceites a concentraciones que puedan afectar el tratamiento secundario o biológico (por encima de los 50 mg/L), tal como llega a suceder actualmente.
- Con base en el contenido de grasas del influente la remoción de las mismas en una etapa primaria, y las eficiencias de estos equipos para remoción de Grasas y Aceites emulsionadas (85-90% con el apoyo de químicos), se esperaría la obtención de un efluente final de tratamiento primario con un contenido de no más de 25 mg/L de Grasas y Aceites e incluso menor a 10 mg/L.



- Sería necesario contar con un sistema adecuado de control, y un adecuado programa de mantenimiento, para mantener los equipos en óptimas condiciones
- La instalación de un reactor biológico de biomembrana resultaría en implementar un proceso cuya calidad en el efluente final sería mucho mejor que la actual ($DBO < 5 \text{ mg/L}$)
- Implicaría mayores requerimientos de energía por aeración.
- Implicaría mayores requerimientos en automatización y control que los actuales.
- No requiere la instalación de sedimentador secundario ni retorno de lodos.
- Es una tecnología poco probada con aguas residuales industriales.
- Cumple con las condiciones actuales de descarga¹.

Residuos generados en la propuesta 2

Los hidrocarburos recuperados en los separadores de Grasas y Aceites serán enviados a tanques SLOP

Los lodos inorgánicos generados en los separadores de Grasas y Aceites, así como residuos de sosas gastadas y gases se enviarán a un incinerador, el cual generará cenizas inertes y gases.

Los lodos biológicos generados en el Reactor de biomembrana deberán recibir un tratamiento (deshidratación, digestión, secado) para su posterior incineración. Los separadores de aceite deben ser cerrados, con el objetivo de evitar la emisión de COV's a la atmósfera.

Análisis de la propuesta 3 (P3)

¹ Los límites máximos permisibles en materia de descarga de contaminantes estipulados por la norma vigente se encuentran señalados en el anexo C.



- La instalación de los dos CPI's significaría implementar equipos equivalentes pero con tecnología moderna, con todos los sistemas nuevos y operando, incluyendo sistemas auxiliares e instrumentos.
- La eficiencia de remoción podría ser equivalente o mayor, debido a los avances en configuración del equipo, operación, materiales y tipos de placas empleados actualmente.
- Con base en los datos de concentración de Grasas y Aceites en el influente y en los datos de remociones típicas de este tipo de equipos (85-95%), se esperaría la obtención de un efluente con contenidos de Grasas y Aceites entre 25-125 mg/L.
- Permitiría el tratamiento de flujo por gravedad igual que el actual, es decir, no se necesitaría un equipo de bombeo para proporcionar grandes presiones.
- La instalación de un equipo de flotación por aire disuelto permitiría la remoción de Grasas y Aceites emulsionados.
- Sería necesario que la concentración de Grasas y Aceites en el influente no excediera 500 mg/L.
- El equipo DAF evitaría el paso de Grasas y Aceites a concentraciones que puedan afectar el tratamiento secundario o biológico (por encima de los 50 mg/L), tal y como llega a suceder actualmente.
- Con base en los contenidos actuales de Grasas y aceites del influente, la remoción de las mismas en una etapa primaria, y la eficiencia de estos equipos para remoción de Grasas y Aceites emulsionadas (90-95%, con el apoyo de químicos), se esperaría la obtención de un efluente final de tratamiento primario con contenidos no mayores a 15 mg/L, e incluso menores a 5 mg/L.



- Los contenidos prácticamente nulos de Grasas y Aceites en el efluente final de tratamiento global, permitirían incrementar la factibilidad de un futuro reúso del agua tratada obtenida en el área de efluentes.
- El sistema lagunar actual permite alcanzar un efluente con calidad que cumple con la norma (NOM-001-SEMARNAT-1996, para cuerpo receptor tipo C) y las especificaciones de descarga actuales dado que permite obtener remociones eficientes de carga orgánica por manejar actualmente flujos inferiores a los de diseño.
- Un mantenimiento adecuado y las rehabilitaciones necesarias como la instalación de los aeradores faltantes permitirán asegurar la remoción eficiente de carga orgánica en el sistema.

Residuos generados en la propuesta 3

Los hidrocarburos recuperados en los separadores de Grasas y Aceites serán enviados a tanques SLOP

Los lodos inorgánicos generados en los separadores de Grasas y Aceites, así como residuos de sosas gastadas y gases se enviarán a un incinerador, el cual generará cenizas inertes y gases.

Los lodos biológicos generados en la laguna de oxidación deberán recibir un tratamiento (deshidratación, digestión, secado) para su posterior incineración.

Los separadores de aceite deben ser cerrados, con el objetivo de evitar la emisión de COV's a la atmósfera.



En la tabla 5.1 se pueden observar los parámetros que se obtendrían en el caso de implementar cada opción de modernización planteada, tomado como base los parámetros actuales obtenidos en el muestreo y los datos de remoción teóricos de cada equipo.

Tabla 5.1 Calidad del efluente esperado para cada opción de modernización planteada

PARÁMETROS	UNIDADES	P1	P2	P3
Q	(m ³ /día)	4412	4390	4405
G y A	(mg/L)	<5	0	10
DBO ₅	(mg/L)	10	<5	15
SST	(mg/L)	10	0	15
DQO	(mg/L)	35	5	50
N total	(mg/L)	<0.5	<1	1.5
P total	(mg/L)	<0.5	<0.5	0.5



5.2 EVALUACIÓN ECONÓMICA

En esta sección se llevó a cabo una evaluación económica de las propuestas, con base en datos de cotizaciones proporcionadas por proveedores de equipo, en caso de no contarse con cotizaciones, se realizaron estimaciones con base en información bibliográfica.

5.2.1 Premisas económicas.

Para llevar a cabo esta sección se tomaron en cuenta las premisas económicas que se describen a continuación.

1. El horizonte del proyecto fue de 20 años.
2. La tasa de descuento fue de 12%.
3. Plazos para la estimación de flujos de efectivo anuales.
4. Costo de mantenimiento del 3% de la inversión, correspondiente al mantenimiento general y al mantenimiento mayor.
5. Se consideraron las reinversiones necesarias para mantener la operación de las nuevas instalaciones durante el horizonte de evaluación del proyecto.
6. Se consideró la depreciación lineal del equipo mayor a 20 años.
7. No se consideró valor de rescate de ningún equipo.
8. Para la evaluación económica se consideró el ISR de 30%.



9. Los indicadores financieros serán evaluados después de impuestos.
10. Para la estimación de ahorros se utilizaron sólo los costos variables.
11. Se consideraron como ahorros las posibles multas que se eviten por incumplimiento de la ley en materia de descarga.
12. Se consideraron los ahorros en la extracción de agua y el costo de su pretratamiento.
13. Se consideraron ahorros por disposición de agua.

5.2.2 Definición de los costos del proyecto

5.2.2.1 Costos variables

Materia prima

En este caso, la materia prima es el agua residual obtenida de las distintas plantas de proceso y purgas del complejo, las cuales tienen un flujo de 4469 m³/s. Esta agua residual tiene un costo nulo.

Otra materia prima es el agua de servicio, con calidad de agua pretratada para realizar la dilución de los productos químicos y nutrientes, el agua pretratada tiene un costo de 0.26 USD/m³.

Químicos y reactivos

De acuerdo a los requerimientos y necesidades de las propuestas realizadas se necesitan consumos de químicos, los cuales son coagulante, floculante, ácido fosfórico, urea, fosfato diamónico, hidróxido de sodio y ácido sulfúrico.



Servicios auxiliares

Se necesita vapor de media, agua de enfriamiento y agua de servicio, esta última con calidad de agua pretratada para realizar la dilución de los productos químicos, el agua pretratada tiene un costo de 0.26 USD/m³.

Energía eléctrica

El cálculo del costo de energía eléctrica se realizó a partir de la potencia de los motores en operación normal. Éste se obtiene aplicando el factor de operación de 0.85 a la potencia eléctrica media de la PTAR, basado en la operación nominal de los motores eléctricos.

5.2.2.2 Costos fijos directos

Para calcular los costos fijos directos se consideró la inversión del equipo principal, que incluye el mantenimiento general estimado, más el adicional que considera la reposición de equipo electrodinámico.

Mantenimiento

Para el cálculo de los costos de mantenimiento se consideró un 3% de la inversión en equipo principal.

Mano de obra directa

Se considera un operador por turno.

5.2.2.3 Costos fijos indirectos

Para este concepto sólo se considera la depreciación, la cual se calculó de manera lineal y a partir del inicio de operaciones de la planta y considerando un período de 20 años.



5.2.2.4 Beneficios, ahorros e impactos

Beneficios cuantificables

De acuerdo a las características particulares de las propuestas, cada una puede presentar diferentes beneficios, en este contexto, los beneficios cuantificables que se tomaron en cuenta para el desarrollo del presente estudio, fueron los siguientes:

- Ahorro en químicos y nutrientes.
- Ahorro en servicios auxiliares.
- Ahorro en multas y cuotas por indemnizaciones.
- Ahorro por reducción de tratamiento a efluentes.
- Ahorro por aceite recuperado.

Los beneficios mencionados representan ingresos a cada propuesta planteada, y se determinaron numéricamente de acuerdo a referencias de tecnólogos o proveedores, y a estimaciones de acuerdo a las consideraciones de operación actual del área de efluentes del complejo.



5.2.3 Estimación de costos de las propuestas planteadas

5.2.3.1 Estimación de costos de la propuesta P1

P1 Sustitución de los equipos de la primera etapa de remoción de Grasas y Aceites por 2 equipos CPI nuevos, implementación de segunda etapa de remoción de Grasas y Aceites mediante un equipo DAF, sustitución de las lagunas de oxidación y estabilización e implementación de dos reactores secuenciales discontinuos.

Lista de equipos de la propuesta P1

La tabla 5.2 muestra un listado de los equipos que conforman la propuesta 1.

En la tabla se describen equipos estáticos (EST), equipos dinámicos (EQD), tanques (TNK) y paquetes completos (SIS).

Tabla 5.2 Equipos que conforman la propuesta P1

EQUIPO MAYOR	CANT	NOTAS TÉCNICAS	GRUPO	PRO. NÚM	ALCANCE	DETALLE DEL ALCANCE
Preseparador de aceite	1	Preseparador de aceite con medias cañas	EST	P1	Instrumentar	Se requiere instalar un medidor de flujo, analizador de pH, y analizador de Grasas y Aceites a la entrada del preseparador de Grasas y Aceites.
Separador de aceite 1	1	Separador de aceite de placas corrugadas y medias cañas	EST	P1	Nuevo	Se requiere sustituir el antiguo CPI por uno nuevo, con medidor de flujo, analizador de pH, y analizador de Grasas y Aceites a la entrada del separador de aceite 1.
Separador de	1	Separador de	EST	P1	Nuevo	Se requiere



EQUIPO MAYOR	CANT	NOTAS TÉCNICAS	GRUPO	PRO. NÚM	ALCANCE	DETALLE DEL ALCANCE
aceite 2		aceite de palcas corrugadas y medias cañas				sustituir el antiguo CPI por uno nuevo, con medidor de flujo, analizador de pH, y analizador de Grasas y Aceites a la entrada del separador de aceite 2.
Sistema de flotación por aire disuelto	1	Tipo paquete	SIS	P1	nuevo	Se requiere un sistema de flotación por aire disuelto para la remoción de Grasas y Aceites, con adición de polímeros.
Fosas de neutralización	2	Material de concreto con homogenizadores	EST	P1	Instrumentar	Se requiere instalar 2 medidores de flujo y 2 analizadores de pH a la entrada de agua ácida o alcalina proveniente de UDA's.
Fosa de demasías	1	Material de concreto con membrana hypalon	EST	P1	Instrumentar	Se requiere instalar 2 analizadores de pH y 2 analizadores de Grasas y Aceites en la entrada.
Tanque de sosa caústica	1	Material acero al carbón	TNK	P1	Nuevo	Se requiere instalar 1 tanque de sosa caústica para almacenamiento.
Clorador 2	1	Material concreto	EST	P1	Instrumentar	Se requiere de 1 analizador y control de dosificación de cloro en la salida de la laguna de estabilización.
Reactor SBR	2	Reactor secuencial discontinua con capacidad	EST	P1	Nuevo	Se requiere implementar dos reactores secuenciales



EQUIPO MAYOR	CANT	NOTAS TÉCNICAS	GRUPO	PRO. NÚM	ALCANCE	DETALLE DEL ALCANCE
		para tratar 2000m ³ /día				discontinuos para mejorar la calidad del agua tratada, para cumplir con la NOM-001 de la SEMARNAT y estar preparados ante eventuales modificaciones a ésta.
Bombas de aceite recuperado del preseparator de aceite	2	Capacidad: 150GPM 5 HP Tipo: centrífuga vertical	EQD	P1	Nuevo	Se requiere de 2 bombas para enviar el aceite recuperado del preseparator de aceite.
Bombas de aceite recuperado del separador de aceite 1	2	Capacidad: 150GPM 5 HP Tipo: centrífuga vertical	EQD	P1	Nuevo	Se requiere de 2 bombas para enviar el aceite recuperado del separador de aceite 1.
Bombas de aceite recuperado del separador de aceite 2	2	Capacidad: 150GPM 5 HP Tipo: centrífuga vertical	EQD	P1	Nuevo	Se requiere de 2 bombas para enviar el aceite recuperado del separador de aceite 2.
Bombas de agua tratada a la salida de los SBR	2	Capacidad: 2000GPM 150 HP Tipo: centrífuga vertical	EQD	P1	Nuevo	Se requiere de 2 bombas verticales para enviar agua residual tratada a canal emisor final.
Bombas de sosas gastadas y aguas amargas	2	Capacidad: 103 GPM 15 HP Tipo: centrífuga vertical	EQD	P1	Nuevo	Se requiere de 2 bombas para enviar las sosas gastadas y aguas amargas al sistema de separación de Grasas y Aceites.
Bombas de alimentación de carga a torre de reducción de sulfuros	2	Capacidad: 103 GPM. HP: 20. Tipo: centrífuga horizontal	EQD	P1	Nuevo	Se requieren 2 bombas de alimentación a la Torre de Oxidación.
Bomba de aceite	2	Capacidad: 103 GPM. HP:	EQD	P1	Nuevo	Se requieren 2 bombas en el



EQUIPO MAYOR	CANT	NOTAS TÉCNICAS	GRUPO	PRO. NÚM	ALCANCE	DETALLE DEL ALCANCE
recuperado del registro general de aceite recuperado		20. Tipo: centrífuga horizontal				registro general de aceite recuperado.
Filtros de rejilla del separador de aceite	2	Eliminar sólidos menores a 1" Tipo: Limpieza automática	EST	P1	Nuevo	Se requiere la colocación del sistema de separación de sólidos pequeños.
Canal emisor	1	Material concreto	EST	P1	Nuevo	Se requiere cambio de medidor de flujo, 1 analizador de pH, Grasas y Aceites, DQO, DBO ₅ , nitrógeno total, conductividad y cloro residual.

En la tabla 5.3 se presenta la estimación de la inversión necesaria para llevar a cabo la propuesta 1.



Tabla 5.3 Estimado de inversión de la propuesta P1

EQUIPO MAYOR	ALCANCE	CANTIDAD	INVERSIÓN (USD)	
			INTEGRAL UNITARIO	INTEGRAL TOTAL
Preseparador de aceite	Instrumentar	1	2,268	2,268
Separador de aceite 1	Nuevo	1	110,633	110,633
Separador de aceite 2	Nuevo	1	111,832	111,382
DAF	Nuevo	1	1,388,054	1,388,054
Fosas de neutralización	Rehabilitar	2	28,945	57,889
Fosa de demasías	Rehabilitar	1	48,281	48,281
Tanque de sosa cáustica	Nuevo	1	19,716	19,716
Reactor Secuencial Discontinuo	Nuevo	2	2,517,400	5,034,800
Clorador 2	Instrumentar	1	10,218	10,218
Bombas del preseparador	Nuevo	2	25,112	50,224
Bombas del separador 1	Nuevo	2	11,633	23,267
Bombas del separador 2	Nuevo	2	11,633	23,267
Bombas a la salida de la laguna de estabilización	Nuevo	2	31,320	62,640
Bombas de sosa gastada	Nuevo	2	57,467	114,933
Bombas de alimentación de la torre de oxidación	Nuevo	2	14,051	28,102
Bombas del registro general de aceite	Nuevo	2	33,967	67,933
Filtros de rejilla	Nuevo	3	2,899	8,696



EQUIPO MAYOR	ALCANCE	CANTIDAD	INVERSIÓN (USD)	
			INTEGRAL UNITARIO	INTEGRAL TOTAL
Canal emisor	Instrumentar	1	195	195
Total general P1				8,202,896

En la figura 5.1, se esquematiza la propuesta 1, en esta figura se puede observar la disminución o el aumento que se presenta para cada escenario (actual y futuro) en pérdidas, en la utilización de reactivos, servicios auxiliares y producción de lodos, aceite recuperado, agua pretratada.

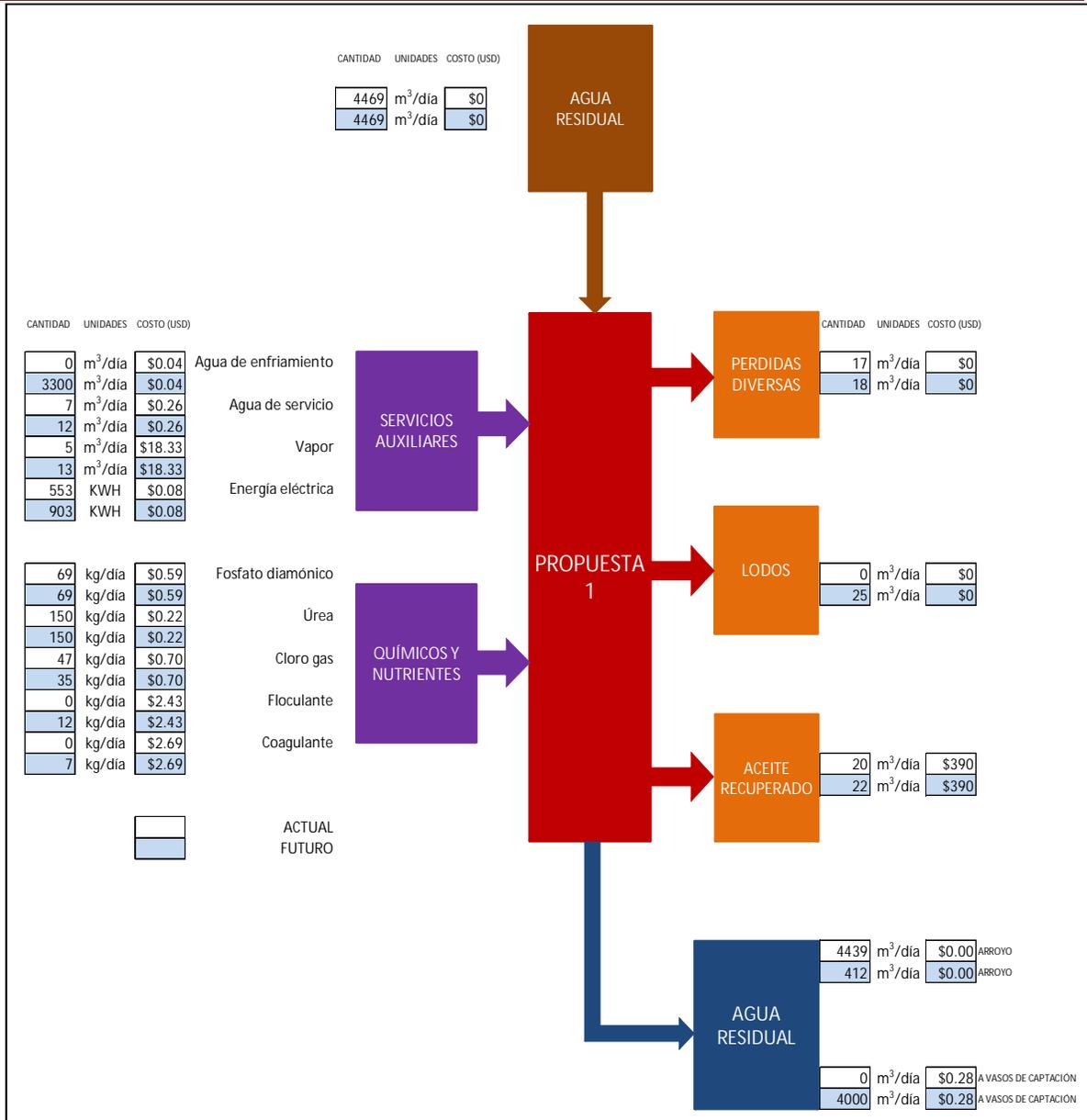


Figura 5.1 Diagrama de la propuesta 1



5.2.3.2 Estimación de costos de la propuesta P2

P2 Sustitución de los equipos de la primera etapa de remoción de Grasas y Aceites por 2 equipos CPI nuevos, implementación de segunda etapa de remoción de Grasas y Aceites mediante un equipo IGF, implementación de un reactor biológico de membrana y modernización de las lagunas de oxidación y estabilización.

Lista de equipos de la propuesta 2

La tabla 5.4 muestra un listado de los equipos que conforman la propuesta 2.

Tabla 5.4 Equipos que conforman la propuesta P2

EQUIPO MAYOR	CANT	NOTAS TÉCNICAS	GRUPO	PRO NÚM	ALCANCE	DETALLE DEL ALCANCE
Preseparador de aceite	1	Preseparador de aceite con medias cañas	EST	P2	Instrumentar	Se requiere instalar un medidor de flujo, analizador de pH, y analizador de Grasas y Aceites a la entrada del preseparador de Grasas y Aceites.
Separador de aceite 1	1	Separador de aceite de placas corrugadas y medias cañas	EST	P2	Nuevo	Se requiere sustituir el antiguo CPI por uno nuevo, con medidor de flujo, analizador de pH, y analizador de Grasas y Aceites a la entrada del separador de aceite 1.
Separador de aceite 2	1	Separador de aceite de placas corrugadas y medias cañas	EST	P2	Nuevo	Se requiere sustituir el antiguo CPI por uno nuevo, con medidor de flujo, analizador de pH, y analizador de Grasas y Aceites a



EQUIPO MAYOR	CANT	NOTAS TÉCNICAS	GRUPO	PRO NÚM	ALCANCE	DETALLE DEL ALCANCE
						la entrada del separador de aceite 2.
Sistema de flotación por gas inducido	1	Tipo paquete	SIS	P2	Nuevo	Se requiere implementar un sistema de flotación por gas inducido para la remoción de Grasas y Aceites.
Fosas de neutralización	2	Material de concreto con homogenizadores	EST	P2	Instrumentar	Se requiere instalar 2 medidores de flujo y 2 analizadores de pH a la entrada de agua ácida o alcalina proveniente de UDA's.
Fosa de demasías	1	Material de concreto con membrana hypalon	EST	P2	Instrumentar	Se requiere instalar 2 analizadores de pH y 2 analizadores de Grasas y Aceites en la entrada.
Laguna oxidación	1	Material de concreto con membrana hypalon	EST	P2	Modernizar	Se requiere instalar 6 aeradores nuevos, cambiar la membrana hypalon e instalar 1 analizador de pH, 1 de Grasas y Aceites y 1 de oxígeno disuelto en 3 diferentes puntos.
Laguna de estabilización	1	Material de concreto con membrana hypalon	EST	P3	Modernizar	Se requiere cambiar membrana hypalon e instalar 1 medidor de flujo, 1 analizador de Grasas y Aceites y un analizador de pH a la salida de la laguna de estabilización.
Tanque de	1	Material acero	TNK	P2	Nuevo	Se requiere



EQUIPO MAYOR	CANT	NOTAS TÉCNICAS	GRUPO	PRO NÚM	ALCANCE	DETALLE DEL ALCANCE
sosa caústica		al carbón				instalar 1 tanque de sosa caústica para almacenamiento.
MBR	1	Reactor biológico de biomebrana con capacidad para tratar 2000m ³ /día	EST	P2	Nuevo	Se requiere implementar un reactor biológico de biomembrana para reutilizar el agua tratada.
Bombas de aceite recuperado del preseparator de aceite	2	Capacidad: 150GPM 5 HP Tipo: centrífuga vertical	EQD	P2	Nuevo	Se requiere de 2 bombas para enviar el aceite recuperado del preseparator de aceite.
Bombas de aceite recuperado del separador de aceite 1	2	Capacidad: 150GPM 5 HP Tipo: centrífuga vertical	EQD	P2	Nuevo	Se requiere de 2 bombas para enviar el aceite recuperado del separador de aceite 1.
Bombas de aceite recuperado del separador de aceite 2	2	Capacidad: 150GPM 5 HP Tipo: centrífuga vertical	EQD	P2	Nuevo	Se requiere de 2 bombas para enviar el aceite recuperado del separador de aceite 2.
Bombas de agua tratada a la salida del MBR	2	Capacidad: 2000GPM 150 HP Tipo: centrífuga vertical	EQD	P2	Nuevo	Se requiere de 2 bombas verticales para enviar agua residual tratada a canal emisor final.
Bombas de sosas gastadas y aguas amargas	2	Capacidad: 103 GPM 15 HP Tipo: centrífuga vertical	EQD	P2	Nuevo	Se requiere de 2 bombas para enviar las sosas gastadas y aguas amargas al sistema de separación de Grasas y Aceites.
Bombas de alimentación de carga a torre de reducción de sulfuros	2	Capacidad: 103 GPM. HP: 20. Tipo: centrífuga horizontal	EQD	P2	Nuevo	Se requieren 2 bombas de alimentación a la Torre de Oxidación
Bomba de aceite recuperado	2	Capacidad: 103 GPM. HP: 20. Tipo: centrífuga	EQD	P2	Nuevo	Se requieren 2 bombas en el registro general de



EQUIPO MAYOR	CANT	NOTAS TÉCNICAS	GRUPO	PRO NÚM	ALCANCE	DETALLE DEL ALCANCE
del registro general de aceite recuperado		horizontal				aceite recuperado.
Filtros de rejilla del separador de aceite	2	Eliminar sólidos menores a 1" Tipo: Limpieza automática	EST	P2	Nuevo	Se requiere la colocación del sistema de separación de sólidos pequeños.
Clorador 2	1	Material concreto	EST	P2	Instrumentar	Se requiere de 1 analizador y control de dosificación de cloro en la salida de la laguna de estabilización.
Canal emisor	1	Material concreto	EST	P2	Nuevo	Se requiere cambio de medidor de flujo, 1 analizador de pH, Grasas y Aceites, DQO, DBO ₅ , nitrógeno total, conductividad y cloro residual.



Estimado de inversión de la propuesta P2

A continuación se presenta la estimación de la inversión necesaria para la realización de la propuesta 2.

Tabla 5.5 Estimado de inversión de la propuesta P2

EQUIPO MAYOR	ALCANCE	CANTIDAD	INVERSIÓN (USD)	
			INTEGRAL UNITARIO	INTEGRAL TOTAL
Preseparador de aceite	Instrumentar	1	2,268	2,268
Separador de aceite 1	Nuevo	1	110,633	110,633
Separador de aceite 2	Nuevo	1	111,832	111,382
IGF	Nuevo	1	541,269	1,623,087
Fosas de neutralización	Rehabilitar	2	28,945	57,889
Fosa de demasías	Rehabilitar	1	48,281	48,281
Laguna de oxidación	Modernizar	1	313,626	313,626
Laguna de estabilización	Rehabilitar	1	230,695	230,695
Tanque de sosa cáustica	Nuevo	1	19,716	19,716
MBR	Nuevo	1	6,380,410	6,380,410
Bombas del preseparador	Nuevo	2	25,112	50,224
Bombas del separador 1	Nuevo	2	11,633	23,267
Bombas del separador 2	Nuevo	2	11,633	23,267
Bombas a la salida del bioreactor de membrana	Nuevo	2	31,320	62,640
Bombas de sosa gastada	Nuevo	2	57,467	114,933
Bombas de alimentación de la torre de	Nuevo	2	14,051	28,102



EQUIPO MAYOR	ALCANCE	CANTIDAD	INVERSIÓN (USD)	
			INTEGRAL UNITARIO	INTEGRAL TOTAL
oxidación				
Bombas del registro general de aceite	Nuevo	2	33,967	67,933
Filtros de rejilla	Nuevo	3	2,899	8,696
Clorador 2	Instrumentar	1	10,218	10,218
Canal emisor	Instrumentar	1	195	195
Total general P2				7,511,281

En la figura 5.2, se esquematiza la propuesta 2, en esta figura se puede observar la disminución o el aumento que se presenta para cada escenario (actual y futuro) en pérdidas, en la utilización de reactivos, servicios auxiliares y producción de lodos, aceite recuperado y agua pretratada.

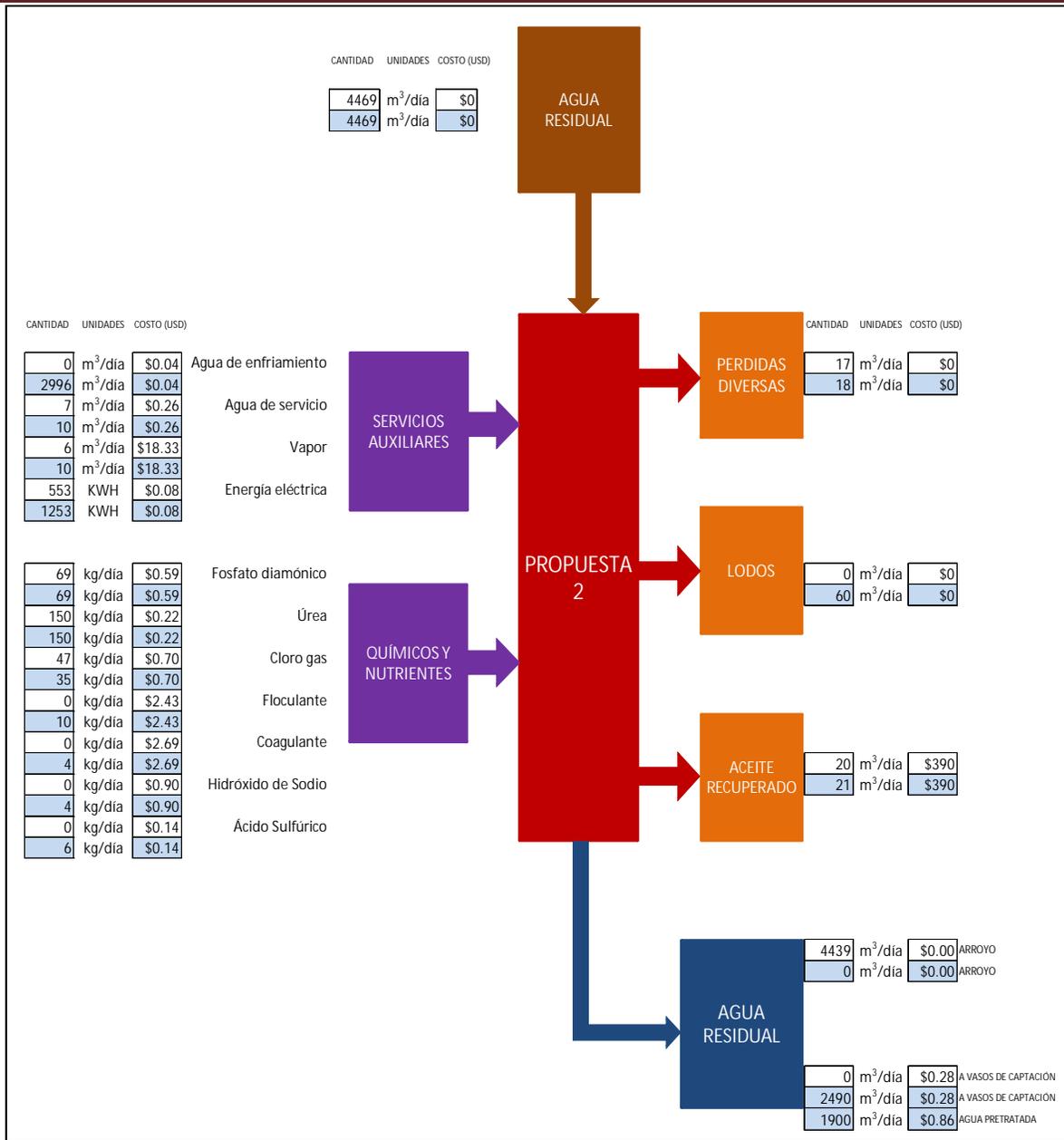


Figura 5. 2 Diagrama de la propuesta 2



5.2.3.3 Estimación de costos de la propuesta P3

P3 Sustitución de los equipos de la primera etapa de remoción de Grasas y Aceites por 2 equipos CPI nuevos, implementación de segunda etapa de remoción de Grasas y Aceites mediante un equipo DAF, instrumentación y rehabilitación de las lagunas de oxidación y estabilización

Lista de equipos de la propuesta 3

La tabla 5.6 muestra un listado de los equipos que conforman la propuesta 3.

Tabla 5.6 Equipos que conforman la propuesta P3

EQUIPO MAYOR	CANT	NOTAS TÉCNICAS	GRUPO	PRO NÚM	ALCANCE	DETALLE DEL ALCANCE
Preseparador de aceite	1	Preseparador de aceite con medias cañas	EST	P3	Instrumentar	Se requiere instalar un medidor de flujo, analizador de pH, y analizador de Grasas y Aceites a la entrada del preseparador de Grasas y Aceites.
Separador de aceite 1	1	Separador de aceite de placas corrugadas y medias cañas	EST	P3	Nuevo	Se requiere sustituir el antiguo CPI por uno nuevo, con medidor de flujo, analizador de pH, y analizador de Grasas y Aceites a la entrada del separador de aceite 1.
Separador de aceite 2	1	Separador de aceite de placas corrugadas y medias cañas	EST	P3	Nuevo	Se requiere sustituir el antiguo CPI por uno nuevo, con medidor de flujo, analizador de pH, y analizador de Grasas y Aceites a la entrada del separador de aceite 2.
Sistema de flotación por	1	Tipo paquete	SIS	P3	Nuevo	Se requiere un sistema de flotación



EQUIPO MAYOR	CANT	NOTAS TÉCNICAS	GRUPO	PRO NÚM	ALCANCE	DETALLE DEL ALCANCE
aire disuelto						por aire disuelto para la remoción de Grasas y Aceites con adición de polímeros.
Fosas de neutralización	2	Material de concreto con homogenizadores	EST	P3	Instrumentar	Se requiere instalar 2 medidores de flujo y 2 analizadores de pH a la entrada de agua ácida o alcalina proveniente de UDA's.
Fosa de demasías	1	Material de concreto con membrana hypalon	EST	P3	Instrumentar	Se requiere instalar 2 analizadores de pH y 2 analizadores de Grasas y Aceites en la entrada.
Tanque de sosa caústica	1	Material acero al carbón	TNK	P3	Nuevo	Se requiere instalar 1 tanque de sosa caústica para almacenamiento.
Clorador 2	1	Material concreto	EST	P3	Instrumentar	Se requiere de 1 analizador y control de dosificación de cloro en la salida de la laguna de estabilización.
Laguna oxidación	1	Material concreto con membrana hypalon	EST	P3	Modernizar	Se requiere instalar 6 aeradores nuevos, cambiar la membrana hypalon e instalar 1 analizador de pH, 1 de Grasas y Aceites y 1 de oxígeno disuelto en 3 diferentes puntos.
Laguna de estabilización	1	Material concreto con membrana hypalon	EST	P3	Modernizar	Se requiere cambiar membrana hypalon e instalar 1 medidor de flujo, 1 analizador de Grasas y Aceites y un analizador de pH a la salida de la laguna de estabilización.
Bombas de aceite recuperado	2	Capacidad: 150GPM 5 HP	EQD	P3	Nuevo	Se requiere de 2 bombas para enviar el aceite recuperado



EQUIPO MAYOR	CANT	NOTAS TÉCNICAS	GRUPO	PRO NÚM	ALCANCE	DETALLE DEL ALCANCE
del preseparator de aceite		Tipo: centrífuga vertical				del preseparator de aceite.
Bombas de aceite recuperado del separador de aceite 1	2	Capacidad: 150GPM 5 HP Tipo: centrífuga vertical	EQD	P3	Nuevo	Se requiere de 2 bombas para enviar el aceite recuperado del separador de aceite 1.
Bombas de aceite recuperado del separador de aceite 2	2	Capacidad: 150GPM 5 HP Tipo: centrífuga vertical	EQD	P3	Nuevo	Se requiere de 2 bombas para enviar el aceite recuperado del separador de aceite 2.
Bombas de agua tratada a la salida de la laguna de estabilización	2	Capacidad: 2000GPM 150 HP Tipo: centrífuga vertical	EQD	P3	Nuevo	Se requiere de 2 bombas verticales para enviar agua residual tratada a canal emisor final.
Bombas de sosas gastadas y aguas amargas	2	Capacidad: 103 GPM 15 HP Tipo: centrífuga vertical	EQD	P3	Nuevo	Se requiere de 2 bombas para enviar las sosas gastadas y aguas amargas al sistema de separación de Grasas y Aceites.
Bombas de alimentación de carga a torre de reducción de sulfuros	2	Capacidad: 103 GPM. HP: 20. Tipo: centrífuga horizontal	EQD	P3	Nuevo	Se requieren 2 bombas de alimentación a la Torre de Oxidación.
Bomba de aceite recuperado del registro general de aceite recuperado	2	Capacidad: 103 GPM. HP: 20. Tipo: centrífuga horizontal	EQD	P3	Nuevo	Se requieren 2 bombas en el registro general de aceite recuperado.
Filtros de rejilla del separador de aceite	2	Eliminar sólidos menores a 1" Tipo: Limpieza automática	EST	P3	Nuevo	Se requiere la colocación del sistema de separación de sólidos pequeños.
Canal emisor	1	Material concreto	EST	P3	Nuevo	Se requiere cambio de medidor de flujo, 1 analizador de pH, Grasas y Aceites,



EQUIPO MAYOR	CANT	NOTAS TÉCNICAS	GRUPO	PRO NÚM	ALCANCE	DETALLE ALCANCE	DEL
						DQO, nitrógeno conductividad cloro residual.	DBO ₅ , total, y

Estimado de inversión de la propuesta P3

En la tabla 5.7 se encuentran registrados los costos de los equipos de la propuesta 3.

Tabla 5.7 Estimado de inversión de la propuesta P3

EQUIPO MAYOR	ALCANCE	CANTIDAD	INVERSIÓN (USD)	
			INTEGRAL UNITARIO	INTEGRAL TOTAL
Preseparador de aceite	Instrumentar	1	2,268	2,268
Separador de aceite 1	Nuevo	1	110,633	110,633
Separador de aceite 2	Nuevo	1	111,832	111,382
DAF	Nuevo	1	1,388,054	1,388,054
Fosas de neutralización	Rehabilitar	2	28,945	57,889
Fosa de demasías	Rehabilitar	1	48,281	48,281
Tanque de sosa cáustica	Nuevo	1	19,716	19,716
Clorador 2	Instrumentar	1	10,218	10,218
Laguna de oxidación	Modernizar	1	313,626	313,626
Laguna de estabilización	Rehabilitar	1	230,695	230,695
Bombas del preseparador	Nuevo	2	25,112	50,224
Bombas del	Nuevo	2	11,633	23,267



EQUIPO MAYOR	ALCANCE	CANTIDAD	INVERSIÓN (USD)	
			INTEGRAL UNITARIO	INTEGRAL TOTAL
separador 1				
Bombas del separador 2	Nuevo	2	11,633	23,267
Bombas a la salida de la laguna de estabilización	Nuevo	2	31,320	62,640
Bombas de sosa gastada	Nuevo	2	57,467	114,933
Bombas de alimentación de la torre de oxidación	Nuevo	2	14,051	28,102
Bombas del registro general de aceite	Nuevo	2	33,967	67,933
Filtros de rejilla	Nuevo	3	2,899	8,696
Canal emisor	Instrumentar	1	195	195
Total general P3				2,672,739

En la figura 5.3, se esquematiza la propuesta 3, en esta figura se puede observar la disminución o el aumento que se presenta para cada escenario (actual y futuro) en pérdidas, en la utilización de reactivos, servicios auxiliares y producción de lodos, aceite recuperado, agua pretratada.

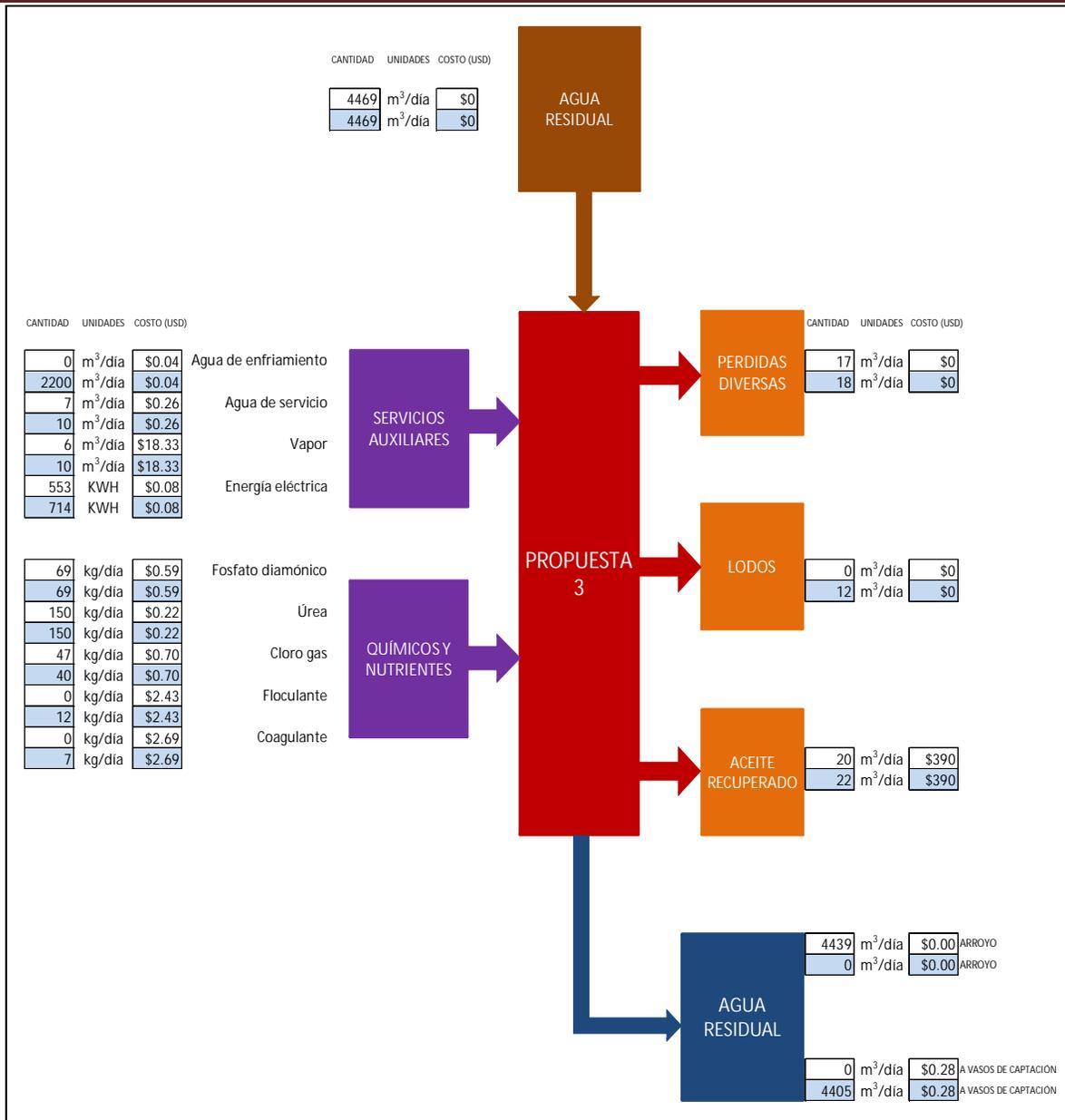


Figura 5.3 Diagrama de la propuesta 3



5.2.4 Determinación de la viabilidad de las propuestas, mejor opción técnico-económica

En este apartado se presentarán los indicadores de rentabilidad para cada propuesta, los principales factores que se tomaron en cuenta para determinar la viabilidad o no viabilidad de las propuestas fueron el valor presente neto, la tasa interna de retorno y el período de recuperación de la inversión. En la tabla 5.8 se presentan los indicadores de rentabilidad para las 3 propuestas.

Tabla 5.8 Indicadores de rentabilidad de las 3 propuestas

INDICADORES DE RENTABILIDAD	P1	P2	P3
Inversión Total (USD\$)	8,202,896	8,678,591	3,088,731
Valor Presente Neto (USD\$)	-1,991,531	-357,486	609,506
Tasa Interna de Retorno	7.95%	11.35%	15%
Recuperación (años de operación)	No recupera	No recupera	12

Como se observa en la tabla 5.8, la propuesta P1 y P2 no son rentables económicamente, ya que poseen un valor presente neto negativo, la única propuesta rentable es la propuesta P3, ya que posee un valor presente neto positivo y una tasa interna de retorno mayor a la tasa de descuento utilizada, la cual fue de 12%, además, podemos observar que la inversión se recuperaría en un período de 12 años.



Finalmente se ha determinado que la propuesta más factible técnica y económicamente es la propuesta 3, en la tabla 5.9 se puede observar cómo se comportarían los parámetros principales, en el caso de realizarse esta propuesta. El diagrama simplificado de la propuesta 3 se detalla en la figura 5.4

Tabla 5.9 Parámetros principales con el tren de tratamiento propuesto

PARÁMETRO	UNIDADES	1	2	3	4	5	6	7	8*	9*	10	11
Flujo	m ³ /h	65	24	24	80	104	65	169	9	10	188	186
SST	mg/L	-	44	52	157	115	102	112	5	20	112	15
G Y A	mg/L	140	1414	500	1001	50-150	7-21	2.5-17	<10	<10	2.5-17	10
DBO ₅	mg/L	100	127	27.4	520	210	112	322	949	441	322	15

*Parámetros esperados

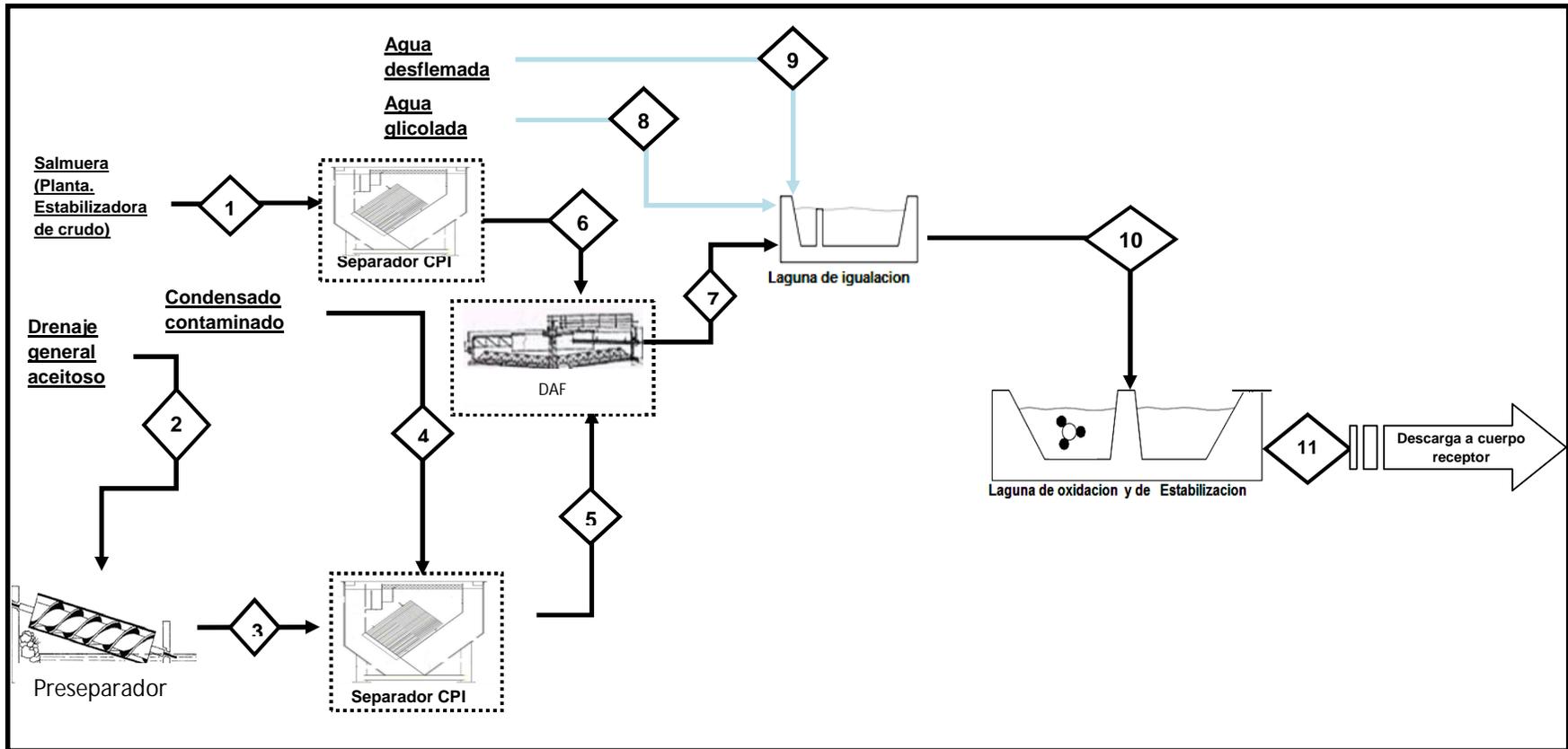


Figura 5. 4 Diagrama simplificado del tren de tratamiento propuesto



Capítulo VI. Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Con base en los objetivos perseguidos y de acuerdo a los alcances establecidos, se estudió el proceso actual de la planta de tratamiento de aguas residuales de un complejo petroquímico, identificando las etapas en las que era necesaria una adecuación, posteriormente, se evaluaron las opciones existentes para llevar a cabo la modernización de la planta de efluentes del complejo petroquímico en estudio, después de realizar el presente estudio, se concluyó lo siguiente:

- a) La problemática observada en el caso de estudio de este trabajo, puso de manifiesto, la necesidad de realizar una modernización o una rehabilitación a la planta de tratamiento de aguas residuales del complejo para operar de una forma adecuada y cumplir con la normatividad nacional vigente en materia de aguas residuales.
- b) La alternativa tecnológica de flotación por aire disuelto es idónea para incrementar la remoción de Grasas y Aceites; implementar un sistema DAF, sumado a un cambio de los antiguos separadores de placas corrugadas por nuevos CPI`s, permitiría obtener un efluente con una concentración muy baja de Grasas y Aceites (10 mg/L) y recuperar entre 1 y 2 m³ de aceite al día, esta recuperación de aceite significaría un beneficio importante para el complejo.
- c) Las alternativas tecnológicas del reactor secuencial discontinuo y del biorreactor de membrana producirían un efluente de muy



buena calidad, no obstante, la implementación de cualquiera de las dos tecnologías representaría elevados costos de inversión.

- d) En el caso del reactor secuencial, los costos de operación no serían elevados, sin embargo, el biorreactor, presentaría costos muy elevados de operación, debido principalmente al gasto de energía eléctrica, al mantenimiento y sustitución de membranas y a los químicos que necesita un sistema como éste.
- e) Por lo anterior, se determinó que en el tratamiento secundario, la mejor alternativa es rehabilitar e instrumentar las lagunas actuales e instalar los aeradores que hacen falta en la laguna de oxidación, de esta forma, no se necesitaría una inversión tan grande, y se cumpliría el objetivo de disminuir la carga de contaminantes en el efluente
- f) Finalmente, la propuesta que se eligió, en su conjunto, significaría una inversión de \$3,088,731; se ha determinado que la propuesta resultaría rentable y que la inversión se recuperaría, según los beneficios asociados, en 12 años.

Recomendaciones

1. Se recomienda que se monitoreen diariamente los parámetros más importantes (DBO_5 , Grasas y Aceites, pH) en cada etapa del proceso, ya que, de pasar los rangos establecidos, existe la probabilidad de que los sistemas sean dañados.
2. Se recomienda que se separen las corrientes del drenaje pluvial y la salida del área de efluentes, antes de descargar al cuerpo receptor, con el objetivo de que en el futuro sea posible implementar un tratamiento terciario al drenaje pluvial para poder reutilizar el agua de esta corriente dentro del complejo.



3. Se recomienda que el agua proveniente del drenaje aceitoso general, pase siempre por el preseparador de Grasas y Aceites, con el objetivo de no dañar los separadores de Grasas y Aceites.
4. En cada planta se debe tener un adecuado control de los procesos llevados a cabo y de los efluentes producidos, y en caso necesario darles un pretratamiento antes de enviarlos al área de efluentes.



BIBLIOGRAFÍA

1. Baron C., Equihua L., Mestre J. (2000). Water management Project for the use of reclaimed wastewater desalted seawater for the "Antonio Dovali Jaime" Refinery, Salina Cruz Oaxaca, México. *Water Science and Technology*. Vol. 42, pp. 29-36.
2. Bloemkolk J., Van Der Schaaf R. (1996). Design alternatives for the use of cooling water in the process industry: minimization of the environmental impact from cooling systems. *Journal of cleaner production*. Vol. 4, Issue 1, pp. 21-27.
3. Benett G., Shamass N. (2010). Separation of oil from wastewater by air flotation. *Handbook of Environmental Engineering*. Vol. 12, pp. 85-119.
4. Cheremisinoff, Nicolas P. (1994). *Biomangement of wastewaters and wastes*, Ed. Prentice Hall. E.U.A.
5. Davies M. Masten S. (2005). *Ingeniería y ciencias ambientales*. Ed. Mc. Graw Hill. España.
6. Duyvesteijn C. (1998). Water re-use in an oil refinery. *Desalination. Wastewater Technology Fact sheet*. Elsevier Science. Vol. 119. Number 1, pp. 357-358.
7. Fonade C., Rols J., Goma G., Doubrovine N., Bermejo M., Grasa J. (2000). Improvement of industrial wastewater treatment by aerated lagoon. *Case studies. Water Science and Technology*. Vol. 42. Number 5-6, pp.193-200.
8. Forero J., Ortiz O., Duque J. (2007). Design and application of flotation systems for the treatment of reinjected water in a Colombian petroleum field. *Ciencia, tecnología y future*. Vol. 3. Número 3, pp. 147-158.



9. Galil N., Wolf D. (2001). Removal of hydrocarbons from petrochemical wastewater by dissolved air flotation. *Water Science and Technology*. Vol. 43. Number 8, pp. 107-113.
10. INEGI. Estadísticas del agua en México. (2010). Disponible en el portal en internet. www.inegi.org.mx. Visitado en junio, 2010.
11. Islas I. (2007). Evaluación de opciones de modernización de una planta de tratamiento de aguas residuales municipales. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Química. UNAM.
12. Letón G., Fernández A., Rosal G., Dorado V., Villar F., Sanz G. (2006). Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. CITME. España.
13. Macarie H. (2000). Overview of the application of anaerobic treatment to chemical and petrochemical wastewaters. *Water Science and Technology*. Vol. 42. Number 5, pp.201-214.
14. Mayer L. (1987). Métodos de la industria química. Ed. Reverté. México.
15. Metcalf y Eddy (2003). Wastewater engineering. Treatment and reuse. 4ª edición. Ed. Mc Graw Hill. E.U.A.
16. Metcalf y Eddy (1994). Ingeniería sanitaria. Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales. Ed Labor. España.
17. Mijaylova P., Sandoval L., Mantilla G., Sánchez M., Garzón M., Rosengaus M., Ramírez E., Moeller G., Escalante V., Ruíz A., López R. (2001). Tratamiento primario de las aguas residuales de la refinería Francisco I. Madero. IMTA.
18. Mijaylova P., Sandoval L., González A., Garzón M., Moeller G., Fuentes M., Gómez A., García J. (2002). Tratamiento avanzado de aguas residuales y su reutilización como fuente para uso primario. IMTA.



19. Odergaard H., Rusten B., Westrum T. (1994). A new moving bed biofilm reactor – applications and results. *Water Science and Technology*. Vol. 20. Numbers 10-11, pp. 157-165.
20. Pastorelli G., Andreottola G., Canziani R., Darriulat C., Frangipane E., Rozzi A. (1997). Organic carbon and nitrogen removal in moving bed biofilm reactor. *Water Science and Technology*. Vol. 35. Number 6, pp. 91-99.
21. PEMEX, memorias de labores. Disponible en www.pemex.com. Visitado en junio, 2010.
22. Ramalho R. (1996). Tratamiento de aguas residuales. Ed. Barcelona Reverte. España.
23. Rusten B., Eikebrokk B., Ulgenes Y., Lygren E. (2006). Design and operations of the kaldnes moving bed biofilm reactors. *Aquacultural engineering*.
24. Ramírez C., Mijaylova P. (2003). Segundo curso internacional de sistemas integrados de tratamiento de aguas residuales y su reúso para un medio ambiente sustentable, IMTA.
25. Sainz S. (2004). Separación de aceites de efluentes industriales. Disponible en <http://dialnet.uniroja.es>. Visitado en julio de 2010.
26. Seóñez C. (2000). Tratado de reciclado y recuperación de productos de los residuos. Ed. Mundi-Prensa. España.
27. Schultz T. (2006). Improve oily wastewater treatment. *Hydrocarbon Processing*. Issue 11, pp. 103-111.
28. Teodosiu C., Kennedy M., Van Straten H., Schippers J. (1999). Evaluation of secondary refinery effluent treatment using ultrafiltration membranes. *Water research*. Elsevier Science. Vol. 33. Issue 9, pp. 2172-2180.



29. UNESCO. (2003). Agua para todos, agua para la vida. Informe de las naciones unidas sobre el desarrollo de recursos hídricos en el mundo.
30. Vian A. (1994). Introducción a la química industrial. Ed. Reverté. España.
31. Vives F. (2005). SBR technology for wastewater treatment: suitable operational conditions for a nutrient removal. Tesis para obtener el grado de doctora. Universidad de Girona. España.
32. Wang L., Fahey E., Wu Z. (2006). Dissolved Air Flotation. Handbook of environmental engineering. Vol. 3. E.U.A.
33. Wang J., Liu Z., Wang C. (2010). Tech-economic anylisis on anoxic/oxic membrane bioreactor for domestic wastewater treatment. International Conference in Challenges in Enviromental Science and Computer Engineering. Vol. 1. Issue 6, pp. 56-59.
34. Wong J. (2000). Testing an implementation of an advanced wastewater reclamation and recycling system in a major petrochemical plant. Water Science and Technology. Vol. 42. Numbers 5-6, pp. 23-27.
35. Zaror C. (2000). Introducción a la ingeniería ambiental para la industria de procesos. Universidad de Concepción. Chile.

**ANEXOS**

ANEXO A

Precios, Inversiones y costos

Costos variables de operación

Ahorro en consumos	Precios unitarios	P1	P2	P3
Agua pretratada	0.26 USD\$/m ³	4000	2490	4405
Ácido sulfúrico 98%	0.16 USD\$/m ³			
Sosa cáustica 50%	0.86 USD\$/m ³			
Recuperación de a agua para UDA 's	0.85 USD\$/m ³		1900	
Cloro	0.69 USD\$/m ³	12	25	12
Producción agua de enfriamiento	0.001 USD\$/m ³			
Energía eléctrica	0.08 USD\$/m ³			
Recuperación de aceite	389.86 USD\$/m ³	2	1	2



Aumento en los consumos	Precios unitarios	P1	P2	P3
Agua pretratada	0.26 USD\$/m ³	5	9	3
Vapor de Alta	18.33 USD\$/m ³	8	5	3
Energía eléctrica	0.08 USD\$/KWH		700	340
Sosa cáustica 50%	0.86 USD\$/kg	3	4	2.3
Ácido sulfúrico 98%	0.16 USD\$/kg	6	6	6
Cloro	0.69/kg	12		
Metabisulfito de sodio	1.02 USD\$/kg		25	
Hipoclorito de sodio	0.22 USD\$/kg	30	30	
Coagulante	2.69 USD\$/kg	7	11	7
Floculante	2.43 USD\$/kg	12	12	12



ANEXO B

Metodología para el cálculo de los indicadores de rentabilidad

Las fórmulas para el cálculo de los indicadores de rentabilidad a que se hace referencia en este documento son:

VPN: Valor Presente Neto

$$VPN = -F_0 + \sum_{j=1}^n \frac{F_j}{(1+i)^j}$$

- Un proyecto es rentable si el VPN es mayor que cero.
 - $VPN > 0 \Rightarrow$ Proyecto Rentable (realizarlo)
 - $VPN < 0 \Rightarrow$ Proyecto NO Rentable (desechar)
 - $VPN = 0 \Rightarrow$ Proyecto Indiferente

TIR: Tasa Interna de Retorno

- Corresponde a aquella tasa descuento que hace que el VPN del proyecto sea exactamente igual a cero.

$$0 = -F_0 + \sum_{j=1}^n \frac{F_j}{(1+TIR)^j}$$



Anexo C

Límites máximos de contaminantes permisibles a la descarga establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996 para un cuerpo receptor de tipo C.

Parámetro	NOM-001-SEMARNAT-1996
Temperatura (°C)	40
Grasas y Aceites (mg/L)	15
Materia flotante	Ausente
Sólidos sedimentables (mL/L)	1
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	75
DBO ₅ (mg/L)	75
Nitrógeno total (mg/L)	40
Fósforo total (mg/L)	20