

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

**TRABAJO PROFESIONAL**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TITULO DE:**

**INGENIERA BIOQUÍMICA**

**QUE PRESENTA:**

***DEISY VANESSA FLORES TOLEDO***

**CON EL TEMA:**

**“REDISEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES DEL COMPLEJO PETROQUÍMICO MORELOS  
PARA EL CUMPLIMIENTO DE LA NUEVA NORMATIVIDAD EN  
LAS DESCARGAS OFICIALES”**

**MEDIANTE:**

**OPCION X  
(MEMORIA DE RESIDENCIA PROFESIONAL)**

"2015, Año del Generalísimo José María Morelos Y Pavón"

DIRECCIÓN  
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas 15 de enero del 2015

OFICIO NUM. DEP-CT-490-2015

**C. DEISY VANESSA FLORES TOLEDO**  
PASANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA BIOQUÍMICA  
EGRESADO DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ.  
P R E S E N T E.

Habiendo recibido la comunicación de su trabajo profesional por parte de los CC. DR. ARNULFO ROSALES QUINTERO ,DRA. ROCÍO MEZA GORDILLO , DR. SAMUEL ENCISO SAENZ y HUMBERTO CASTAÑÓN GONZALES, En el sentido que se encuentra satisfactorio el contenido del mismo como prueba escrita, **AUTORIZO** a Usted a que se proceda a la impresión del mencionado Trabajo denominado:

**" REDISEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL COMPLEJO PETROQUÍMICO MORELOS PARA EL CUMPLIMIENTO DE LA NUEVA NORMATIVIDAD EN LAS DESCARGAS OFICIALES "**

Registrado mediante la opción:  
**X (MEMORIA DE RESIDENCIA PROFESIONAL)**

**ATENTAMENTE**  
**"CIENCIA Y TECNOLOGÍA CON SENTIDO HUMANO"**

Vo. Bo.



ING. JUAN JOSÉ ARREOLA ORDAIZ  
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE LA DIVISION DE ESTUDIOS PROFESIONALES



M. en C. JOSÉ LUIS MÉNDEZ NAVARRO  
DIRECTOR

C.c.p.- Departamento de Servicios Escolares  
C.c.p.- Expediente  
I'JLMN/I'JJAO/I'eeam



Secretaría de Educ. Pública  
Instituto Tecnológico  
de Tuxtla Gutiérrez,  
Div. de Est. Profesionales



Carretera Panamericana Km. 1080, C. P. 29680, Apartado Postal 599  
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Tels. (961) 61 54285, 61 56461  
[www.ittg.edu.mx](http://www.ittg.edu.mx)



## *Dedicatoria*

*A Dios como ser supremo y creador. Por haberme bendecido con, familia, salud, inteligencia, paciencia y empeño para poder culminar una meta más en mi vida. Gracias Señor Padre por dejarme sentir tu infinito amor en mis buenos y malos momentos.*

## Agradecimientos

*A mi Madre, le agradezco la confianza y el apoyo brindado, que sin duda me ha enseñado lo bueno y malo de la vida para saber tomar decisiones. Por amarme con mis errores, defectos y virtudes, por estar con migo en buenos y malos momentos.*

*A mi Mami María de Jesús Flores López gracias por existir en mi vida, por enseñarme afrontar mis miedos, a luchar por mis sueños, apoyarme, guiarme, corregir mis faltas y celebrar mis triunfos.*

*A mi Padre, por enseñarme que la vida es para ser feliz, por el amor y apoyo que me ha brindado en estos años, por mostrarme el camino en los malos momentos.*

*A mis Abuelitos y Abuelitas, por darme un amor incondicional, por consentirme, por tus consejos, por enseñarme a ver la vida con amor y creer en mí.*

*A mis Hermanas: Lilia, Itzel y Jessica por ser parte de mi vida, por ser la alegría de mi hogar, estar con migo en este proceso, darme ánimos para no desvanecer y demostrarme su amor.*

*A mi familia: tíos, primos, sobrinos, por ser parte del camino de mi vida, por apoyarnos y estar juntos en cada momento, por el cariño que siempre está presente.*

*A mis Amigos y Amigas, por compartir tiempo de nuestras vidas, festejar los buenos momentos y un cálido cariño en los malos ratos. Gracias por hacerme sentir su apoyo y afecto en estos años.*

*A mis Maestros, por guiarme, enseñarme hacer un profesionista con valores, por darme de su tiempo y dedicatoria para culminar una etapa más en mi vida.*

*A mi Asesor, Maestro y Amigo IQ. Luis Antonio Toledo del Castillo, muchas gracias por su apoyo, sus consejos y enseñanza para ayudarme en mi formación como profesionista y para ser un mejor humano.*

## Tabla de contenido

Índice de tablas .....	III
Índice de figuras .....	IV
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN .....	3
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO .....	5
2.1 Bases de diseño .....	5
2.2 Tratamiento primario.....	6
2.2.1 Etapa de neutralización .....	14
2.2.1.1. Neutralización del drenaje químico de óxido de etileno .....	17
2.2.1.2. Neutralización de UDAS óxido de etileno.....	18
2.2.1.3 Neutralización de pozos calientes de óxido de etileno .....	18
2.2.1.4 Neutralización de Agua residual de la planta de acrilonitrilo.....	19
2.2.1.3 Neutralización de agua residual del Complejo Pajaritos y de la Empresa Clariant.....	19
2.2.2 Control de contingencias en el proceso de neutralización .....	22
2.3 Tratamiento secundario.....	24
2.4 Tratamiento terciario .....	31
CAPÍTULO III JUSTIFICACIÓN.....	37
CAPÍTULO IV OBJETIVO.....	38
4.1 Objetivo general.....	38
4.2 Objetivo específico.....	38
CAPÍTULO V MATERIALES Y MÉTODOS .....	39
5.1 Identificar el área de proceso de la planta de tratamiento de efluentes del complejo petroquímico Morelos.....	39
5.2 Procedimiento de toma de muestra para aguas residuales de la planta de tratamiento de efluentes del complejo petroquímico Morelos .....	45
5.2.1 Identificación de las muestras.....	45
5.2.2. Preservación de la muestra .....	46
5.3 Materiales y métodos para los análisis de parámetros del agua residual de la planta de tratamiento de efluentes del complejo petroquímico Morelos.....	47

5.3.1 Determinación de pH.....	47
5.3.2 Determinación de la temperatura .....	47
5.3.3 Determinación de demanda química de oxígeno (DQO) .....	48
5.3.4 Determinación de cianuros .....	50
5.3.5 Preparación de material para la determinar solidos suspendidos totales (SST) y solidos totales volátiles (SVT).....	52
5.3.5.1 Peso constante .....	52
5.3.5.2 Preparación de la muestra .....	53
5.3.5.3 Determinación para solidos totales (ST).....	53
5.3.5.4 Determinación para SSV .....	54
5.3.5.5 Determinación para SST .....	54
5.3.5.6 Cálculo para determinar SSV y SST .....	54
5.3.6 Determinación de grasas y aceites .....	55
5.3.7 Determinación de nitrógeno total para aguas residuales .....	57
5.3.8 Análisis de demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> ).....	59
5.4 Comparación de los equipos actuales y nuevos para la planta de tratamiento de efluentes .....	60
CAPÍTULO VI RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	66
6.1 Flujo volumétrico y concentración de DQO en el tratamiento primario.....	66
6.2 Concentración de DBO en el tratamiento secundario .....	68
6.3 Concentración de grasas y aceites en el tratamiento secundario y en el efluente final.....	70
6.4 Concentración inicial de cianuros totales y en el efluente final.....	72
6.5 Concentración de solidos suspendidos totales (SST) en el tratamiento secundario y en el efluente final.....	74
6.6 Concentración de DQO en la salida del clarificador y en el fuente final .....	76
6.7 Concentración inicial de nitrógeno amoniacal y en el tratamiento secundario.....	78
6.8 Discusión de resultados para la determinación de inversión para la planta de tratamiento de aguas residuales del complejo petroquímico Morelos.....	80
CAPÍTULO VII CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES .....	84
CAPÍTULO VIII BIBLIOGRAFÍA.....	85

## Índice de tablas

<b>Tabla 2.1</b> Variables de operación en el proceso del tratamiento primario .....	8
<b>Tabla 2.2</b> corrientes de entrada para el proceso de neutralización.....	16
<b>Tabla 5.1</b> Características de los equipos del tratamiento primario.....	41
<b>Tabla 5.2</b> Características de los equipos del tratamiento secundario.....	42
<b>Tabla 5.3</b> Características de los equipos del tratamiento terciario.....	42
<b>Tabla 5.4</b> Características de corrientes hidráulicas de entrada en el tratamiento primario.....	43
<b>Tabla 5.5</b> Características de flujo de entrada de la Planta de acrilonitrilo al tratamiento primario.....	44
<b>Tabla 5.6</b> Características de flujo de entrada de la Empresa Clariant al tratamiento primario.....	44
<b>Tabla 5.7</b> Equipos de tratamiento primario.....	61
<b>Tabla 5.8</b> Equipos de tratamiento primario en la etapa de homogenización y neutralización de pH.....	62
<b>Tabla 5.9</b> Equipos de tratamiento secundario.....	63
<b>Tabla 5.10</b> Equipos de tratamiento terciario.....	64

## Índice de figuras

<b>Figura 2.1</b> Propuesta de diagrama de proceso del tratamiento primario: Separación de sólidos, grasas y aceites del tratamiento primario.....	7
<b>Figura 2.2</b> Propuesta de diagrama de proceso del tratamiento primario: homogenización de las cargas hidráulicas y neutralización de pH.....	15
<b>Figura 2.3</b> Propuesta de diagrama de proceso del tratamiento secundario .....	25
<b>Figura 2.4</b> Filtro de discos .....	32
<b>Figura 2.5</b> Propuesta de diagrama de proceso del tratamiento terciario .....	33
<b>Figura 2.6</b> Diagrama de circulación en el sistema de ultrafiltración.....	35
<b>Figura 2.7</b> Diagrama de circulación en el sistema de nanofiltración .....	35
<b>Figura 5.1</b> Diagrama de proceso de la planta de tratamiento de efluentes del complejo petroquímico Morelos.....	40
<b>Figura 5.2</b> Equipo de destilación de cianuros.....	50
<b>Figura 5.3</b> Tabla de costos de inversión para la planta de tratamiento de efluentes .....	65
<b>Figura 6.1</b> Flujo volumétrico al tratamiento primario.....	67
<b>Figura 6.1.1</b> Concentración de DQO en el tratamiento primario .....	67
<b>Figura 6.2</b> Concentración de DBO en el tratamiento secundario .....	68
<b>Figura 6.2.1</b> Concentración de DBO a la salida del tratamiento secundario .....	69
<b>Figura 6.3</b> Concentración de grasas y aceites en el tratamiento primario.....	70
<b>Figura 6.3.1</b> Concentración de grasas y aceites en el efluente final.....	71
<b>Figura 6.4</b> Concentración de cianuros totales en el tratamiento primario .....	72
<b>Figura 6.4.1</b> Concentración de Cianuros totales en el efluente final .....	73
<b>Figura 6.5</b> Concentración de solidos suspendidos totales en el tratamiento secundario.....	74
<b>Figura 6.5.1</b> Concentración de solidos suspendidos totales en el efluente final .....	75
<b>Figura 6.6</b> Concentración actual y propuesta de DQO en la salida del clarificador .....	76
<b>Figura 6.6.1</b> Concentración actual y propuesta de DQO del efluente final .....	77
<b>Figura 6.7</b> Concentración inicial de nitrógeno amoniacal .....	78
<b>Figura 6.7.1</b> Concentración de nitrógeno amoniacal en la salida del clarificador en el tratamiento secundario.....	79
<b>Figura 6.8</b> Modificación de los costos de inversión para el rediseño de la planta de tratamiento de efluentes.....	83

# CAPÍTULO I

## Introducción

El Complejo Petroquímico Morelos se encuentra ubicado en la colonia de Gavilán de Allende, en el municipio de Coatzacoalcos, Veracruz. En dicho complejo se elaboran diversos productos petroquímicos tales como etileno, óxido de etileno, glicoles, propileno, polietileno, propano, butano, isobutano, acetaldehído y acrilonitrilo. En los procesos de elaboración de estos productos se utilizan grandes cantidades de agua mismas que se contaminan con grasas, aceites y productos químicos, las cuales son enviadas a la planta de tratamiento de efluentes.

Este tratamiento de aguas residuales tipo industrial se maneja mediante tres procesos; El tratamiento primario tiene el objetivo de separar y eliminar de sólidos, grasas y aceites así también como la neutralización del pH y la homogenización de la temperatura. El agua residual al estar libre de estos contaminantes es enviada al tratamiento secundario donde se controla y reduce la demanda química de oxígeno (DQO) y la materia orgánica, por medio de lodos activados en el reactor biológico que incluye bacterias, oxígeno y nutrientes. Posteriormente el agua que es tratada en el reactor biológico se dirige hacia la clarificación, por último seguirá la trayectoria al tratamiento terciario donde por medio de un sistema de cloración disminuirá los contaminantes.

Habiendo concluido los tres procesos el efluente final tendrá las características necesarias para poder ser vertido a la Laguna de pajaritos que desemboca en el Río Coatzacoalcos.

Actualmente la planta de tratamiento de efluentes tiene la capacidad de procesar 10,900 m<sup>3</sup>/d y 20 toneladas de carga orgánica en función de la DQO. En la revisión y estudio del proyecto “Desarrollo de la ingeniería básica para la optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales del complejo petroquímico Morelos” es necesario para cumplir la nueva normatividad ambiental, mejorar las condiciones operativas y de infraestructura de dicha planta, ya que habrá un aumento del 41% de agua residual proveniente del complejo petroquímico Pajaritos.

# CAPÍTULO II

## Marco teórico

### Tratamiento de Aguas Residuales

Las aguas residuales se definen como aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos y en general de cualquier otro uso así como la mezcla de ellas (Rodríguez Monroy y Duran de Bazúa 2006)

En México en el año 2003, las industrias en todo el país descargaron alrededor de 258 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales. Esto equivale a más de 9.5 millones de toneladas de DBO, de las cuales sólo el 18% se removieron mediante los sistemas de tratamiento. A diciembre del 2004 el país contaba con 1 875 plantas de tratamiento de aguas residuales industriales, las cuales procesaban cerca de 27.4 m<sup>3</sup>/s. En 2002, las industrias que contribuyeron con mayor carga de contaminantes fueron la azucarera, la petrolera y la agropecuaria. Veracruz es el estado que contribuyó con mayores descargas y también el que procesó mayor volumen de aguas residuales cerca del 40% del total nacional. (SEMARNAT 2004)

#### 2.1 Bases de diseño

La Planta de tratamiento de efluentes del complejo petroquímico Morelos está diseñada para recibir 10 900 m<sup>3</sup>/d de aguas residuales, la descripción a continuación del tratamiento de aguas residuales en la Planta de tratamiento de efluentes se realizo para recibir 15,377 m<sup>3</sup>/d esto quiere decir un aumento del volumen de un 41% a fin de contar con disponibilidad para tratar agua residual del complejo petroquímico Pajaritos.

## 2.2 Tratamiento primario.

La selección de los procesos de tratamiento de aguas residuales dependen de un cierto número de factores, entre los que incluyen: demanda química de oxígeno (DQO), materia en suspensión, pH, productos tóxicos, calidad del efluente, coste y disponibilidad de terrenos, consideración de futuras ampliaciones o la previsión de límites de calidad de vertido más estrictos, que necesiten el diseño de tratamiento más sofisticado en el futuro. Los pretratamientos de aguas residuales implican la reducción de sólidos en suspensión o el acondicionamiento de aguas residuales para su descarga bien en los receptores o para pasar a un tratamiento secundario a través de una neutralización u homogenización. (Ramalho, R. S. 1996)

A la planta de tratamiento de aguas residuales del complejo petroquímico Morelos llegan nueve flujos de entrada al tratamiento primario los cuales son:

- Drenaje aceitoso general
- Drenaje aceitoso de efluentes
- Agua de apagado de la planta de óxido de etileno
- Drenaje químico de óxido de etileno
- Unidad des mineralizadora de aguas (UDA'S) óxido de etileno
- Pozos calientes de óxido de etileno
- Agua residual de la planta de acrilonitrilo
- Agua residual del complejo Pajaritos
- Agua residual de la empresa Clariant

El proceso del tratamiento primario se compone por tres etapas: separación de sólidos, grasas y aceites de las corrientes de flujo tipo aceitoso como se muestra en la figura 2.1, homogenización de todas las cargas hidráulicas y la neutralización de pH de las mismas.



Todos los fluidos de entrada tendrán medidor de flujo magnético, asimismo se medirán y registrarán: temperatura, presión, demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO), pH, sólidos suspendidos totales (SST) y grasas y aceites. En particular el flujo de la Planta de acrilonitrilo tendrá medición de nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) como se muestra en la siguiente tabla 2.1.

**Tabla 2.1** Variables de operación en el proceso del tratamiento primario.

<b>Variables del proceso</b>	<b>Unidad de medición</b>
<b>Flujo</b>	m <sup>3</sup> /día
<b>Temperatura</b>	°C
<b>Presión</b>	Kg/cm <sup>2</sup>
<b>Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)</b>	mg/L
<b>Demanda química de oxígeno (DQO)</b>	mg/L
<b>Nitrógeno Amoniacal (NH<sub>3</sub>-N)</b>	mg/L
<b>pH</b>	
<b>Grasas y aceites</b>	mg/L
<b>Sólidos suspendidos totales (SST)</b>	mg/L
<b>Cianuro total</b>	mg/L

Es importante conocer las variables de operación en el proceso del tratamiento primario para poder ser acondicionadas correctamente, ya que se unirán en una sola corriente para poder ser alimentado el tratamiento secundario.

Los fluidos de entrada provenientes del drenaje aceitoso general y el drenaje aceitoso de la planta de efluentes se hacen llegar por fuerza de gravedad a la planta de tratamiento de aguas residuales. Donde cada drenaje entrara al equipo criba de barras (MR-4501A/B), la función del equipo MR-4501A/B es retener los materiales sólidos de gran tamaño que tengan una medida por arriba de 2.5 cm, que pueden llegar a obstruir los mecanismos de los equipos subsecuentes.

La criba será cerrada con la finalidad de evitar emisiones de gases al medio ambiente, los cuales serán dirigidos hacia la línea de conexión del cabezal principal de succión al soplador de gases (BS-4501A/B), se contará también con línea de suministro de nitrógeno para arrastre y prevención de mezclas explosivas. Los sólidos retirados del equipo MR-4501A/B serán retirados del proceso.

La corriente de agua residual seguirá su camino siendo enviada al desarenador (TCD-4501A/B), en donde se eliminaran las arenas que sean arrastradas de la corriente de los drenajes aceitosos por medio de inyección de aire con el objetivo de fluidizar las arenas para poder ser retiradas con facilidad del proceso.

Enseguida la corriente de agua será enviada al clasificador de arenas (CN-4501A/B). Dicho equipo TCD.4501A/B contara con tapa para evitar la emisión de contaminantes hacia la atmósfera.

En el CN-4501A/B su función es separar la mayor cantidad de agua libre de arenas, para poder ser recuperada y retornada hacia el TCD-4501A/B. Las arenas separadas serán enviadas a almacén de confinamiento interno por medio del carro para transporte de arena (CTL-4501A/B).

El tercer flujo de entrada al tratamiento de aguas residuales es el Agua de apagado de la planta de óxido de etileno, la cual será conducida hacia el filtro de canasta (FL-4501A/B) con el propósito de prevenir la presencia de sólidos, pasando la corriente hidráulica a través de una canastilla, en la que se retienen los sólidos y podrá ser retirada del filtro para su limpieza. Este flujo al estar libre de sólidos será enviado al tanque separador de gas (TG-4501) funcionara principalmente para separar los gases que trae el fluido. Tendrá una válvula de seguridad, boquillas para medición de volumen, presión y temperatura.

También contará con dos salidas, una será en dirección a la línea de conexión del cabezal principal de succión para ser enviada hacia el BS-4501A/B con la finalidad de separar los gases presentes en la corriente. Y otra salida hacia el enfriador (CH-4502A/B) por medio de la bomba (BA-4519A/B), y así se disminuirá la temperatura del fluido y pasará sin ningún sólido.

Se unirán en una sola corriente el agua residual que sale del TCD-4501A/B y del CH-4502A/B para ser conducida por una misma tubería que seguirá su trayectoria por gravedad hacia el cárcamo neutralizador de drenaje aceitoso general y efluentes (TC-4501A/B). En donde una vez que se mezclan las cargas hidráulicas se tomara la medición de pH

En esta sección del proceso el TC-4501A/B contará con agitadores magnéticos (MEA-4500A/B ó MEA-4501A/B) que entraran en función cuando se adicione ácido sulfúrico al 98% o sosa al 2% para neutralización. Los agitadores no operaran simultáneamente, cada uno de ellos tendrá su relevo de tal manera que cuando se requiera la agitación para la homogenización de la adición de alguno de los químicos solo uno entrará en operación y otro estará en relevo.

Dichos agitadores magnéticos funcionaran a baja velocidad para no emulsionar el aceite con el agua y sea más fácil la separación de estas dos fases.

El pH medido en el equipo TC-4501A/B deberá estar en el rango de 5 a 9, en caso que se encuentre fuera de este rango entonces se envía la señal a las válvulas de control de flujo para suministro de ácido sulfúrico al 98% por medio de una bomba dosificadora (BDO-4516 A/B) o a la válvula de control de flujo para suministro de sosa al 2% por medio de la bomba dosificadora (BDO-4525 A/B). Estas válvulas operarán de forma alterna para dosificar sosa o el ácido sulfúrico según se requiera para neutralizar el pH.

Dicho equipo (TC-4501A/B) contará con tapa para evitar emisiones a la atmósfera y permitir la recolección de gases tóxicos emitidos que serán enviados al BS- 4501A/B. A la salida de este equipo se medirá, indicará y registrará el valor pH, grasas y aceites.

En esta primera sección del tratamiento primario se tiene a disposición un cárcamo regulador de demasías (CDR-4501) contará con instrumentación de nivel de flujo, un desnatador (DES-4501) y equipo de bombeo para desalojar el agua del cárcamo. Entrará en operación cuando exista flujo de más del drenaje aceitoso general, tendrá la capacidad suficiente para contener el 50% de volumen de este drenaje. También se usara para recibir el 50% de volumen del TC-4501A/B para dar mantenimiento de dicho equipo, habiendo pasado el mantenimiento se retornara el flujo al TC-4501A/B para seguir con el proceso.

El agua residual que saldrá del equipo TC-4501A/B llegará por gravedad al separador de grasas y aceites de placas corrugadas (CPI-4501A/B/C). El principio fundamental es separar las grasas y aceites maximizando el área de contacto entre las partículas por medio de placas corrugadas, cuando estas tengan cierta acumulación de grasas el mismo flujo las desprenderá y se desplazarán hacia la superficie donde serán recuperadas.

El aceite que será recuperado del equipo CPI-4501A/B/C se enviará por gravedad al Cárcamo de aceite-agua (TB-4504), posteriormente por medio de una bomba se enviara a los Tanques decantadores de aceite recuperado (TH-4506A/B/C/D). En estos tanques se separa el aceite recuperado y es dirigido hacia una bomba al Tanque de aceite recuperado (TV-4502), para ser finalizados a servicios auxiliares de la planta de tratamiento de efluentes.

Los lodos aceitosos sedimentados en los CPI-4501A/B/C se enviaran al cárcamo de lodos primarios (TB-4505) por medio de una bomba. Este cárcamo se utiliza para acumular las purgas de lodos generados por los equipos CPI-4501A/B/C y TC-4501A/B

y por medio de una bomba se envía a la centrifuga de lodos primario (CEL-4501A/B), para deshidratar los lodos es decir retirar la mayor cantidad de agua posible, reduciendo su volumen y así lograr una concentración hasta un 25% para su envío al carro transportador de lodos (CTL-4502 A/B).

El agua que es retirada de los lodos en la CEL-4501A/B es enviada al TC-4501A/B para incorporarse al proceso. Y los gases que se generan en el CPI-4501 A/B serán enviados por medio de una línea que se conecta a un cabezal principal de succión hacia el BS-4501A/B para evitar daños al ambiente y a la salud del personal. El equipo CPI-4501A/B/C tendrá tapa hermética, analizadores de grasas y aceites, con la finalidad de contar con puntos de comparación con respecto a la entrada y tomar las acciones necesarias para la remoción de las grasas y aceites se realice de forma eficiente.

El agua aceitosa que sale del equipo CPI-4501A/B/C es conducida al separador de grasas y aceites por gas inducido (IGF-4501 A/B/C), el mecanismo es por medio de flotación cuya operación unitaria es utilizada para separar las partículas líquidas o sólidas de baja densidad de una fase líquida. La separación se consigue introduciendo burbujas finas de gas en la fase líquida. Las burbujas se adhieren a las partículas y la fuerza ascendente del conjunto de partículas y burbujas de gas es tal, que hace que la partícula ascienda a la superficie. De esta forma se pueden remover partículas de densidad menor que el líquido. Una vez que las partículas se hallan en la superficie, pueden recogerse mediante un rascador superficial (Metcalf – Eddy, 1991)

El funcionamiento de dicho equipo es remover las grasas y aceites que se encuentran en forma de emulsión. Por medio de la adición de nitrógeno para desestabilizar las emulsiones, provocando que la posibilidad de choque entre las gotas de aceite aumenten formando flóculos y se eleven hacia la superficie para que sean retirados mediante compartimientos de recuperación de grasas y aceites.

En el Cárcamo de almacenamiento de aceite contaminado (TB-4503) se colectara el aceite contaminado por químicos usados en la operación de los IGF-4501 A/B/C, este aceite será sacado del TB-4503 con una Bomba rotatoria de aceite contaminado (BR-4502 A/B) para llenar los tambos que serán llevados al almacenamiento de disposición interna. El agua libre de grasas y aceites que sale de los IGF-4501 A/B/C se enviara a la última etapa del tratamiento primario, la neutralización del pH en el Cárcamo de neutralización fina (TZ-4502A/B).

### **2.2.1 Etapa de neutralización**

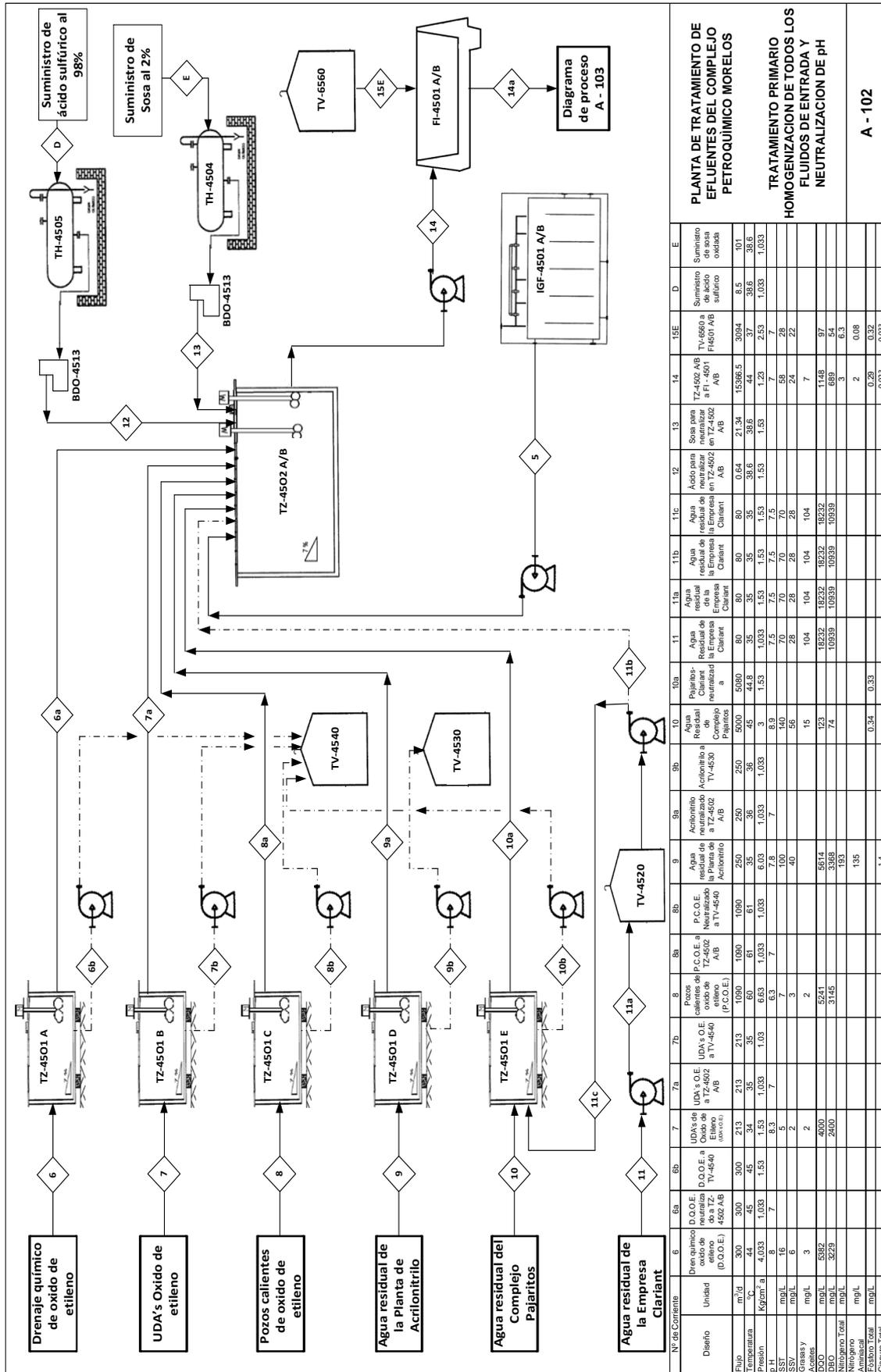
La etapa de neutralización tiene la finalidad de controlar el pH de los fluidos de entrada a la planta de tratamiento de efluentes. El sistema deberá operar en dos acciones: Disminuir las características alcalinas de cada flujo de entrada desde pH máximo de 14 hasta un pH de 8.5 y efectuar el incremento del pH de un intervalo de pH mínimo de 1 hasta 6.

Ambos sistemas ejecutan para mantener el pH en un rango entre 6 a 8.5 antes de su envío al tratamiento secundario.

En la figura 2.2 se muestra con detalle el desarrollo del proceso de homogenización de todos los fluidos de entrada, y neutralización de pH de las siguientes fluidos de entrada al tratamiento primario:

- Drenaje químico de óxido de etileno.
- Unidad des mineralizadora de agua de óxido de etileno. (UDAS Óxido de Etileno)
- Pozos calientes de óxido de etileno.
- Agua residual de la planta de acrilonitrilo.
- Agua residual del complejo Pajaritos.
- Agua residual de la empresa Clariant.

De acuerdo a las características alcalinas o ácidas que puedan presentar las corrientes que llegan a esta etapa, se neutralizaran con ácido sulfúrico al 98% y sosa al 2%. Se tendrá un tanque para el ácido sulfúrico al 98% (TH-4505) y un tanque de sosa al 2%(TH-4504).



**Figura 2.2** Propuesta de diagrama de proceso del tratamiento primario: Homogenización de las cargas hidráulicas y neutralización del pH (Adaptado del proyecto desarrollo de la ingeniería básica para la optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales del complejo petroquímico Morelos, 2011)

El ácido sulfúrico al 98% provendrá del suministró de ácido sulfúrico y el reactivo sosa al 2% se obtendrá del tanque de sosa oxidada (TV-4503) que se encuentra instalado en la planta de oxidación de sosas gastadas, proporcionara sosa al 50% y será diluida con agua de servicios auxiliares en el tanque de sosa oxidada (TV-4550), para obtener sosa al 2%, por medio de una bomba será enviada al tanque TH-4504 para poder neutralizar el pH de los flujos de entrada al tratamiento.

Las corrientes provenientes de la planta de óxido de etileno (drenaje químico, UDAS y pozos calientes), así como la corriente de agua residual proveniente de la planta de acrilonitrilo, complejo Pajaritos y de la Empresa Clariant; llegarán cada una a su respectiva tina de neutralización independiente para su ajuste de pH como se describe a continuación en la tabla 2.2

**Tabla 2.2** Corrientes de entrada para el proceso de neutralización.

<b>Corriente de entrada</b>	<b>Equipo</b>	<b>Identificación del equipo</b>
<b>Drenaje químico de óxido de etileno</b>	Tina de neutralización de drenes químicos de óxido de etileno	TZ-4501 A
<b>UDAS óxido de etileno</b>	Tina de neutralización de UDAS Óxido de etileno	TZ-4501 B
<b>Pozos calientes de óxido de etileno</b>	Tina de neutralización de Pozos calientes de Óxido de etileno	TZ-4501 C
<b>Agua residual de la Planta Acrilonitrilo</b>	Tina de neutralización de Acrilonitrilo	TZ-4501 D
<b>Agua residual del Complejo Pajaritos</b>	Tina de neutralización de Pajaritos y Clariant	TZ-4501 E
<b>Agua residual de la Empresa Clariant</b>		

Para el control adecuado del pH cada tina de neutralización tendrá registro de pH en el flujo de entrada, por medio de bombas dosificadoras que suministrarán de ácido sulfúrico al 98% ó sosa al 2% cuando sea necesario, así mismo tendrá dos agitadores uno en relevo y otro en operación ya que es necesario para homogenizar la mezcla y lograr el objetivo de la neutralización del pH.

### **2.2.1.1 Neutralización del drenaje químico de óxido de etileno**

La corriente de drenaje químico de óxido de etileno llegará a TZ-4501 A, se medirá y registrara el valor de pH del afluente, si el pH es mayor a 10.5 se dosificara con ácido sulfúrico al 98% proveniente de BDO-4518 A/B que contara con válvula de control ajustando de manera gradual el flujo de ácido hasta ajustar el pH a 9. Si el pH se encuentra entre 10.5 - 4 no se realizará ninguna adición. En casi que el pH de la corriente sea menor a 4 se dosifica sosa 2% mediante BDO-4526 A/B hasta llegar a un valor de pH 5, se tendrá el control del flujo de sosa al 2% mediante una válvula.

En dicho equipo TZ-4501 A también se llevará el control de la carga orgánica, mediante la medición de DQO y el flujo volumétrico que se encuentra en la TZ-4501 A. Si el valor de la carga orgánica es menor al límite establecido (1645 Kg DQO/d) la corriente se bombeará al cárcamo de neutralización fina (TZ-4502 A/B) o de lo contrario se enviara al tanque de contingencia (TV-4540). Se requiere que la bomba de alimentación al TV-4540 tenga recirculación a la TZ-4501 A para que el flujo excedente sea neutralizado el pH.

### **2.2.1.2 Neutralización del UDAS óxido de etileno**

Para la neutralización del afluente de UDAS óxido de etileno llegara a la TZ-4501 B, donde se medirá y registrará el pH. Si el pH es mayor a 10.5 se dosificara con ácido sulfúrico al 98% proveniente de la BDO-4515 A/B que contara con válvula de control, ajustando de manera gradual el flujo de ácido hasta ajustar el pH a 9. Si el pH se encuentra entre 10.5 y 6 no se realizará ninguna adición. En caso que el pH de la corriente sea menor a 4 se dosifica sosa 2% mediante BDO-4523 A/B hasta llegar a un valor de pH 5. Si el pH está entre 4 y 6 se dosificara con sosa al 2% mediante la BDO 4529 A/C hasta tener un valor de pH 5. Se tendrá el control del flujo de sosa al 2% mediante una válvula

También se llevará el control de la carga orgánica en TZ-4501 B si el valor de la carga orgánica es menor al límite establecido (852 Kg DQO/d) la corriente se bombeara al TZ-4502 A/B o de lo contrario se enviara al TV-4540. Se requiere que la bomba de alimentación al TV-4540 tenga recirculación a la TZ-4501 B para que el flujo excedente sea neutralizado el pH.

### **2.2.1.3 Neutralización de pozos calientes de óxido de etileno**

En la neutralización del flujo de entrada Pozos calientes de óxido de etileno llegara a la TZ-4501 C, donde se medirá y registrará el pH. Si el pH es mayor a 10.5 se dosificara con ácido sulfúrico al 98% proveniente de la BDO-4519 A/B que contara con válvula de control, ajustando de manera gradual el flujo de ácido hasta ajustar el pH a 9. Si el pH se encuentra entre 10.5 y 6 no se realizará ninguna adición. En caso que el pH de la corriente sea menor a 4 se dosifica sosa 2% mediante BDO-4527 A/B hasta llegar a un valor de pH 5. Si el pH está entre 4 y 6 se dosificara con sosa al 2% mediante la BDO 4529 B/C hasta tener un valor de pH 5. Se tendrá el control del flujo de sosa al 2% mediante una válvula.

También se llevará el control de la carga orgánica en TZ-4501 C si el valor de la carga orgánica es menor al límite establecido (5713Kg DQO/d) la corriente se bombeara al TZ-4502 A/B o de lo contrario se enviara al TV-4540. Se requiere que la bomba de alimentación al TV-4540 tenga recirculación a la TZ-4501 C para que el flujo excedente sea neutralizado el pH.

#### **2.2.1.4 Neutralización de agua residual de la planta acrilonitrilo.**

En la neutralización del Agua residual de la Planta acrilonitrilo llegara al equipo TZ-4501 D, donde se medirá y registrará el pH. Si el pH es mayor a 10.5 se dosificara con ácido sulfúrico al 98% proveniente de la BDO-4514 A/B que contara con válvula de control, ajustando de manera gradual el flujo de ácido hasta ajustar el pH a 9. Si el pH se encuentra entre 10.5 y 4 no se realizará ninguna acción. En caso que el pH de la corriente sea menor a 4 se dosifica con sosa 2% mediante BDO-4522 A/B hasta llegar a un valor de pH 5.

Al igual se llevará el control de la carga orgánica en TZ-4501 D, si el valor de la carga orgánica es menor al límite establecido (1459 Kg DQO/d) la corriente se bombeara al TZ-4502 A/B, de lo contrario se enviara al TV-4530. Se requiere que la bomba de alimentación al TV-4530 tenga recirculación a la TZ-4501 D para que el flujo excedente sea neutralizado el pH.

#### **2.2.1.5 Neutralización de agua residual del complejo Pajaritos y de la empresa Clariant.**

En Agua residual de la empresa Clariant se recibe en forma intermitente por medio de pipas, con ayuda de la bomba de alimentación (BA-4518 A/B) llegara el flujo al tanque receptor de agua residual de Clariant (TV-4520).

El cual tendrá instrumentación para la medición de nivel de flujo, DQO, DBO y pH. Si el valor del pH se encuentra entre 6 y 8.5 se enviara directamente al TZ-4502 A/B en caso que se encuentre fuera de este rango se enviara por medio de una bomba al TZ-4501 E, donde se mezclara y neutralizara de manera conjunta con el afluente de entrada del agua residual del complejo Pajaritos, para ser compensada la carga orgánica en TZ-4501 E. Ya que la corriente del complejo Pajaritos llegara con alto nivel volumétrico y baja carga orgánica. Y la corriente de la empresa Clariant llega con bajo nivel de flujo y alta carga orgánica.

Antes de ser mezcladas las corrientes de la empresa Clariant y del complejo Pajaritos. Se llevará el control de la carga orgánica, si el valor es mayor a 615 Kg DQO/d del agua residual del complejo Pajaritos el flujo de exceso será bombeado al TV-4540. Se requiere que la bomba de alimentación al TV-4540 tenga recirculación a la TZ-4501 E para que el flujo excedente sea neutralizado el pH.

Habiendo llegado el flujo a neutralizar al equipo TZ-4501 E, se medirá y registrará el pH. Si el pH es mayor a 10.5 se dosificara con ácido sulfúrico al 98% proveniente de la BDO-4520 A/B que contara con válvula de control, ajustando de manera gradual el flujo de ácido hasta ajustar el pH a 9. Si el pH se encuentra entre 10.5 y 4 no se realizará ninguna acción. En caso que el pH de la corriente sea menor a 4 se dosifica con sosa 2% mediante BDO-4528 A/B hasta llegar a un valor de pH 5. Teniendo el pH deseado el flujo del equipo TZ-4501 E será enviado al TZ-4502 A/B.

Después que cada corriente es neutralizada como ya se describió, y el agua residual que sale de los IGF-4501 A/B/C es dirigida a un sistema de bombeo conformado por las bombas (BA-4550) que enviara el agua residual a una segunda etapa de neutralización en el Cárcamo de neutralización fina (TZ-4502), para asegurar la neutralización total de las corrientes que se enviará hacia el tratamiento secundario.

En el equipo TZ-4502 donde se llevara a cabo el mezclado por medio de agitadores magnéticos (MEA-4508A/B y MEA-4509A/B) a baja velocidad, el motor del agitador estará programado al sistema de control de pH, para su arranque siempre que exista dosificación de ácido o sosa en el equipo, también contara con tapa para protección al medio ambiente.

El TZ-4502 tiene como finalidad controlar el pH de 6.5 a 8.5, debido a que todas las corrientes tratadas anteriormente llegaran con una neutralización parcial. Después de ser mezclados los flujos en el TZ-4502, se medirá y registrara el pH del flujo. Si el pH se encuentra entre 6.5 a 8.5 no se realizara ninguna acción, pero si el pH se encuentra por debajo de 6 se neutralizara con sosa al 2% por medio de la bomba dosificadora (BDO-4521 A/B). De lo contrario si el valor de pH es mayor a 8.5 se neutralizara con ácido sulfúrico al 98% por medio de una bomba dosificadora (BDO-4513 A/B).

El agua residual que saldrá del TZ-4502 será enviado por gravedad a las Fosas de igualación (FI-4501 A/B) con una de capacidad de 7020 m<sup>3</sup>. La finalidad de este equipo es homogenizar la concentración de contaminantes es decir la carga orgánica y la carga hidráulica que puedan presentarse.

El afluente de FI-4501 A/B tendrá un tiempo de retención hidráulica de 11 horas, calculado mediante la fórmula 2.1 (Ramalho, R. S. 1996). Para que la concentración de contaminantes sea homogénea en toda la carga, así como para evitar el choque de contaminantes que puedan afectar a los reactores biológicos en el tratamiento secundario.

$$t_h = \frac{V}{Q} \quad 2.1$$

$t_h$  = Tiempo de retención hidráulico (horas)  
 $V$  = Volumen del líquido en el estanque (m<sup>3</sup>)  
 $Q$  = Flujo de alimentación (m<sup>3</sup>/hr)

Al haber concluido el tiempo de retención se enviara por medio de una bomba (BA-4503 A/B/C) al tratamiento secundario hacia el reactor biológico (RB-4501 A/B) con un flujo de 18,461 m<sup>3</sup>/d, siempre y cuando se haya cumplido con la carga orgánica total de la planta que es de 20 000 Kg/d. la temperatura de dicha corriente será de 40°C y tendrá una presión de 2.53 Kg/cm<sup>2</sup>a

Al equipo FI-4501 A/B también llegara el agua de rechazo procedente del tanque de transferencia de agua de rechazo de ultrafiltración y nanofiltración (TV-6560), que se explicara en el apartado del tratamiento terciario.

### **2.2.2 Control de contingencias en el proceso de neutralización.**

En cada etapa del proceso de tratamiento primario se tendrá como prevención un control de contingencia, que puede darse por el aumento en la carga orgánica medida en Kg DQO/día de las diversas corrientes de entrada a las tinas de neutralización. Como se mencionó anteriormente se tendrá el análisis de DQO y el nivel volumétrico de todos los fluidos entrantes. Por lo que se podrá detectar cualquier contingencia de este tipo.

La variable de control de carga orgánica está compuesta en dos variables que se realizaran en la Planta de Tratamiento de Efluentes el análisis de DQO (mg/l) y flujo volumétrico (m<sup>3</sup>/día). Con estas dos variables se calculará la carga orgánica que presente cada corriente de entrada por medio de la fórmula 2.2 y así poder tomar las medidas necesarias para el control de contingencia

$$\text{Carga orgánica} = \frac{\text{Concentración de DQO} * \text{Flujo volumétrico}}{1000} \quad 2.2$$

Carga orgánica = Kg DQO /día

Concentración de DQO = mg/l

Flujo volumétrico = m<sup>3</sup>/día

Se llevara a cabo el control de contingencia cuando la carga orgánica del drenaje químico de óxido de etileno sea mayor a 1945 Kg DQO/d, UDAS de óxido de etileno supere los 852 Kg DQO/d y pozos calientes de óxido de etileno tenga más de 5713 Kg DQO/d se enviara de forma automática el agua residual al tanque de contingencia (TV-4540), tendrá una capacidad de 3,741 m<sup>3</sup> para almacenar el excedente de volumen, equivalente a la carga orgánica antes mencionada.

El criterio de vaciado del TV-4540 es dosificando la carga orgánica faltante a la sumatoria preestablecida de las corrientes provenientes de la planta de óxido de etileno

También puede ocurrir que el instrumento de medición tenga una falla, por lo que se requiere que se tenga un programa de calibración para el caso de los medidores de flujo y el mantenimiento a los elementos de medición de DQO. Para este último caso se tendrá el respaldo de los resultados del instrumento con el análisis de DQO en laboratorio.

En el caso del agua residual de la planta de acrilonitrilo se tomara el control de contingencia cuando la carga orgánica sea mayor 1459 Kg DQO/d, enviando automáticamente al tanque de contingencia (TV-4530) con la capacidad de 1 091 m<sup>3</sup>, en cual se almacenara el excedente de volumen, equivalente a la carga orgánica establecida. Una vez pasada la contingencia se vaciara el TV-4530, dosificando la carga orgánica faltante a la sumatoria preestablecida del total de las cargas orgánicas.

Si el agua residual del complejo Pajaritos presenta un aumento mayor 615 Kg DQO/d de carga orgánica, se podrá enviar el excedente al TV-4540 para no afectar al tratamiento secundario.

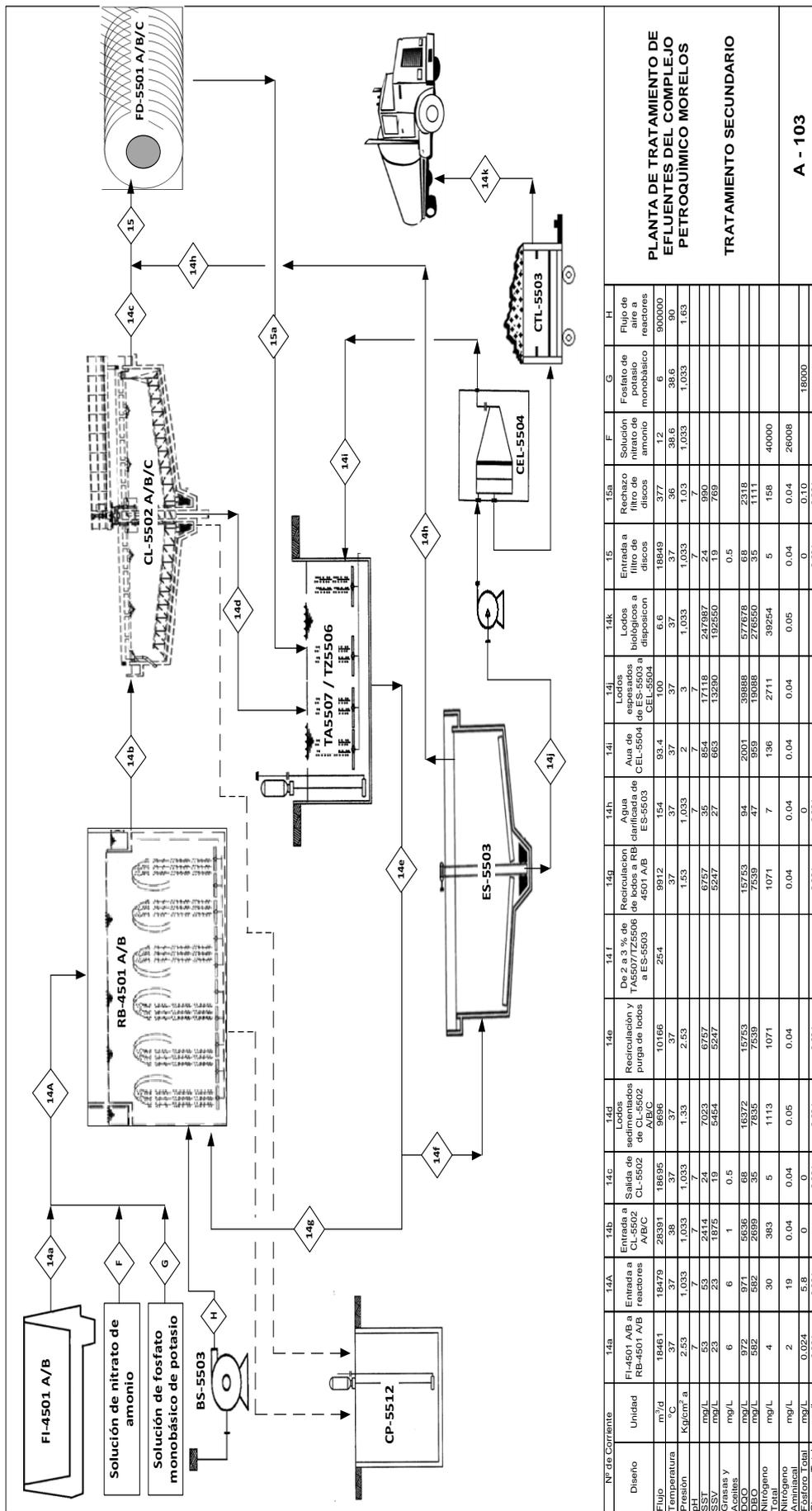
## 2.3 Tratamiento secundario

El tratamiento secundario se refiere a todos los procesos de tratamiento biológico de las aguas residuales tanto aerobio como anaerobio. El proceso de lodos activados ha sido utilizado para el tratamiento de las aguas residuales tanto industriales como urbanas desde hace aproximadamente un siglo.

Este proceso nació de la observación realizada hace mucho tiempo de que si cualquier agua residual, urbana o industrial, se somete a aireación durante un periodo de tiempo se reduce su contenido de materia orgánica, formándose a la vez un lodo floculento. El examen microscópico de este lodo revela que está formado por una población heterogénea de microorganismos, que cambian continuamente en función de las variaciones de la composición de las aguas residuales y de las condiciones ambientales. El proceso de lodos activos se ha desarrollado como una operación continua mediante el reciclado de lodo biológico (Ramalho, R. S. 1996).

El tratamiento secundario tiene el objetivo de remover la materia orgánica soluble e insoluble presentes en el agua mediante el reactor biológico (RB-5501 A/B), el cual tiene un proceso de reacción bioquímica por medio de un sistema de aireación y lodos activados, después de este proceso el agua tratada que saldrá de los RB-5501 A/B se enviara a clarificación mediante separación, por sedimentación de los sólidos presentes, que son en su mayoría lodos biológicos, producto de la actividad microbiana en los RB-5501 A/B.

Para llevar a cabo el adecuado funcionamiento de la actividad microbiana dentro de dichos reactores, es necesario garantizar nutrientes, mezclado y suministro de oxígeno, el caudal al ser tratado pasa a él clarificador donde los lodos son sedimentados, una parte es recirculada a los reactores biológicos y la otra será tratada de forma independiente para su disposición final, como se puede observar en la figura 2.3.



**Figura 2.3** Propuesta de diagrama propuesta de proceso del tratamiento secundario (Adaptado del proyecto desarrollo de la ingeniería básica para la optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales del complejo petroquímico Morelos, 2011)

El agua residual neutralizada proveniente de la fosa de igualación (FI-4501 A/B) del tratamiento primario llegara por medio de las bombas (BA.4503 A/B/C) al RB-5501 A/B, esta corriente entrante contara con medición de nivel de flujo, presión, temperatura, DQO,  $\text{NH}_4^+$ , pH, DBO y fosfatos ( $\text{PO}_4$ ) con la finalidad de contar con las características de entrada al tratamiento secundario.

El quipo RB-5501 A/B está constituido por dos reactores, cada uno por tres cámaras, que dan un volumen de operación en el reactor total de  $30\,000\text{m}^3$ . Esto quiere decir que cada reactor tendrá una capacidad de  $15000\text{m}^3$  y en consecuencia  $5000\text{m}^3$  por cada cámara de reacción. Teniendo en cuenta un flujo de llegada al tratamiento secundario de  $18479\text{m}^3/\text{d}$  a cada cámara de reacción llegara  $3,080\text{m}^3/\text{d}$ , operará de manera independiente con un tiempo de residencia hidráulica de 1.6 días cada cámara de reacción. Se tendrá medidor de flujo tipo ultrasónico, analizadores de pH, DBO, DQO y SST. El analizador para el parámetro SST se colocará en la parte media de cada cámara.

También se medirán sales de nitrógeno y sales de fosforo con la finalidad de controlar la alimentación de nutrientes en los RB-5501 A/B.

Una variable importante para la degradación de la materia orgánica en los reactores, es la temperatura de la corriente de entrada, por lo tanto se analizara esta variable a la entrada del flujo, mediante un sistema automático de medición y monitoreo para poder tomar las medidas necesarias en el proceso.

Dentro de cada una de las cámaras se medirá y registrara el oxígeno disuelto y el pH en tres puntos, 25%, 50%, 75% a lo largo de cada cámara. Estos analizadores que colocaran a la profundidad que requiera el instrumento.

El contenido de materia orgánica que pueda contener el flujo de agua residual, se calculara a la entrada del RB-5501 A/B, con la medición del flujo y de la DQO, como se explicó en la fórmula 2.2 anteriormente, para saber la materia orgánica total que entrara al proceso. Con la medición y monitoreo se estos parámetros se llevará a cabo un control más preciso de la cantidad de nutrientes a suministrar en los RB-5501 A/B para evitar un adición excesiva o una concentración mayor en el efluente final que incumpla con la calidad de agua requerida por los límites establecidos en la nueva normatividad del efluente final.

En el momento de la llegada del agua residual al RB-5501 A/B se adiciona una línea de nutrientes con la finalidad de aprovechar la turbulencia de la corriente, para ser mezclados. La línea de nutrientes tendrá medidor de flujo magnético y apertura o cierre de válvulas para garantizar el suministro necesario de nitrógeno y fosforo como nitrato de amonio y fosfato de potasio monobásico respectivamente, la adición de estos nutrientes se hará en base a la concentración de DBO en el agua de entrada de los reactores, tratando de mantener una relación DBO/N/P de 100/5/1 (Jenkins D., Richard M.G. 2004)

El sistema de medición y registro calculara el nitrógeno requerido como el 5% de la carga de DBO a la entrada del reactor. Con el registro de  $\text{NH}_4^+$  se calculará el nitrógeno en el fluido de entrada.

Con estos dos datos se calculará el nitrógeno faltante como la diferencia entre el nitrógeno requerido y el que contiene la corriente proveniente del FI-4501 A/B. A partir del nitrógeno faltante y con la concentración conocida de nitrógeno en la solución de nitrato de amonio, se calcula el flujo requerido de la solución de nitrato de amonio a dosificar para cada cámara del reactor.

El control para la adición de sales de fósforo (fosfato de potasio monobásico), se iniciara con el cálculo de fosforo requerido como el 1% de la carga de DBO del flujo de entrada al equipo RB-5501 A/B. A partir del fosforo requerido y con la concentración conocida de fosforo en la solución de fosfato de potasio, se calculara el flujo requerido de esta solución a dosificar.

Es muy importante cumplir con el suministro de aire necesario hasta obtener una concentración mínima de 1.5 a 2 mg/l de oxígeno disuelto para lograr la eficiencia óptima de la reacción bioquímica en los reactores. Se suministrará aire por medio de sopladores (BS-5503 A/B/C/D/E/F), con un flujo de 900 000 m<sup>3</sup>/día a una presión de descarga de 0.6 Kg/cm<sup>2</sup> y una temperatura aproximada de 90°C. La distribución del aire en las cámaras de reacción será realizada con difusores de tipo tubo de burbuja fina y la temperatura del líquido en los reactores será de aproximadamente 40°C. En dichos sopladores (BS-5503 A/B/C/D/E/F) cuenta con interruptores para apertura y cierre de la válvula según la presión requerida en los difusores y el mezclado.

El agua residual que ha sido procesada en el RB-5501 A/B con un flujo de 28 391 m<sup>3</sup>/d será enviada a los tres clarificadores (CL-5502 A/B/C) cada clarificador tendrá una carga hidráulica de 9,464 m<sup>3</sup>/d. Con el objetivo de separar los lodos biológicos del licor mezclado, mediante la sedimentación de los sólidos suspendidos, los cuales son espesados en el fondo de cada clarificador para obtener agua clarificada.

Deberá controlarse el nivel de lodos biológicos en los clarificadores, es decir, a una altura de cama de lodos adecuada, se instalará un medidor de nivel de lodos tipo optoelectronico.

El propósito de los equipos CL-5502 A/B/C se cumple sedimentando y concentrando los lodos biológicos en el fondo del equipo con un porcentaje de 0.6 a 1 % en peso de sólidos y un flujo total de 9 696 m<sup>3</sup>/d (3 232 m<sup>3</sup>/d cada clarificador) El punto de control será lograr la máxima sedimentación de los lodos biológicos. A la salida de los CL-5502 A/B/C se tendrá una línea de analizadores de DQO, DBO, PO<sub>4</sub> y NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, para poder evaluar la eficiencia de remoción del sistema completo reactores y clarificadores.

Los lodos espesados en el fondo de los clarificadores con un flujo de 9 696 m<sup>3</sup>/d serán enviados por gravedad al cárcamo para retorno de lodos (TA-5507/TZ-5506) con la función de conservar oxigenados los lodos para mantenerlos activos, por lo que se instala difusores para proporcionar 4320 m<sup>3</sup>/d de aire y se tendrá un mezclado suave. Para mantener una concentración adecuada de SSV en los reactores, es necesario efectuar una recirculación de los lodos sedimentados en los clarificadores y contenidos en TA-5507/TZ-5506.

El flujo de retorno de lodos biológicos será el 53% de carga hidráulica total conformada por el flujo de salida del equipo FI-4501 (del tratamiento primario) y del suministro de nutrientes para la entrada a los RB-5501 A/B. Esta recirculación se logra por medio de las bobas (BA-5519) para ser enviada a cada una de las cámaras de los RB-5501 A/B.

El flujo de la purga de lodos proveniente del equipo TA-5507/TZ-5506 es enviado mediante una bomba (BA-5509 A/B/C) al espesador de lodos (ES-5503) con la finalidad de concentrar la corriente de lodos.

El lodo espesado en el fondo del ES-5503 saldrá con un contenido de 3% a 5% en peso sólido y se enviará a deshidratación por medio de la bomba (BA-5510 A/B) a la centrifuga de lodos (CEL-5504) para concentrar los lodos. El agua clarificada resultante de la deshidratación será retornada al equipo TA-5507/TZ-5506.

El producto de la centrifugación tendrá una consistencia pastosa con una concentración de sólidos de un 20% a un 25% en peso, estos lodos se dispondrán para ser recolectados por camiones.

El agua clarificada obtenida de los equipos CL-5502 A/B/C tendrá un flujo total de 18695 m<sup>3</sup>/d y una concentración máxima de SST de 24 mg/l, será enviada por gravedad al Filtro de discos (FD-6501) del tratamiento terciario y se unirá por gravedad la corriente de salida del ES-5503 como agua clarificada con un flujo de 154 m<sup>3</sup>/d.

Se contará con un Cárcamo de lodos biológicos (CP-5512) con una capacidad de 350 m<sup>3</sup>, se utilizará solo en caso de mantenimiento de los TA-5507/TZ-5506 o en caso que se requiera purgar una de las cámara del RB-5501 A/B.

## 2.4 Tratamiento Terciario

La cloración es un proceso muy usado en el tratamiento de aguas residuales industriales y urbanas. Algunos efluentes industriales que normalmente se cloran antes de su descarga a los guas receptores. Los objetivos de la cloración son:

- Desinfección: el cloro es un desinfectante debido a su fuerte capacidad de oxidación, por lo que destruye o inhibe el crecimiento de bacterias y algas.
- Reduce la DBO: por reducción de compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales.
- Eliminación o reducción de colores y olores: las sustancias que producen olor y color presentes en las aguas residuales se oxidan mediante el cloro.
- Oxidación de los iones metálicos: los iones metálicos que están presentes en forma reducida se oxidan por el cloro (por ejemplo, ferroso a férrico y manganoso a mangánico).

Cuando se añade cloro al agua como gas o solución, el cloro reacciona para formar ácido hipocloroso (HOCl), que subsiguientemente se disocia de acuerdo con las siguientes reacciones químicas:

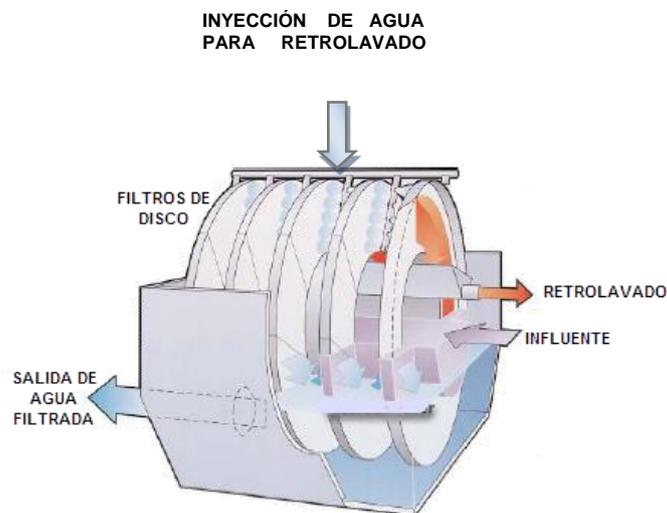


Como el HOCl es un ácido débil, una parte importante del cloro residual está formada por HOCl sin disociar (Ramalho, R. S. 1996).

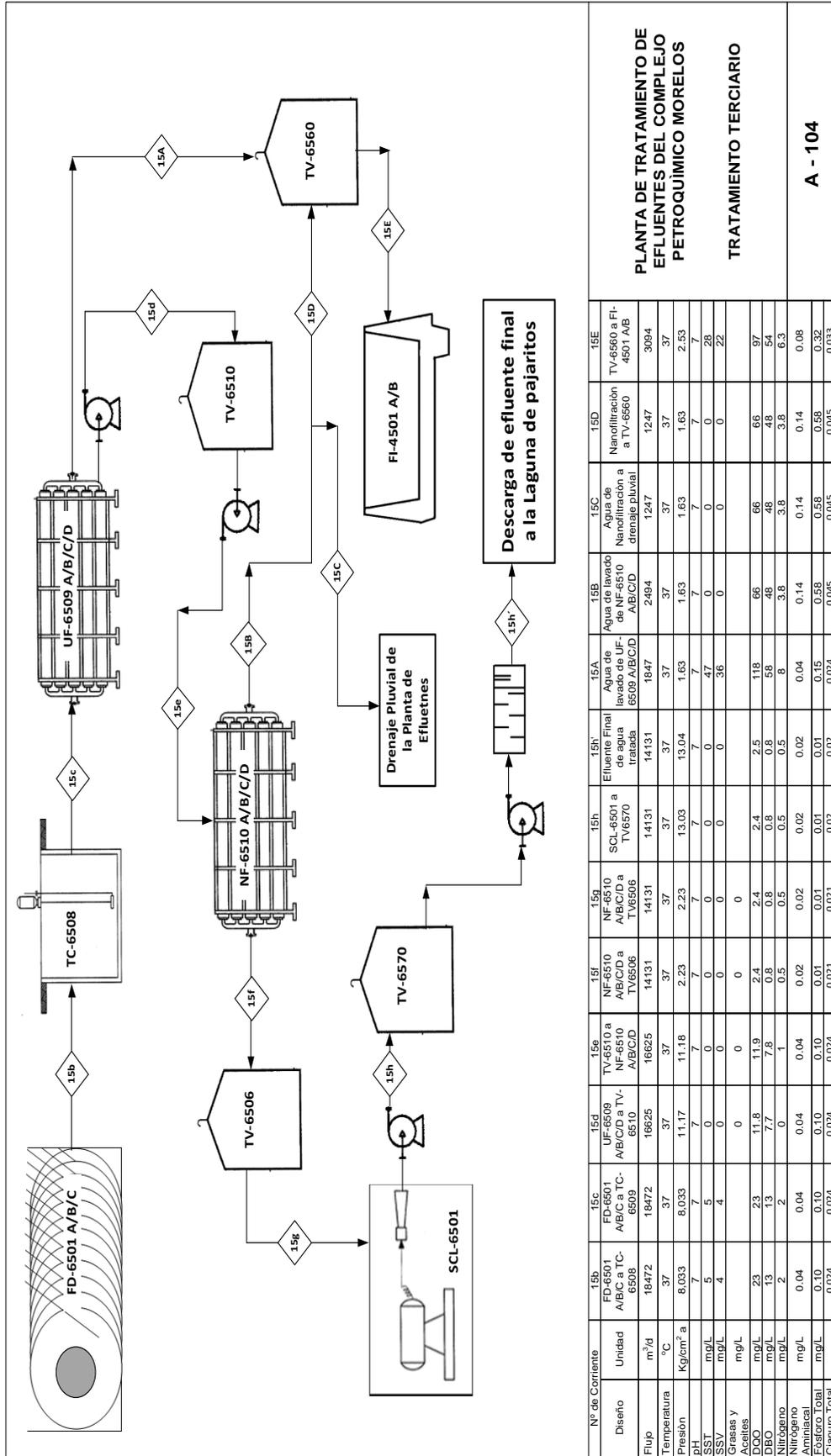
Al concluir el tratamiento secundario el flujo pasara al tratamiento terciario para obtener el efluente final bajo la nueva normatividad de descarga de la planta de tratamiento de efluentes del complejo petroquímico. Morelos. Mismo proceso que se muestra en la figura 2.5

Las corrientes a tratar en el proceso terciario son provenientes del sistema de clarificación. El proceso comprende cuatro etapas de tratamiento: pre filtración, ultrafiltración, nanofiltración y cloración.

El agua proveniente del tratamiento secundario se enviará por gravedad al filtro de discos (FD-6501 A/B/C), con el objetivo de retener la mayor parte de los sólidos suspendidos, para poder dar protección a las siguientes unidades de filtración. El filtro de discos se basa en el principio de una malla filtrante con la función de retener partículas hasta un tamaño de malla de 20 micrómetros ( $\mu\text{m}$ ), se encuentra en módulos rotatorios, instalados en paralelo que están sumergidos parcialmente en el agua como se puede observar en la figura 2.5



**Figura 2.4** Filtro de discos



**Figura 2.5** Propuesta de diagrama de proceso del tratamiento terciario (Adaptado del proyecto desarrollo de la ingeniería básica para la optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales del complejo petroquímico Morelos, 2011)

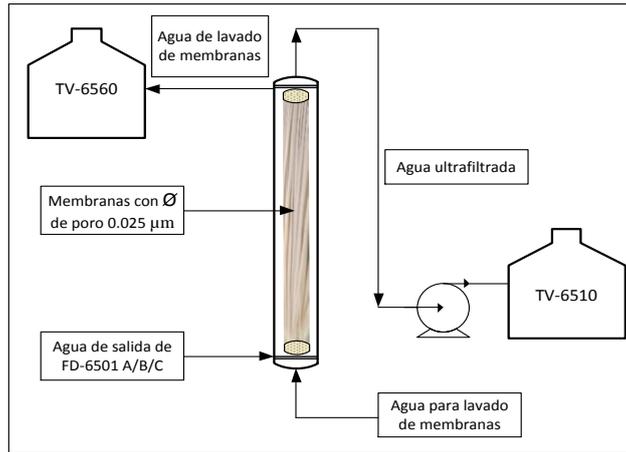
Dicho equipo FD-6501 A/B/C tendrá manómetro para medición de presión. El proceso requiere de retrolavado, utilizando el propio efluente del equipo, este consumo de agua representa aproximadamente el 2% del agua filtrada en el primer paso del tratamiento terciario.

El agua de rechazo del retrolavado se enviara a la sección del tratamiento secundario al cárcamo de transferencia de lodos (TA-5507/TZ-5506). El flujo filtrado es enviado por gravedad al cárcamo de transferencia de agua clarificada (TC-6508) para posteriormente enviarlo al sistema ultrafiltración.

El Cárcamo de transferencia de agua clarificada (TC-6508) tendrá una capacidad de 350 m<sup>3</sup>, con sus respectivas válvulas para mantenimiento o flexibilidad de operación. La corriente de agua clarificada que llega al TC-6508 se enviara por medio de la bomba (BA-6517 A/B/C) hacia el Sistema de ultrafiltración (UF-6509 A/B/C/D), la descarga de la bomba tendrá un manómetro y válvula para medición de presión.

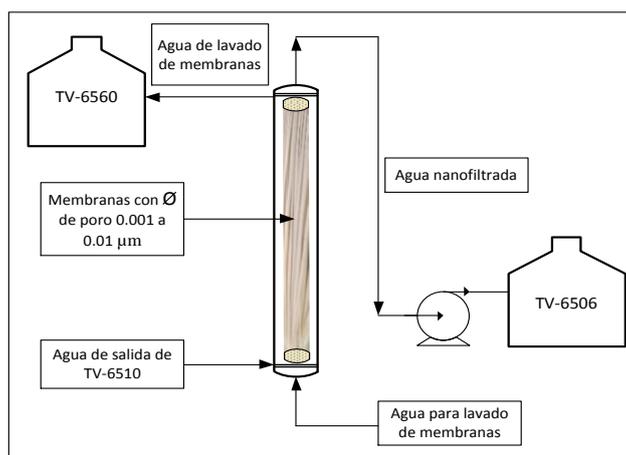
En el Sistema de ultrafiltración (UF-6509 A/B/C/D) se realiza la separación física de las partículas removiendo la materia orgánica residual (sólidos disueltos, sólidos suspendidos turbiedad y microorganismos), mediante el uso de membranas de filtración con un diámetro de poro de 0.025 µm.

El sistema de ultrafiltración estará constituido por 4 unidades que operarán de manera cíclica, como se explica el proceso mediante la figura 2.6. Mantendrá un ciclo de operación de dos pasos; el primero con el agua ultrafiltrada que será enviada como producto al tanque de transferencia de agua ultra a nanofiltración (TV-6510) y un segundo paso para lavado mecánico de las membranas, donde esta agua de rechazo que fue utilizada como agua de retrolavado del UF-6509 A/B/C/D se enviará al Tanque de transferencia de agua de rechazo de ultra y nanofiltración (TV-6560).



**Figura 2.6** Diagrama de circulación en el sistema de ultrafiltración

El agua del TV-6510 es enviada por medio de la bomba (BA-6518 A/B/C), sobre la cual se medirá la presión y el flujo hacia el tratamiento de nanofiltración. El Sistema de nanofiltración (NF-6510 A/B/C/D) constará de cuatro unidades, con la función de separar la carga orgánica tipo soluble, mediante el uso de membranas con un diámetro de poro en un rango de 0.001 a 0.01  $\mu\text{m}$ , como se muestra en el figura 2.7. Este equipo tendrá una presión de operación aproximada de 11.93  $\text{Kg}/\text{cm}^2$  y temperatura de 35°C a 40°C. Cada unidad del equipo NF-6510 A/B/C/D mantendrá un ciclo de operación de dos pasos; el primero se enviara agua nanofiltrada como producto hacia el tanque de mezcla y cloración (TV-6560), y un segundo paso para lavado de las membranas.



**Figura 2.7** Diagrama de circulación en el sistema de nanofiltración

El 50% del agua de lavado (agua de rechazo) será recirculado al TV.6560 y el otro 50% será enviado al drenaje pluvial con la finalidad de evitar acumulación y concentración de sales. La carga hidráulica en total que llega al TV.6560 llegara hacia el tratamiento primario al equipo FI-4501 A/B por medio de la bomba (BA-6520).

A la salida de los sistemas de ultrafiltración y nanofiltración se analizará y medirá los parámetros de  $\text{NH}_4^+$ , DQO, DBO, pH y  $\text{Cl}_2$ . El agua que sale del equipo NF-6510 A/B/C/D se manda al tanque de mezcla y cloración (TV-6570), se toma una derivación de agua hacia el eyector del sistema de dosificación de cloro, el cual se alimentara mediante los cilindros gas cloro (TK-6522 A/B) para ser mezclados y tener una dilución de cloro controlada. Con esta dilución de cloro se estará alimentando el TV-6570 con la finalidad de llevar a cabo la cloración y obtener así el efluente final hacia el Rio Coatzacoalcos bajo las condiciones de descarga de la nueva normatividad a cumplir.

# Capítulo III

## Justificación

El complejo petroquímico Morelos de la industria de PEMEX cuenta con 8 plantas, generando 2 263 miles de toneladas anuales de productos derivados de petróleo. En la manipulación por conseguir el producto final se generan residuos sólidos y líquidos, convirtiéndose en aguas residuales que presentan grandes riesgos para los trabajadores, población vecina y afectan de manera considerable la conservación de la biodiversidad. El agua residual producida en dicho complejo, así como el agua residual de la empresa Clariant se dirige hacia la planta de tratamiento de efluentes para su saneamiento, al término del tratamiento el agua es vertida hacia la Laguna de pajaritos que desemboca el Río Coatzacoalcos.

En la necesidad de mejorar la planta de tratamiento de efluentes, surge debido al aumento del 38.7% del volumen total que procesa la planta y la dificultad para cumplir con los parámetros de descarga que marca la nueva normatividad ambiental. Las instalaciones y equipos de la Planta tratamiento de efluentes se han deteriorado con el transcurso del tiempo, en el registro y control de los principales parámetros como: pH, DQO, DBO, temperatura, grasas y aceites son analizados por el laboratorio del complejo, con un tiempo de espera respectivamente. Éstos resultados se necesitan con mayor rapidez para ajustar las variables críticas que impactan el desempeño de los birreactores ya que es el proceso de mayor importancia en el tratamiento de aguas residuales.

Con el compromiso de cumplir los lineamientos de la normatividad ambiental es necesario el rediseño del sistema de tratamiento de aguas residuales del Complejo Petroquímico Morelos para el cumplimiento de dicha normatividad.

# Capítulo IV

## Objetivo

### 4.1 Objetivo general

Proponer el rediseño del sistema de tratamiento de aguas residuales del Complejo Petroquímico Morelos para el cumplimiento de la actual normatividad ambiental.

### 4.2 Objetivo específico

- Verificar y analizar las condiciones actuales de operación y control de la planta de tratamiento de efluentes del complejo petroquímico Morelos.
- Comparar el proceso de operación actual con el proceso del proyecto desarrollo de la ingeniería básica para la mejora de la planta de tratamiento de aguas residuales del complejo petroquímico Morelos.
- Planear modificar al diseño original del proyecto “desarrollo de la ingeniería básica para la mejorar de la planta de tratamiento de efluentes del complejo petroquímico Morelos” con el propósito de aminorar costos de inversión.

# Capítulo V

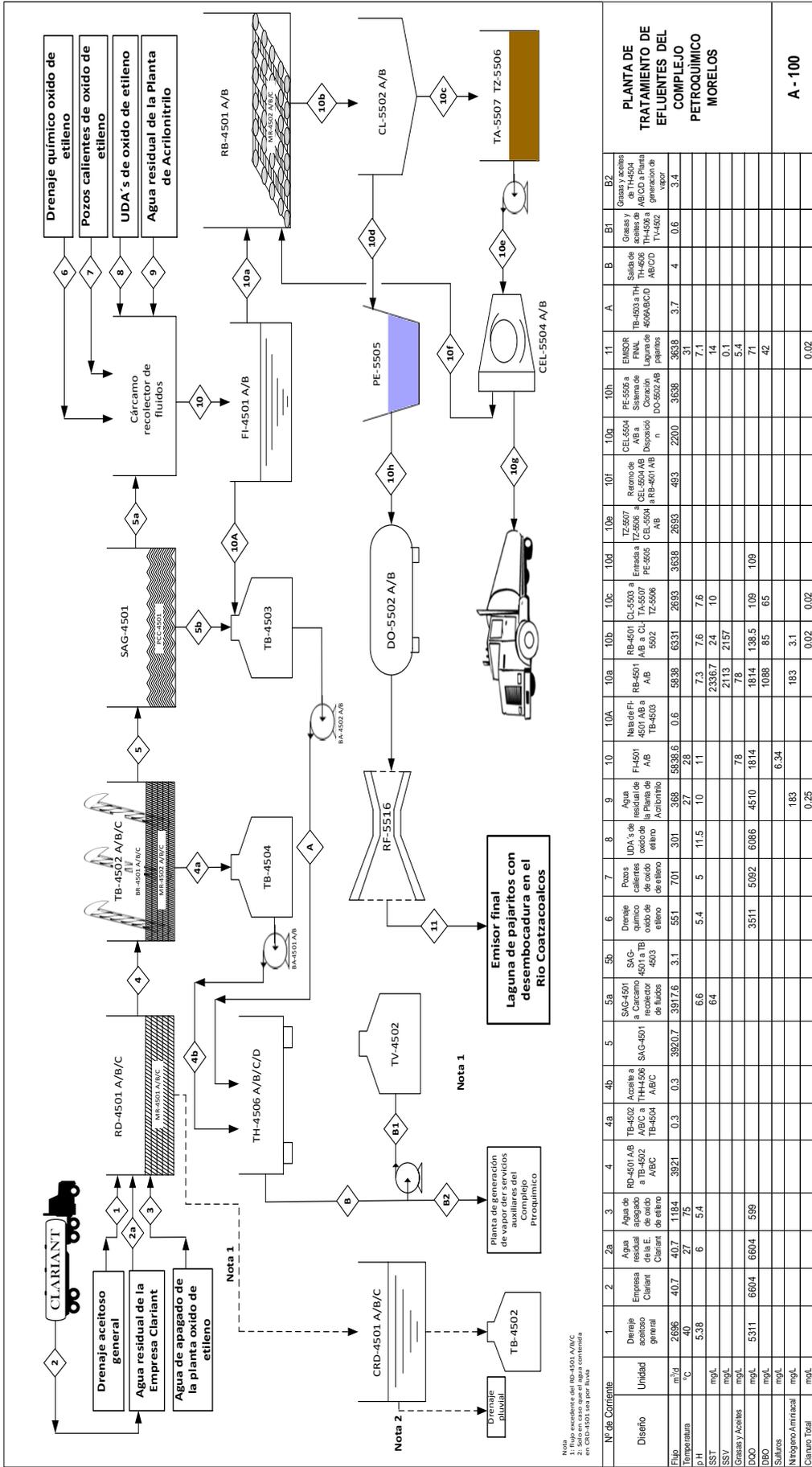
## Materiales y Métodos

### 5.1 Identificar el área de proceso de la Planta de Tratamiento de Efluentes del Complejo Petroquímico Morelos

Para reconocer la planta de tratamiento de aguas residuales de dicho complejo se hará un recorrido en el área del proceso, con el equipo de seguridad correspondiente.

- Guantes
- Tapones para oídos
- Casco con casquillo
- Botas tipo industrial
- Mascarilla doble filtro 3M
- Lentes para trabajo industrial
- Uniforme de trabajo (overol azul manga larga)
- Sin accesorios (aretes, pulseras, cadenas, anillos)

En el ejercicio de reconocer el proceso de la planta de tratamiento de aguas residuales se muestra la figura 5.1.



Nota  
 1. Flujos efluentes del RD-4501 A/B/C  
 2. Solo en caso que el agua contenida en el RD-4502 sea por lluvia

Diseño	Unidad	Descripción	PLANTA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES DEL COMPLEJO PETROQUIMICO MORELOS																											
			1	2	2a	3	4	4a	4b	5	5a	5b	6	7	8	9	10	10A	10B	10C	10D	10E	10F	10G	10H	10I	11	A	B	B1
Flujo	m <sup>3</sup> /d	2686	40.7	1184	3920.7	3917.6	3.1	55.1	70.1	30.1	368	5938.6	0.6	5838	6331	2693	3638	2693	483	2200	3638	3638	31	31	31	3.7	4	0.6	3.4	
pH		40	27	75																										
SS	mg/L	5.38	6	5.4																										
SSV	mg/L																													
Grasas y Aceites	mg/L																													
DBO	mg/L	5311	6604	599																										
Sulfuros	mg/L																													
Metales pesados	mg/L																													
Cloruro Total	mg/L																													

Figura 5.1 Diagrama actual de proceso de la planta de tratamiento de efluentes del complejo petroquímico Morelos (Adoptado del manual control operativo de la Planta de tratamiento de efluentes, 2010)

En la 5.1 se presenta las características de los equipos del tratamiento primario, de la Planta tratamiento de Efluentes.

**Tabla 5.1** Características de los equipos del tratamiento primario.

Proceso	Nombre del equipo	Identificación del equipo	En operación		Capacidad
			Si	No	
Tratamiento primario	Registro distribuidor	RD-4501	X		60 m <sup>3</sup>
	Mallas de retención de sólidos	MR-4501 A/B/C	X		Abertura de ½" x ½"
	Mallas de retención de sólidos	MR-4502 A/B/C	X		Abertura de 1cm x 1cm
	Cárcamo de bombeo	TB-4502 A/B/C	X		237 m <sup>3</sup>
	Bombas tipo Arquímedes	BR-4501 A/B/C	X		78.8 m <sup>3</sup> por Bomba
	Separador de aceite tipo gravimétrico con placas corrugadas	SAG-4501 A/B/C PCC-4501 A/B/C	X		460 m <sup>3</sup>
	Cárcamo de bombeo de aceite recuperado	TB-4503	X		112 m <sup>3</sup>
	Cárcamo de bombeo de aceite recuperado	TB-4504	X		112 m <sup>3</sup>
	Fosas de igualación	FI-4501 A/B	X		7020 m <sup>3</sup>
	Tanques decantadores	TH-4506 A/B/C/D	X		320 m <sup>3</sup>
	Tanque de almacenamiento de aceite recuperado	TV.4502	X		795 m <sup>3</sup>
	Cárcamo regulador de demasías	CRD-4501	X		2402 m <sup>3</sup>

En la tabla 5.2 se encontraran los equipos que se utilizan en el tratamiento secundario de la Planta de tratamiento de efluentes.

**Tabla 5.2** Características de los equipos del tratamiento secundario.

Proceso	Nombre del equipo	Identificación del equipos	En operación		Capacidad
			Si	No	
<b>Tratamiento Secundario</b>	Reactor biológico	RB-5501 A/B	X		30 000 m <sup>3</sup>
	Clarificador secundario	CL-5502 A/B	X		1930 m <sup>3</sup>
	Pileta de estabilización	PE-5505	X		8000 m <sup>3</sup>
	Centrifuga de lodos	CEL-5504 A/B	X		164 m <sup>3</sup> /h

En el termino del proceso de la planta de tratamiento de efluentes, se encontrará el tratamiento terciario y en la tabla 5.3 se presentará el equipo a utilizar y su capacidad.

**Tabla 5.3** Características de los equipos del tratamiento terciario.

Proceso	Nombre del equipo	Identificación del equipo	En operación		Capacidad
			Si	No	
<b>Tratamiento Terciario</b>	Sistema de cloración	DO-5502 A/B	X		2400 Kg
	Medidor de flujo tipo Parshall	RF-5516	X		681.3 m <sup>3</sup> /h

Cada flujo de entrada al tratamiento de aguas residuales es proveniente de desechos que generan las plantas que integran el complejo petroquímico Morelos así como también de la Empresa Clariant, se analizaran los parámetros más importantes de cada flujo de entrada para poder llevar el control del tratamiento primario y así poder pasar a un adecuado tratamiento secundario.

A continuación en la tabla 5.4 se muestra los datos de entrada de las aguas residuales de las diferentes aguas residuales del complejo petroquímico Morelos.

**Tabla 5.4** Características de corrientes hidráulicas de entrada en el tratamiento primario.

<b>Flujo de entrada</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup> / día)</b>	<b>pH</b>	<b>DQO (mg/L)</b>
<b>Drenaje aceitoso general</b>	2696	6.7	203
<b>UDAS de óxido de etileno.</b>	300	11.45	6086
<b>Drenaje químico de óxido de etileno</b>	550	5.38	3511
<b>Pozos caliente de óxido de etileno</b>	700	5.07	5092
<b>Agua de apagado de etileno</b>	1184	5.34	599

Las características de la siguiente tabla 5.5 es el flujo de un sistema de recolección de las aguas que contiene desechos químicos provenientes de la planta de acrilonitrilo del complejo petroquímico Morelos.

**Tabla 5.5** Características de flujo de entrada de la planta de acrilonitrilo al tratamiento primario.

Flujo de entrada	Volumen (m <sup>3</sup> / día)	pH	Cianuro Total (mg / L)	Temperatura (°C)	N-NH <sub>3</sub> L (mg / L)	DQO (mg / L)
Planta de Acrilonitrilo	367	9.79	.025	27	183	4510

Para finalizar con las con el flujo de entrada al tratamiento primario de aguas residuales, se encuentra el agua residual de la empresa Clariant, la cual es una empresa particular y ajena a petróleos mexicanos, produce y comercializa química fina y especialidades químicas. Para ingresar a la planta de tratamiento de aguas residuales es necesario conocer los siguientes parámetros que se muestran en la siguiente tabla 5.6

**Tabla 5.6** Datos del flujo de entrada de la empresa Clariant al tratamiento primario.

Flujo de entrada	Volumen (m <sup>3</sup> / día)	pH	Temperatura (°C)	DQO (mg / L)
Empresa Clariant	40.19	5.99	27	5551

## **5.2 Procedimiento de toma de muestra para aguas residuales de la planta de tratamiento de efluentes del complejo petroquímico Morelos**

Para la toma de muestra que sea necesaria se tendrá que elaborar en base a la norma mexicana NMX-AA-003-1980 aguas residuales - muestreo. Así como portar adecuadamente el uniforme y equipo de seguridad.

### **5.2.1 Identificación de las muestras.**

El recipiente para la recolección de la muestra debe ser de material inerte al contenido de las aguas residuales; ya sea de polietileno o vidrio, las tapas deben proporcionar un cierre hermético y se recomienda que sea de material a fin del recipiente, teniendo como capacidad mínima 2 L.

Dicho recipiente debe emplear etiquetas pegadas o enumerar los frascos anotándose la información de una hoja de registro. Estas etiquetas deben de contener como mínimo la siguiente información:

- Nombre de la muestra.
- Número de muestra.
- Fecha y hora de muestreo
- Punto de muestreo.
- Temperatura de la muestra.
- Profundidad de muestreo.
- Nombre y firma de la persona que efectúa el muestro.

También se debe de contar con una hoja de registro, que contendrá la información de la etiqueta del frasco que permitirá identificar el origen de la muestra y todos los datos que en un momento dado permitan repetir el muestreo. Esta hoja de registro también deberá contar con resultados de pruebas de campo practicadas en la descarga muestreada y la descripción cualitativa de olor y el color de las aguas residuales muestreadas.

Las muestras deben ser representativas de las condiciones que existan en el punto y hora de muestreo y tener el volumen suficiente para efectuar en él las determinaciones correspondientes:

- El recipiente muestreador se debe enjuagar repetidas veces con el agua por muestrear antes de efectuar el muestreo.
- El recipiente muestreador, atado a una cuerda y sostenido con la mano de preferencia enguantada, se introduce en el agua residual completamente y se extrae la muestra.
- Tomar la muestra en el centro del colector de preferencia en lugares donde el flujo sea turbulento a fin de asegurar un buen mezclado.
- Si se va a evaluar contenido de grasas y aceites se deben tomar porciones, a diferentes profundidades, cuando no haya mucha turbulencia para asegurar una mayor representatividad.
- Al finalizar, cierre herméticamente los recipientes de muestreo.

### **5.2.2 Preservación de las muestras.**

Preservar la muestra durante el transporte por medio de un baño de hielo y conservar las muestras en refrigeración a una temperatura de 4° C. Se recomienda que le intervalo de tiempo entre la extracción de la muestra y su análisis sea el menor posible.

## **5.3 Materias y métodos para los análisis de parámetros del agua residual de la planta de tratamiento de efluentes del complejo petroquímico Morelos**

### **5.3.1 Determinación del pH**

La metodología que se empleara para analizar el pH es en base a la norma mexicana NMX-AA-008-SCFI-2000. Dicho análisis se realizará en cada flujo de entrada al tratamiento primario, a la entrada del reactor biológico y en el efluente final con la siguiente metodología.

El potenciómetro para la determinación del pH debe estar calibrado con la disolución de hidrógenoftalato de potasio y disolución de hidróxido de calcio. Enjuagar cuidadosamente los electrodos con agua. Colocar 100 mL en un vaso de precipitados, agitar suavemente con el agitador y la barra magnética, sumergir los electrodos en el centro de la muestra problema durante 1 min para acondicionar el electrodo de vidrio para que la lectura del pH se estabilice. Retirar los electrodos de la muestra, secarlos con papel absorbente, sin enjuagar y sin tallar.

El cálculo del pH de las muestras problemas se registraran dos lecturas de pH con dos cifras decimales y la temperatura de la muestra, así también como la hora en que se realizó el análisis.

### **5.3.2 Determinación de la Temperatura**

Por medio de la norma mexicana NMX-AA-007-SCFI-2000 se analizará la temperatura en el flujo de entrada de la Planta de acrilonitrilo y de la Empresa Clariant y en el efluente final con la siguiente metodología.

Para este análisis no se requiere preparación ni conservación de la muestra. Cuando sea posible, se efectuara la determinación de temperatura directamente, sin extraer la muestra, sumergiendo el termómetro de mercurio en vidrio en el cuerpo del agua residual. Cuando sea preciso extraer la muestra, se tomara un volumen mínimo de 1 L para inmersión parcial en un envase de polietileno o de vidrio limpio y 500 mL en un envase de polietileno limpio, se determinará la temperatura de inmediato por medio de un termómetro termopar.

Para el análisis de la temperatura en el reactor biológico y el efluente final se extraerá la muestra mediante un recipiente de doble pared, de tipo vaso Dewar. Colocar la tapa de espuma de polietileno perforada en su centro para permitir la introducción del agitador y termómetro, determinar de inmediato la temperatura.

La incertidumbre sobre la temperatura en el punto de muestreo puede rebasar los  $\pm 0,2$  °C, debido a pérdidas térmicas en el intervalo de tiempo que se espera para tomar el análisis y la lectura de la temperatura.

### **5.3.3 Determinación de la Demanda química de oxígeno (DQO)**

En base a norma mexicana NMX-AA-030-SCFI-2001 por el método espectrofotométrico se determinara la DQO en cada flujo de entrada al tratamiento primario, a la entrada del reactor biológico y en el efluente final.

La reacción para el análisis de DQO se caliente en el proceso, se debe trabajar con guantes aislantes.

Preparar la disolución de digestión A (alta concentración). Pesar aproximadamente y con precisión 10.216 gr de dicromato de potasio, previamente secado a 103°C por 2 horas, y añadirlos a 500 mL de agua, adicionar 167 mL de ácido sulfúrico concentrado y aproximadamente 33.3 gr de sulfato mercuríco. Disolver y enfriar a temperatura ambiente. Aforar a 1 L con agua.

Precalear a 150°C el digestor de DQO (placa de calentamiento con horadaciones para los tubos de reacción de DQO que alcance una temperatura de 150°C ± 2°C), colocar en tubos para digestión (16 mm x 100 mm) 1.5 mL de disolución de digestión A, adicionar cuidadosamente 2.5 mL de muestra previamente homogenizada dentro de los tubos para digestión. Cerrar el tubo rápidamente para evitar que se escapen los vapores, asegurarse que estén herméticamente cerrados. Suavemente invertir los tubos varias veces destapando después de cada inversión para liberar la presión. Añadir cuidadosamente 3.5 mL de disolución de digestión A. En un tubo para digestión limpio colocar 2.5 mL de agua para la determinación del blanco de reactivos.

Se colocaran todos los tubos en el digestor previamente calentado a 150°C y reflujar por 2 horas. Después de pasar este tiempo retirar con cuidado los tubos del digestor y dejar que los tubos se enfríen a temperatura ambiente, permitiendo que cualquier precipitado se sedimente.

Llevar al muestra enfriada al espectrofotómetro previamente calibrado y leer a 660 nm.

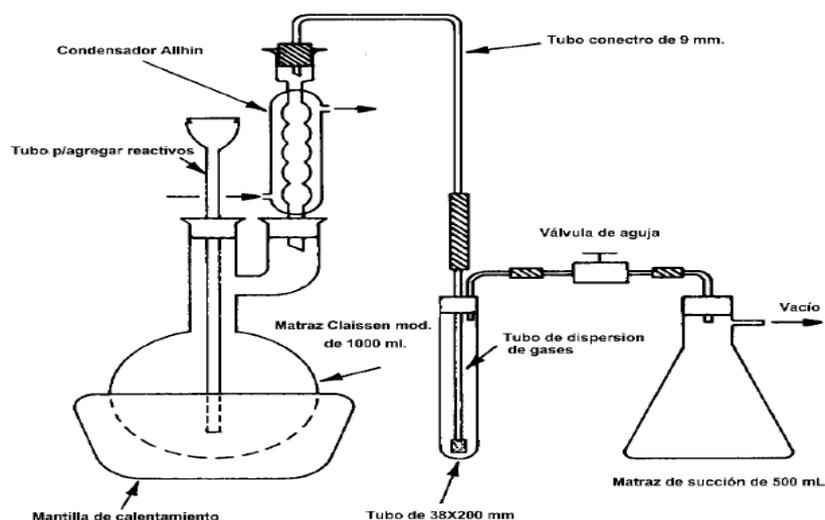
El resultado de DQO se calculara en miligramos por litro (mg/L) directamente de la curva de calibración, con la ecuación 5.1

$$Y = mX + b \dots\dots\dots 5.1$$

### 5.3.4 Determinación de cianuros

Para el procedimiento de análisis de la determinación de cianuros totales se elaborara por el método espectrofotométrico de la norma mexicana NMX-AA-058-SCFI-2001 al flujo de entrada proveniente de la Planta de acrilonitrilo por la manipulación para obtener este producto, así también al efluente final.

En el análisis de cianuros totales se colocara 500 mL de muestra en un matraz de ebullición de 1 L. Tomar una alícuota de 10 mL de hidróxido de sodio al 1N, colocar dentro del tubo de adsorción , añadir agua hasta que el espiral este cubierto. Montar el equipo de destilación tal como se muestra en la figura 5.2



**Figura 5.2** Equipo para destilación de Cianuros

(Adoptado de NMX-AA-058-SCFI-2001)

Ajustar la bomba de vacío, empezar con un flujo de aire lento que entre por el matraz tipo Claisen y dejar que se estabilice en dos burbujas de aire por segundo desde el tubo de entrada.

Se utilizará papel de nitrato de plomo para revisar que la muestra no contenga sulfuros. Si el papel se torna negro, la prueba es positiva; en este caso, tratar la muestra por adición de 50 mL de la disolución de nitrato de bismuto a través del tubo de entrada de aire después de que la tasa de entrada de aire esté estable.

Añadir lentamente 50 mL de ácido sulfúrico (1:1) a través del tubo para agregar reactivos. Lavar el tubo con agua y dejar el flujo de aire para que se mezcle el contenido del matraz por 3 min. Después de concluir el tiempo se pondrá 20 mL de la disolución de cloruro de magnesio dentro del tubo de entrada de aire y lavar con vapor de agua. Posteriormente calentar la disolución hasta hervir, permitir el reflujo por lo menos 1 h apagar la fuente de calor y continuar con el flujo de aire por lo menos durante 15 min más. Después enfriar el matraz de ebullición, desconectar el adsorbedor (tubo de 38x200mm) y cerrar la bomba de vacío.

Se colocara la disolución del adsorbedor dentro de un matraz volumétrico de 250 mL. Lavar el adsorbedor con agua y añadir el agua del lavado al matraz volumétrico, aforar con agua a 250 mL y homogeneizar.

Cuando se tenga la muestra problema contenida en el matraz volumétrico que se describió anteriormente se procederá al análisis de cianuros por medio del método espectrofotométrico. Se tomará una alícuota (1mL) de la disolución de adsorción en un matraz volumétrico de 50 mL y diluir a 40 mL con una disolución de hidróxido de sodio, añadir 1 mL de la disolución amortiguadora de acetato de sodio y 2 mL de la disolución de cloramina-T, mezclar por inversión una par de veces y permitir que la disolución se estabilice durante 2 min. Después adicionar 5 mL del reactivo de ácido piridín-barbitúrico y aforar con agua. Mezclar perfectamente y permitir que la muestra se estabilice durante 8 a 15 min y medir la absorbancia a 578nm en el espectrofotómetro.

Se calculará la concentración de cianuros ( $\text{CN}^-$ ) con la ecuación 5.2

$$\text{CN}^- (\mu\text{g/mL}) = \frac{A \times B}{C \times D} \quad 5.2$$

A = son los  $\mu\text{g}$  obtenidos (50 mL de volumen final), calculados con la ecuación de la recta de la curva de calibración.

B= es el volumen de la disolución adsorbente en la destilación (mL)

C= el volumen original de la muestra usado en la destilación (mL)

D= volumen de la disolución adsorbente usada en el método espectrofotométrico (mL)

Se deben reportar los resultados en mg de  $\text{CN}^-$  / L.

### **5.3.5 Preparación de material para determinar solidos suspendidos totales (SST) y solidos totales volátiles (SVT)**

El análisis de SVT y SST se realizara bajo la norma mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001 para el agua residual del reactor biológico y la determinación de SST en el efluente final.

#### **5.3.5.1 Peso constante**

- **Capsulas de porcelana a peso constante.**

Para la determinación de SST y SSV, se pondrá a peso constante las capsulas de porcelana, se meterán a la mufa a una temperatura de  $550^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$  durante 20 minutos. Después de este tiempo se transferirán a la estufa a una temperatura de  $103^\circ\text{C} - 105^\circ\text{C}$  por 20 minutos. Pasado el tiempo se secara y dejar enfriar a temperatura ambiente dentro de un desecador.

Pesar las capsulas y registrar los pesos, repetir el ciclo hasta alcanzar el peso constante, el cual se obtendrá hasta que no haya una variación en el peso mayor a 0.5mg. Teniendo el peso constante de cada capsula de porcelana se registrara como peso G.

- **Preparación de crisoles Gooch**

Introducir el filtro de fibra de vidrio en el crisol con la cara rugosa hacia arriba, mojar el filtro de agua para asegurar que se adhiera al fondo del crisol. Después se colocaran en la mufa a una temperatura de  $550^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ , durante 20 minutos, habiendo pasado este tiempo se llevaran a la estufa a una temperatura de  $103^{\circ}\text{C} - 105^{\circ}\text{C}$  durante 20min. Secar y enfriar a temperatura ambiente dentro de un desecador, pesar los crisoles y repetir el ciclo hasta alcanzar el peso constante, el cual se obtendrá hasta que no haya una variación en el peso mayor a 0.5mg. Teniendo el peso constante de cada capsula de porcelana se registrara como peso G3.

### **5.3.5.2 Preparación de la muestra.**

Sacar las muestras del sistema de refrigeración y dejar que alcancen la temperatura ambiente. Se agitaran las muestras para asegurar la homogenización del agua residual.

### **5.3.5.3 Determinación para solidos totales (ST)**

En función de la cantidad de solidos probables tomar como muestra mínima 25 mg/l de solidos totales, un volumen adecuado de 1000mL de muestra, dicho volumen de muestra se colocara en la capsula de porcelana que estará a peso constante. Secar la muestra en la estufa a una temperatura de  $103^{\circ}\text{C} - 105^{\circ}\text{C}$  de 15 a 20 minutos, transcurrido el tiempo enfriar en el desecador hasta temperatura ambiente, y determinar su peso hasta alcanzar peso contante. El peso se registrara como G1

#### **5.3.5.4 Determinación para SSV**

La muestra para la determinación de ST (capsula conteniendo el residuo) será la muestra para determinar los SSV. Dicha muestra entrara a la mufa a  $550^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$  durante 15 a 20 min. Paso el tiempo se pasara la capsula con la muestra e la estufa a una temperatura de  $103^{\circ}\text{C} - 105^{\circ}\text{C}$  durante 20 min, sacar la capsula, enfriar en un desecador a temperatura ambiente y determinar su peso constante el cual se registrará como G2.

Las muestras se harán por triplicado teniendo como máximo del 5 % del promedio de los resultados.

#### **5.3.5.5 Determinación de SST**

Medir con una probeta 1000ml de muestra (agua residual), filtrar la muestra a través del crisol Gooch preparado anteriormente, lavar el disco tres veces con 10mL de agua, dejando que el agua drene totalmente en cada lavado. Concluyendo esto, secar en la estufa a una temperatura de  $103^{\circ}\text{C} - 105^{\circ}\text{C}$  durante 1 hora. Sacar el crisol y dejar enfriar dentro de un desecador a temperatura ambiente, determinar su peso hasta alcanzar peso constante y registrar como peso G4.

#### **5.3.5.6 Calculo para determinar SSV y SST**

Calcular el contenido de SSV mediante la fórmula 5.3.

$$\text{SSV} = (G1 - G2) * 1000 / V \quad 5.3$$

SSV: Solidos suspendidos volátiles (mg/L)

G1: Peso de la capsula con el residuo (5.3.5.3) en mg

G2: Peso de la capsula con el residuo (5.3.5.4) en mg

V: Volumen de la muestra (ml)

Calcular el contenido de SST por medio de la fórmula 5.4

$$SST = (G4 - G3) * 1000 / V \quad 5.4$$

SST: Sólidos suspendidos totales, en mg/L

G3: Peso del crisol Gooch a peso contante (6.3.7.1) , en mg

G4: Peso de la capsula con el residuo (6.3.7.5), en mg

V: Volumen de la muestra, en ml

### 5.3.6 Determinación de grasas y aceites.

En la determinación de grasas y aceites se determinará con base a lo marcado en la norma NMX-AA-005-SCFI-2000 para el agua residual del reactor biológico y el efluente final.

Se medirá el pH de las muestras el cual debe ser menor de 2, si no tiene este valor acidifique con ácido clorhídrico en relación 1:1 ó ácido sulfúrico en relación 1:1, para muestras con un pH menor de 8 unidades adicionar 5 ml de ácido clorhídrico ó 2 mL de ácido sulfúrico.

- Peso constante

Preparar los matraces de extracción introduciéndolos a la estufa a una temperatura de 103°C - 105°C, enfriar en desecador y pesarlos, repetir el procedimiento hasta obtener el peso constante de cada uno de los matraces.

- Material filtrante

Preparar el material filtrante colocando un papel filtro en el embudo Büchner, colocar el embudo en un matraz Kitazato y agregar 100 mL de la suspensión de tierra de diatomeas-sílice (medio de filtración) sobre el filtro, aplicar vacío y lavar con 100 mL de agua.

- Análisis

En el proceso del análisis utilizar pinzas ó guantes de látex para no alterar los resultados.

Transferir el total de la muestra acidificada al embudo Büchner preparado aplicando vacío hasta que cese el paso de agua, medir el volumen de la muestra. Con ayuda de unas pinzas, transferir el material filtrante a un cartucho de extracción. Limpiar las paredes internas del embudo y del frasco contenedor de la muestra, así como la parte interna de la tapa del frasco con trozos de papel filtro previamente impregnados de disolvente (hexano) tener cuidado en remover la película de grasa y los sólidos impregnados sobre las paredes.

Colocar los trozos de papel en el mismo cartucho, secar el cartucho en una estufa a 103°C - 105°C por un período de 30 min. Transcurrido este período colocar en el equipo Soxhlet, adicionar el volumen adecuado de hexano al matraz de extracción previamente puesto a peso constante y preparar el equipo Soxhlet.

Colocar el equipo de extracción (equipo Soxhlet) sobre la parrilla de calentamiento, controlar la temperatura del reflujo y extraer a una velocidad de 20 ciclos/hora durante un período de 4 horas. Una vez terminada la extracción retirar el matraz del equipo Soxhlet, y evaporar el disolvente.

El matraz de extracción libre de disolvente se coloca en el desecador hasta que alcance la temperatura ambiente, pesar el matraz de extracción y determinar la concentración de grasas y aceites recuperables. Analizar un blanco de reactivo bajo las mismas condiciones de la muestra.

Se calculara la cantidad de grasas y aceites (G y A) que contenga la muestra con la ecuación 5.5

$$G \text{ y } A \text{ (mg/L)} = \frac{(A - B)}{V} \quad 5.5$$

Dónde:

A = es el peso final del matraz de extracción (mg)

B = peso inicial del matraz de extracción (mg)

V = volumen de la muestra, en litros

Reportar los resultados del análisis en mg/L.

### **5.3.7 Determinación de nitrógeno total para aguas residuales.**

Para obtener la determinación de nitrógeno total, se analizará el nitrógeno amoniacal y el nitrógeno orgánico, con el método y material por medio de la norma mexicana NMX-AA-026-SCFI-2001. En el presente trabajo solo se analizará y calculará el nitrógeno amoniacal para el agua residual de la planta de acrilonitrilo y en el reactor biológico.

- Nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_3\text{-N}$ )

Para el análisis de nitrógeno amoniacal se preparará la muestra problema con 250 mL de aguas residuales y diluir con agua hasta 500mL. Preparar un blanco con 500 mL de agua y darle el mismo tratamiento que a la muestra problema como se describe a continuación.

Añadir 25 mL de la disolución amortiguadora de boratos y ajustar el pH a 9,5 con disolución de hidróxido de sodio 6 N utilizando potenciómetro o papel indicador para verificar. Transferir la disolución a un matraz Kjeldahl y añadir unas cuentas de vidrio o perlas de ebullición.

Conectar el matraz Kjeldahl al bulbo del aparato de destilación, destilar la muestra cuidando que la temperatura del condensador no pase de 29°C; recolectando el condensado con la punta del tubo del refrigerante sumergido en 50 mL de la disolución amortiguadora de boratos. La destilación se completa cuando se hayan recolectado 300 mL de destilado aproximadamente, incluyendo los 50 mL de la disolución amortiguadora de boratos con la disolución mezcla de indicadores.

Retirar el matraz colector y titular con solución de ácido sulfúrico 0,02 N hasta que la solución vire de un verde esmeralda a morado.

- Nitrógeno orgánico (N-ORG)

Enfriar el residuo contenido en el matraz Kjeldahl, adicionar cuidadosamente 50 mL de reactivo para la digestión al matraz de destilación y mezclar perfectamente. Añadir unas cuentas de vidrio o piedras de ebullición. Si se encuentran presentes grandes cantidades de materia orgánica libre de nitrógeno adicionar 50 mL de reactivo de digestión por cada gramo de materia sólida en la muestra.

Mezclar y calentar a ebullición bajo una campana de extracción, hasta que el volumen de la disolución se reduzca aproximadamente entre 25 mL y 50 mL y se observe gran desprendimiento de vapores blancos (estos vapores pueden oscurecerse cuando la muestra presenta grandes cantidades de materia orgánica). Continuar la digestión durante 30 min más. En este período, la disolución cambia de turbia hasta ser transparente e incolora o con una ligera coloración amarillo pálido.

Durante la digestión el matraz Kjeldahl debe permanecer inclinado, enfriar el matraz y su contenido, diluir a 300 mL con agua y mezclar. Cuidadosamente añadir 50 mL de la disolución de hidróxido-tiosulfato de sodio, para formar una capa alcalina en el fondo del matraz, conectar el matraz a un equipo de destilación y sumergir la punta del condensador en un matraz que contenga 50 mL de disolución de ácido bórico y la mezcla de indicadores por abajo del nivel de esta disolución. Agitar hasta asegurarse que está completamente mezclado, el pH de la disolución debe ser mayor a 11,0.

- Destilación

Destilar y colectar aproximadamente 200 mL de destilado, no permitir que la temperatura en el condensador suba por arriba de 29°C.

Cuando se alcance un volumen aproximado de 250 mL en el matraz colector del destilado, sacar la punta del condensador del destilado sin retirarlo del matraz y continuar la destilación durante 1 min o 2 min para limpiar el condensador. Titular el volumen destilado con disolución valorada de ácido sulfúrico 0,02 N hasta el cambio del indicador de verde esmeralda a morado.

Habiendo terminado el proceso se cuantificara el nitrógeno total (Nt) con la siguiente ecuación.

$$\text{NH}_3\text{-N mg / L} = (\text{A-B}) (\text{N}) (14) (1\ 000) / \text{V} \quad 6.6$$

$$\text{N-ORG mg / L} = (\text{A-B}) (\text{N}) (14) (1\ 000) / \text{V} \quad 6.7$$

$$\text{Nt mg / L} = \text{NH}_3\text{-N mg / L} + \text{N-ORG mg / L} \quad 6.8$$

Dónde:

A= son los mL de ácido sulfúrico gastados en la titulación de la muestra

B = son los mL de ácido sulfúrico gastados en el blanco

N = es la normalidad del ácido sulfúrico

V = mL de muestra

14 = es el peso equivalente del nitrógeno.

### **5.3.8 Análisis de demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>)**

En el análisis y cuantificación de DBO<sub>5</sub> se realizará por personal certificado del área de laboratorio del Complejo Petroquímico Morelos, por medio de la norma NMX-AA-028-SCFI-2000, dicho análisis se elaborará en reactor biológico y en el efluente final para su descarga a la Laguna de pajaritos.

#### **5.4 Comparación de los equipos actuales y nuevos para la Planta de tratamiento de efluentes**

En la necesidad de cumplir con la nueva normatividad ambiental de descarga de aguas residuales para el Complejo Petroquímico Morelos y sustentar el aumento de aguas residuales que llegaran al tratamiento, se mostraran las ventajas que tendrán los equipos nuevos.

En la tabla 5.7 se presentan los equipos a utilizar en el tratamiento primario para la separación de sólidos, grasas y aceites.

Todo el tratamiento primario se restructurará completamente con equipos nuevos para ajustar las variables críticas como: la concentración de grasas y aceites, temperatura y pH.

Los nuevos equipos para la separación de sólidos, grasas y aceites son: MR-4501 A/B, TCD-4501 A/B, TG-4501, TC-4501 A/B, CPI-4501 A/B y IGF-4501 A/B/C, serán equipos cerrados herméticamente, para disminuir significativamente los gases emitidos en este proceso, en el cual tratamiento primario se encuentran los equipos destapados.

Los equipos nuevos del tratamiento primario en la separación de sólidos, grasas y aceites antes mencionados tendrán un sistema de succión de los gases que produzcan en cada proceso de los equipos, y serán enviados al soplador (BS-4501 A/B).

Se tendrá un enfriador (CH-4502 A/B) para el Agua residual del agua de apagado de óxido de etileno ya que llegara con un promedio de temperatura de 82°C, y al ser tratada por el CH-4502 A/B tendrá menor temperatura siendo de 42°C, para no afectar el desempeño de los lodos activados en el reactor biológico del tratamiento secundario.

**Tabla 5.7** Equipos de tratamiento primario

<b>Tratamiento primario: Separación de sólidos, grasas y aceites.</b>		
	Actual	Propuesta
<b>Equipos</b>	Registro distribuidor (RD-4501)	Clasificador de arena (CN-4501 A/B)
	Mallas de retención de solidos $\phi$ .5" (MR-4501 A/B/C)	Cribas de barras (MR-4501 A/B)
	Cárcamo de bombeo (TB-4502)	Desarenador (TCD-4501 A/B)
	Mallas de retención de solidos $\phi$ 1cm (MR-4502 A/B/C)	Tanque separador de gas (TG-4501) A/B)
	Cárcamo de bombeo (TB-4504)	Filtro canasta ( FL-4501 A/B)
	Bomba tornillo de Arquímedes (BR-4501)	Enfriador de agua de apagado (CH-4502 A/B)
	* Tanque decantadores (TH-4506 A/B/C/D)	Cárcamo regulador de demasías (CRD-4501)
	Separador de aceite tipo gravimétrico (SAG-4501)	Desnatador (DES-4501)
	Cárcamo de bombeo de aceite recuperado (TB-4503)	Cárcamo neutralizador de Drenaje aceitoso general y Efluentes (TC-4501 A/B)
	Cárcamo regulador de demasías (CRD-4501)	Separador de grasas y aceites de placas corrugadas (CPI-4501 A/B)
	* Tanque de almacenamiento de aceite recuperado (TV-4502)	Cárcamo de lodos primario (TB-4505)
		Centrifugadora de lodos primario (CEL-4501 A/B)
		Cárcamo de bombeo aceite-agua (TB-4504)
		Separador de grasas y aceites por gas inducido (IGF-4501 A/B)
		Cárcamo de aceite contaminado (TB-4503)
		Bomba rotatoria de aceite contaminado (BR-4502 A/B)
	Soplador de gases emitidos en el proceso (BS-4501 A/B)	
Costo (USD)		<b>\$ 15 804 407 USD</b>

En la tabla 5.8 se muestran los equipos nuevos que se utilizarán en la etapa de homogenización y neutralización del pH del tratamiento primario. Las corrientes de entrada: 6, 7, 8, 9, 10, y 11 que se observan en la figura 2.2, tendrán una tina de neutralización cada una, para establecer el pH de 6 a 8.5. Llegando a este rango serán enviadas a la TZ-4502 A/B adjunto a la corriente 5 de la figura 2.1, con la finalidad de asegurar la neutralización fina para tener un pH de 7 de la mezcla total de la carga hidráulica. Continuamente se enviarán a las FI-4501 A/B para neutralizar el flujo que alimentará al tratamiento secundario.

**Tabla 5.8** Equipos de tratamiento primario en la etapa de homogenización y neutralización del pH

<b>Tratamiento primario : Homogenización y la neutralización de pH del flujo de entrada</b>		
	Actual	Propuesta
Equipos	* Fosas de igualación (FI-4501 A/B)	Tina de neutralización (TZ-4501 A,B,C,D,E)
		Tanque receptor (TV-4520)
		Tanque receptor (TV-4530)
		Tanque receptor (TV-4540)
		Cárcamo de neutralización fina (TZ-4502 A/B)
		* Fosas de amortiguamiento hidráulico (FAH-4501 A/B)
		Tanque de ácido sulfúrico al 98% (TH-4505)
		Tanque de Sosa al 2% (TH-4505)
Costo (USD)		<b>\$ 3 303 610 USD</b>

En la presente tabla 5.9 se presentan los nuevos equipos para el tratamiento secundario, se dará mantenimiento y corrección a los reactores biológicos (RB-4501 A/B), se instalara un nuevo sistema de aireación para tener en función ambos reactores operando con un flujo máximo de 30 000 m<sup>3</sup>/d. También se instalara un tercer clarificador con las mismas especificaciones de los que se tiene actualmente para procesar el nuevo flujo de entrada. Los CL-5502 A/B/C tendrán la función de separar la masa de microorganismos del agua tratada en el RB-4501 A/B. El sistema de reactores biológicos- clarificadores tendrán una remoción del 93% y 94 % de la DQO Y DBO respectivamente.

El Espesador de lodos (ES-4503) tiene la función principal de concretar el flujo de lodos a niveles de orden del 1.5% al 3% para el retorno de solidos suspendidos totales, estos lodos serán enviados a deshidratación por medio de la centrifuga CEL-5504 A/B. Por otra parte el agua clarificada en el ES-4503 se incorporara a la salida del CL-5502 A/B/C.

**Tabla 5.9** Equipos de tratamiento secundario

<b>Tratamiento Secundario</b>		
	<b>Actual</b>	<b>Propuesta</b>
<b>Equipos</b>	* Reactor biológico (RB-5501 A/B)	* Reactor biológico (RB-5501 A/B)
	Clarificador sedimentador secundario (CL-5502 A/B)	Clarificador sedimentador secundario (CL-5502 A/B/C)
	Espesador de lodos (ES-5503)	Cárcamo de lodos biológicos (CP-5512)
	Pileta de estabilización (PE-5505)	Espesador de lodos (ES-5503 A/B)
	Centrifuga de lodos (CEL-5504 A/B)	Cárcamo para retorno de lodos (TA-5507 TZ-5506)
	Medidor de flujo tipo parschall (RF-5516)	Centrifugadora de lodos secundarios (CEL-5504 A/B)
		Carro transportador de lodo (CTL-550# A/B)
<b>Costo (USD)</b>		<b>\$ 4 523 896 USD</b>

En la tabla 5.10 se presentan los nuevos equipos del tratamiento terciario, siendo el Filtro de discos (FD-5501 A/B/C) el primer equipo al que se enviara el agua de salida el tratamiento secundario, dicho equipo es de material de acero inoxidable 304, estará aproximadamente un 60% sumergido y a través de discos con malla filtrante de 50 a 200 mm para la retención de partículas. Operará automáticamente con una presión requerida e 7.5 a 8 bar.

En el tratamiento terciario se podrá contar con la tecnología avanzada de ultrafiltración y nanofiltración, por medio de un lavado en membranas con diferente diámetro, así como un nuevo sistema de cloración (SCL-6501).

**Tabla 5.10** Equipos de tratamiento terciario

<b>Tratamiento Terciario</b>		
Flujo m3/d	Actual	Nuevo
Equipos	Sistema de Cloración (DO-5502 A/B)	Filtro de discos (FD-6501)
		Cárcamo de transferencia de agua clarificada (TC-6508)
		Sistema de ultrafiltración (UF-6509 A/B/C/D)
		Tanque de transferencia de agua de rechazo de ultrafiltración a nanofiltración (TV-6510)
		Sistema de nanofiltración (NF-6510 A/B/C/D)
		Tanque de transferencia de agua de rechazo de ultrafiltración y nanofiltración (TV-6560)
		Tanque de almacenamiento de agua de nanofiltración (TV-6506)
		Sistema de cloración (SCL-6501)
		Tanque de mezcla y cloración de agua de nanofiltración (TV-6570)
Costo (USD)		<b>\$ 21 035 211 USD</b>

Inversión	Área de inversión	Descripción de los costos en cada área de inversión	Costo (USD)	Costo del Tratamiento					
				Importe (USD)	% Total				
Proceso	Tratamiento Primario	Recepción General de Efluentes	\$1,147,521	\$19,188,017	31				
		Eliminación de COVs	\$647,623						
		Separación de Grasas y Aceites	\$11,630,254						
		Ajustes de pH y Neutralización Inicial	\$2,836,686						
		Neutralización Final e Igualación	\$546,924						
		Almacenamiento de Contingencia	\$1,885,149						
		Almacenamiento de Grasas y Aceites	\$74,854						
		Tratamiento de Lodos Primario.	\$419,006						
		Sistema de Reacción Biológica	\$2,626,298						
		Transferencia y Espesamiento de Lodos	\$762,806						
Proceso	Tratamiento Secundario	Sistema de Clarificación	\$409,979	\$4,523,896	7				
		Tratamiento de Lodos Secundario	\$713,887						
		Suministro de Aire para Tratamientos	\$10,926						
		Filtración de Agua Clarificada	\$2,525,741						
		Filtración Avanzada	\$17,423,247						
Servicios Auxiliares	El área de Servicios Auxiliares	Tanques de Transferencia de Filtración	\$974,703	\$21,035,211	34				
		Cloración	\$111,520						
		Aire	\$718,527						
		Agua	\$281,029						
		Vapor	\$40,482						
		Químicos	\$731,768						
		Residuos	\$438,004						
		Sistema de Tubería del Proceso	Tuberías del Proceso			Tuberías del Proceso	\$6,055,702	\$6,055,702	10
						Sistemas Contra Incendio	\$698,114		
		Infraestructura Auxiliar	Infraestructura Auxiliar			Preparación de Sitio	\$759,847	\$9,649,465	15
Estructuras Y Soportes	\$444,527								
Edificios de Proceso	\$3,714,977								
Edificio nuevo para CCM Y CCD	\$4,032,000								
<b>Total Del Presupuesto sin IVA</b>			<b>\$62,662,101</b>	<b>62,662,101.00</b>	<b>100</b>				

**Figura 5.3** Tabla de costos de inversión para la Planta de tratamiento de efluentes (Adaptado del proyecto desarrollo de la ingeniería básica para la optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales del Complejo Petroquímico Morelos, 2011)

# Capítulo VI

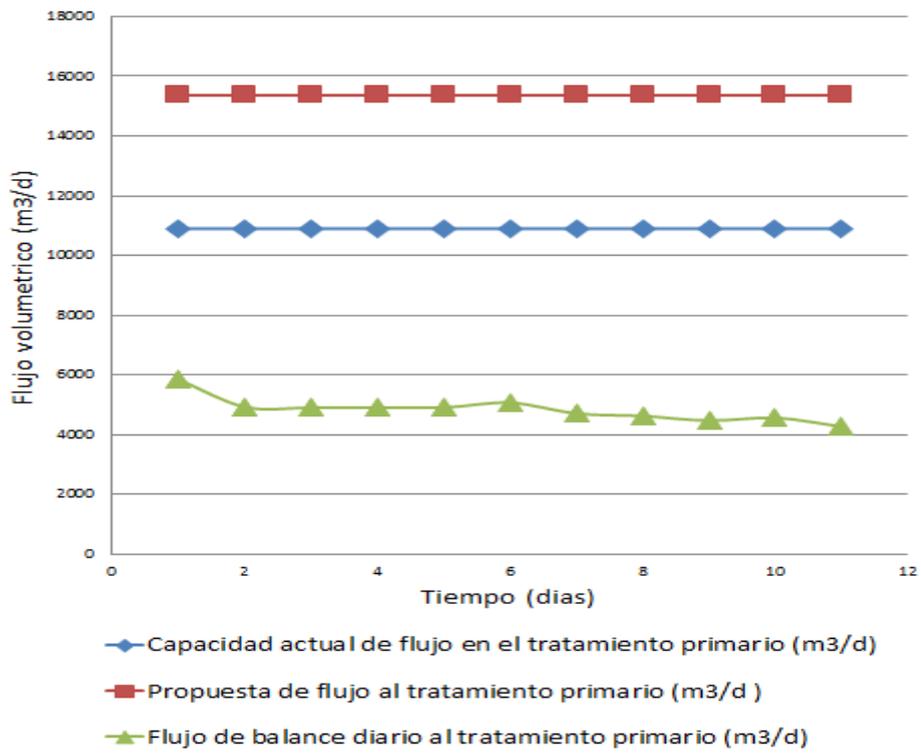
## Resultados y discusión

En base a los análisis realizados en los tres tratamientos de agua residual, fueron comparados con los obtenidos por el proyecto “Desarrollo de la ingeniería básica para la mejorar de la Planta de tratamiento de efluentes del complejo petroquímico Morelos”. Se obtuvieron los siguientes resultados:

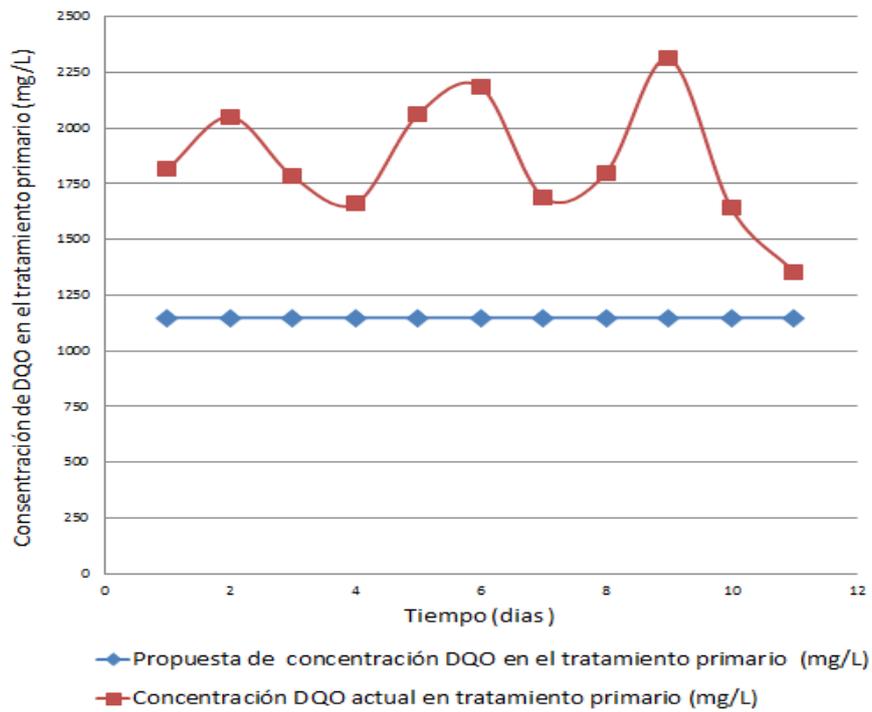
### **6.1 Flujo volumétrico y concentración de DQO en el tratamiento primario.**

En la figura 6.1 se muestra la cantidad de flujo al tratamiento primario y el aumento volumétrico de un 34% que es el nuevo flujo al tratamiento primario. Se recibirá un nuevo caudal de agua residual del Complejo pajaritos con un flujo volumétrico 5000 m<sup>3</sup>/d.

En el tratamiento primario está disponible para tratar 10900 m<sup>3</sup>/d de aguas residuales. En el balance actual llega un flujo de 5838 m<sup>3</sup>/d se obtuvo una concentración de 1814 mg DQO/L, y la propuesta de flujo en el tratamiento primario será de 15366.5 m<sup>3</sup>/d con 1148 mg DQO/L. Se obtuvo menor concentración de DQO que se muestra en la tabla 6.1.1 del tratamiento primario por que el nuevo flujo de entrada de agua residual del Complejo Pajaritos es alto, pero la concentración de DQO es baja, habiendo mayor dilución. A pesar del aumento del volumen en el tratamiento primario, la eliminación de grasas y aceites, y la neutralización del pH dan como resultado una menor concentración de DQO en dicho tratamiento.



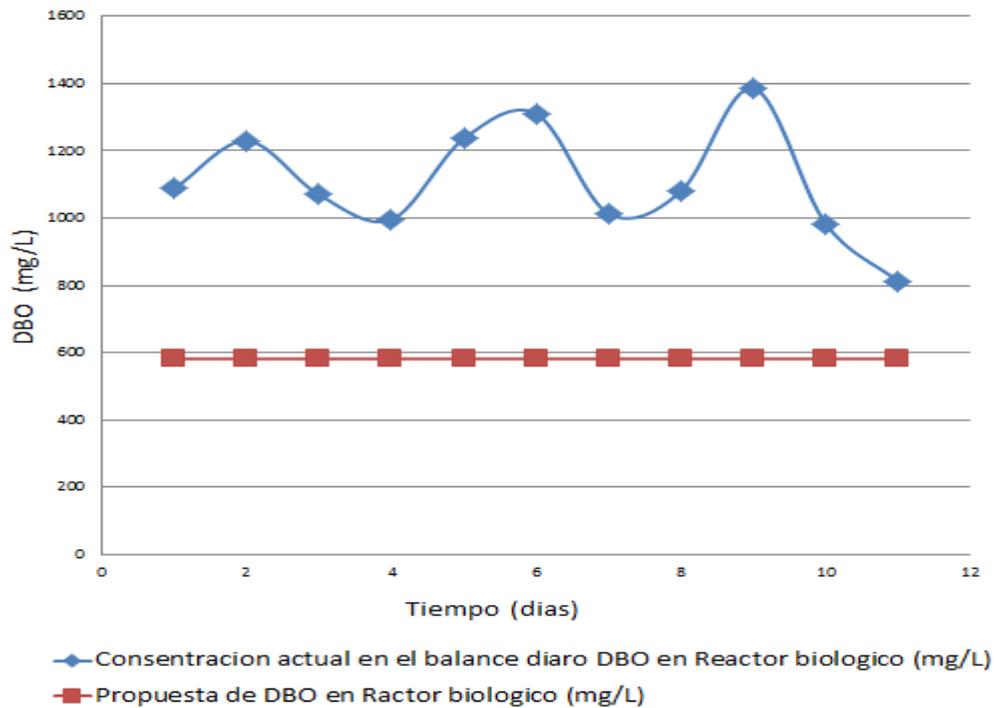
**Figura 6.1** Flujo volumétrico al tratamiento primario



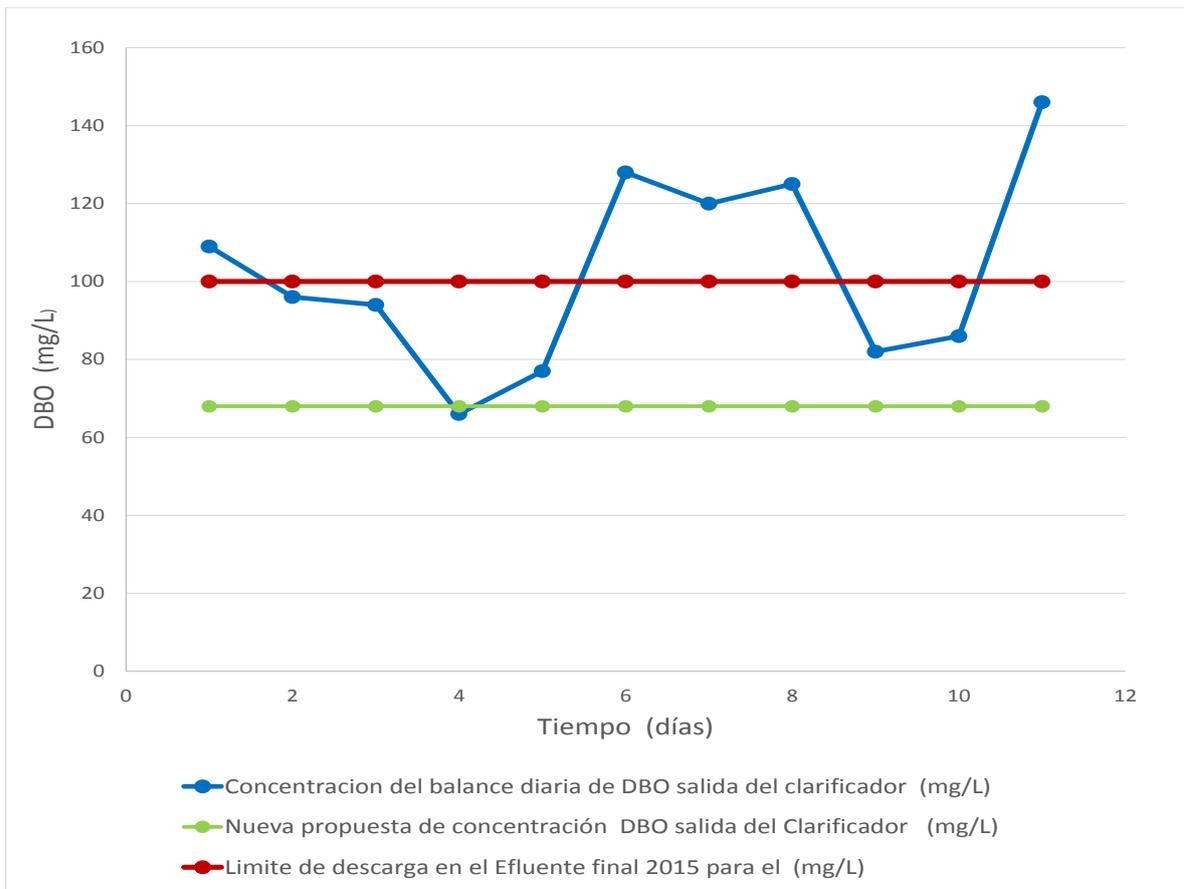
**Figura 6.1.1** Concentración de DQO en el tratamiento primario

## 6.2 Concentración de DBO en el tratamiento secundario

En la figura 6.2 y 6.2.1 se cuantifico y analizo el volumen en el tratamiento secundario de 5838 m<sup>3</sup>/d con 1088 mg DBO/L y a la salida el clarificador con 65 mg DBO/L obteniendo una remoción de materia (Romero Aguilar M. *et al*, 2009) del 94% de DBO en el tratamiento secundario. Actualmente la planta de efluentes solo tiene en buenas condiciones el RB-4501 B, se necesita reparar el RB-4501 A y su sistema de aireación para satisfacer el nuevo flujo volumétrico que tendrá el tratamiento secundario siendo de 18 461 m<sup>3</sup>/d con una concentración de 582 mg DBO/L y a la salida del clarificador una concentración de 35 mg DBO/L obteniendo un 94% de remoción de DBO. Cabe señalar que es indispensable tomar en cuenta la inversión en el tratamiento secundario ya que la nueva normatividad a cumplir en la descarga de aguas residuales tratadas en el complejo petroquímico Morelos para la concentración en DBO es 100 mg DBO/L.



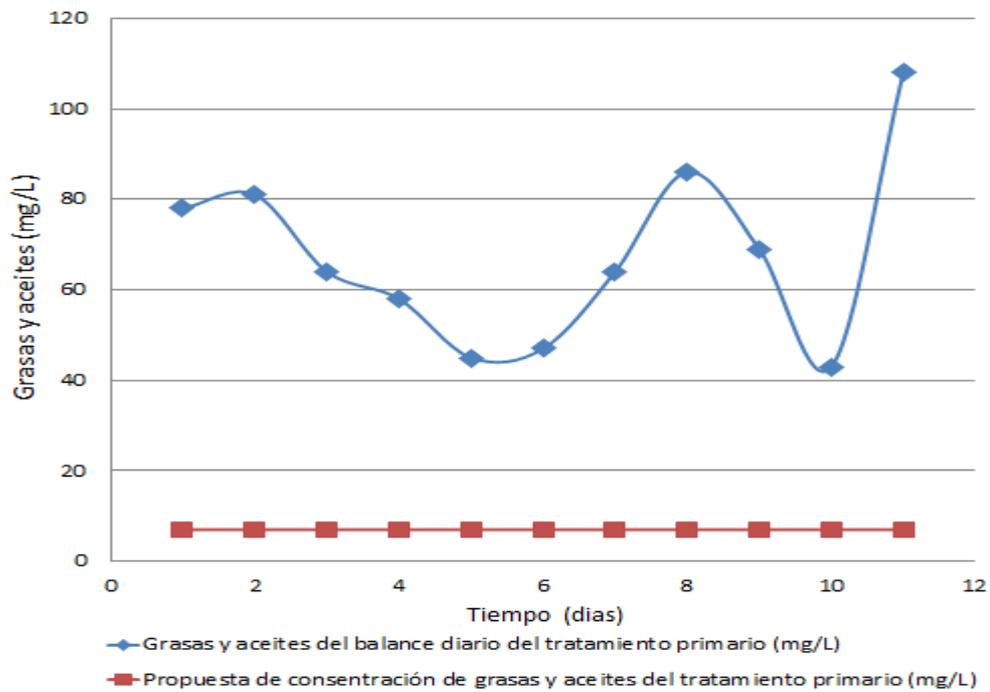
**Figura 6.2** Concentración DBO en el tratamiento secundario.



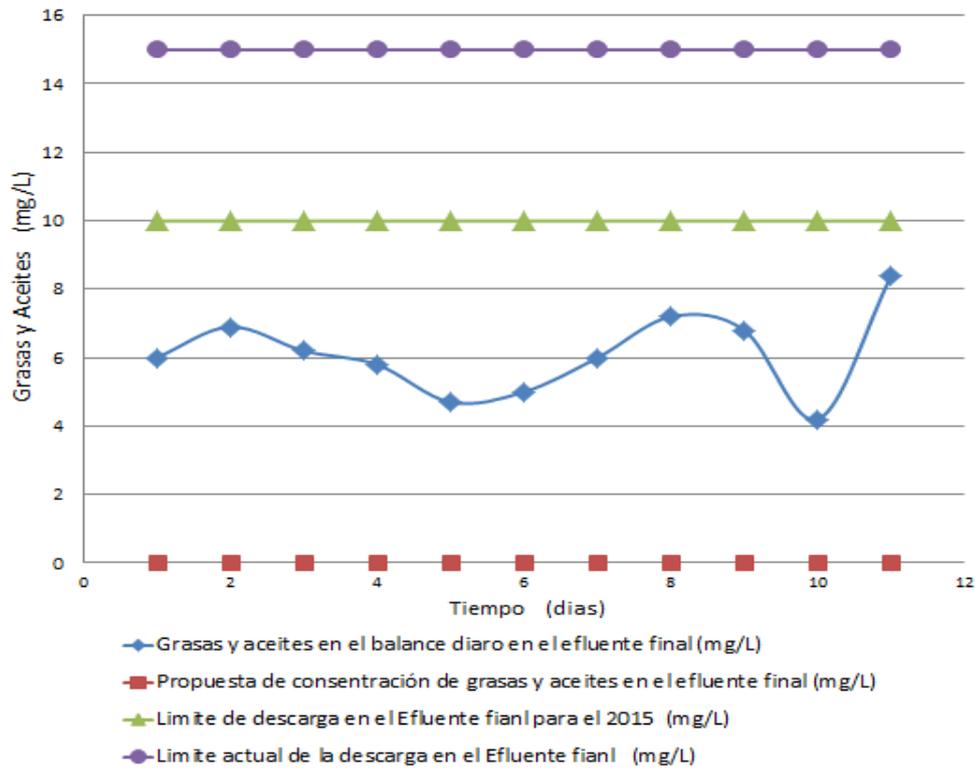
**Figura 6.2.1** Concentración DBO a la salida del tratamiento secundario.

### 6.3 Concentración de grasas y aceites en el tratamiento secundario y en el efluente final.

En la figura 6.3 y 6.3.1 se muestra actual tratamiento se obtuvo 78 mg/L de grasas y aceites, en el efluente final se obtuvo 5.1 mg/L de este contaminante, tenido un 93% de remoción de grasas y aceites. En la figura 2.1, los flujos de entrada 1, 2 y 3 se cuantifico la cantidad de grasas y aceites de cada corriente. Cada una de estas corrientes pasó por separación de sólidos, grasas y aceites reduciendo el volumen de flujo a 8442 m<sup>3</sup>/d y 611 mg/L de grasas y aceites. A la salida del tratamiento secundario se obtuvo 0.5 mg/L de grasas y aceites con una remoción del 93% y en el efluente final 0 mg/L de grasas y aceites con una remoción del 100%.



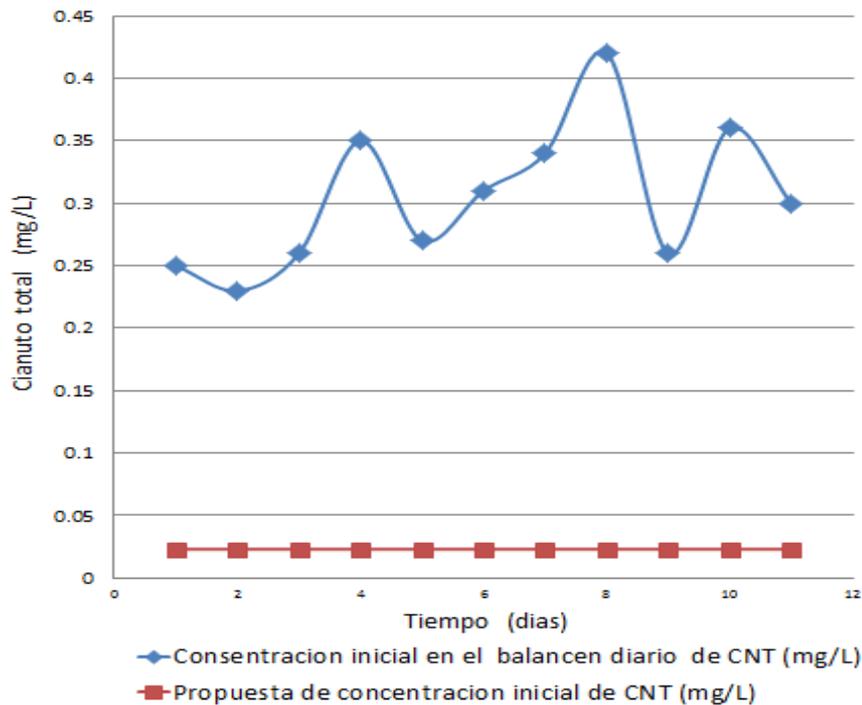
**Figura 6.3** Concentración de grasas y aceites en el tratamiento primario



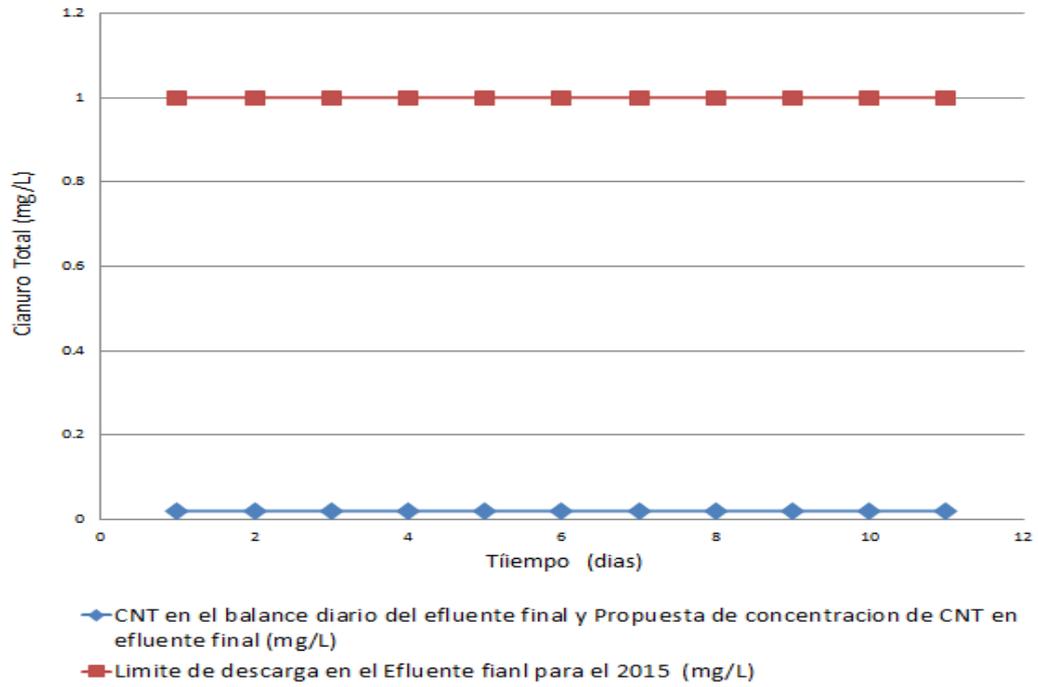
**Figura 6.3.1** Concentración de grasas y aceites en el efluente final.

## 6.4 Concentración inicial de cianuros totales y en el efluente final.

La presencia de cianuros totales en las aguas residuales a tratar en la planta de efluentes es proveniente del caudal de la planta de acrilonitrilo. En el balance presentado en la figura 5.1 se obtuvo un flujo de 368 m<sup>3</sup>/d con 0.25 mg/L de cianuros totales y en el efluente final 0.02 mg/L, teniendo una remoción de cianuros totales de 92%. El nuevo flujo que se presentara de aguas residuales de la planta de acrilonitrilo será 250 mg/L con 1.4 mg/L de cianuros totales, después de haber pasado la etapa de neutralización, el afluyente del agua residual del tratamiento primario tendrá 0.023 mg/L, y en efluente final con 0.02 mg/L de cianuros totales con una remoción del 98%. Como se muestra en el figura 6.4 y 6.4.1 la concentración inicial y en el efluente final de cianuros totales que se presentan en el balance de la figura 5.1. y la nueva concentración de inicial y en el efluente final de cianuros totales que se muestran en la figura 2.2 y 2.7.



**Figura 6.4** Concentración de Cianuros totales en el tratamiento primario

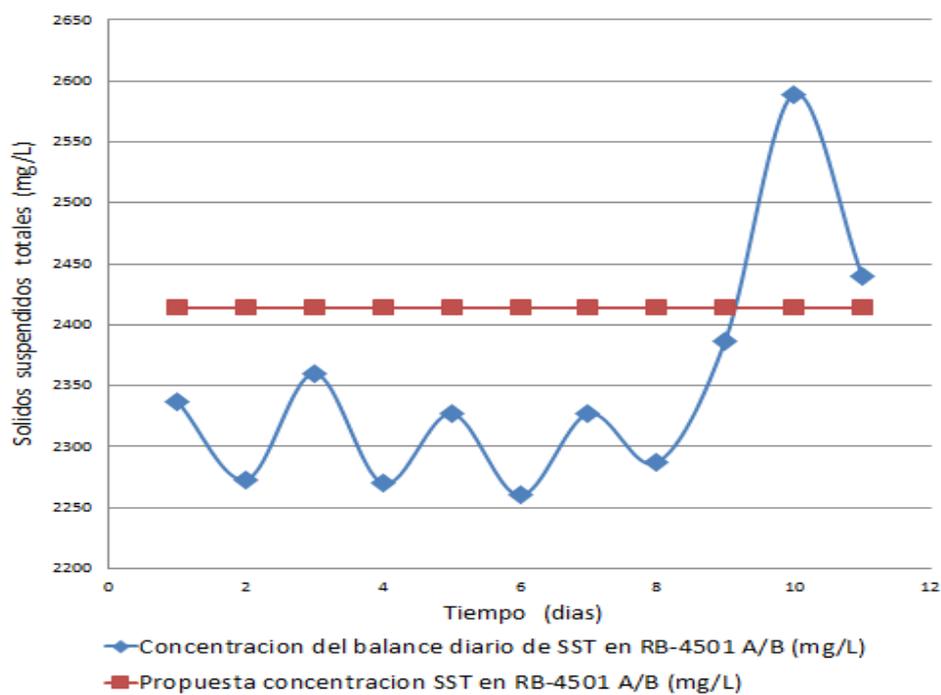


**Figura 6.4.1** Concentración de Cianuros totales en el efluente final

## 6.5 Concentración de sólidos suspendidos totales (SST) en el tratamiento secundario y el efluente final.

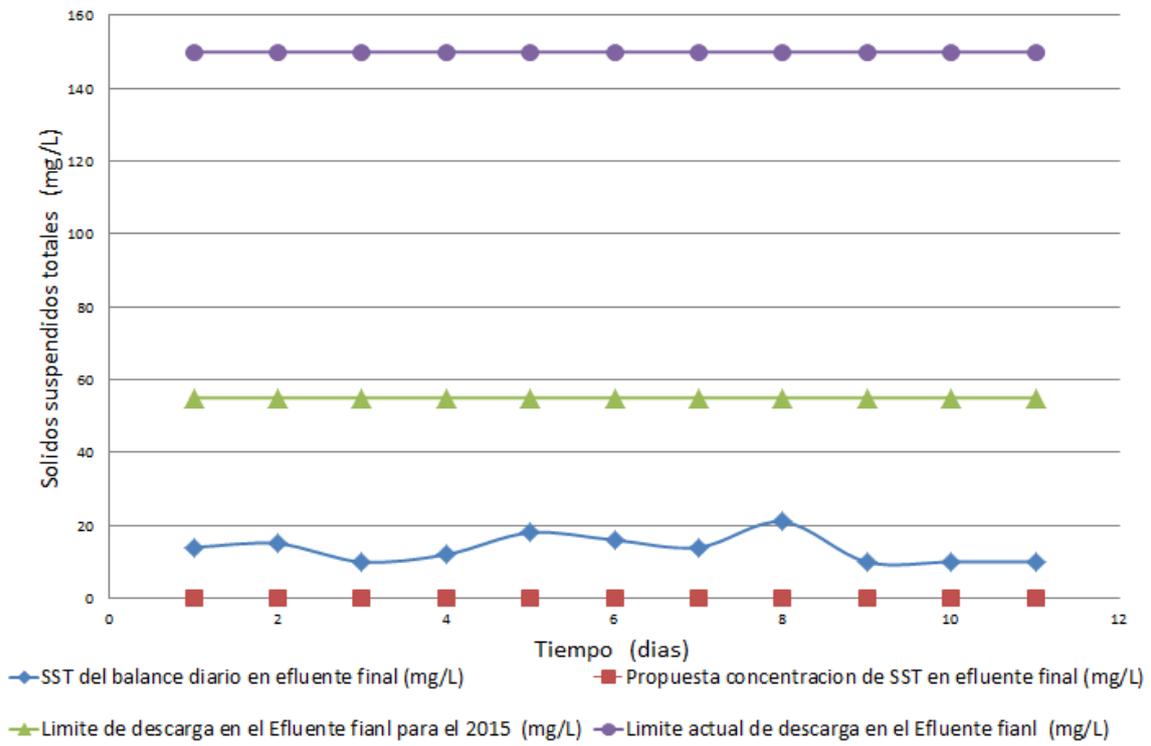
La concentración de SST en el tratamiento secundario y en el efluente final basados del balance de la figura 5.1, obteniendo en un flujo de  $5838 \text{ m}^3/\text{d}$  con  $2337 \text{ mg/L}$  de SST en el tratamiento secundario y en el efluente final  $14 \text{ mg/L}$ , obteniendo un remoción del  $99.5 \%$ . En comparación con el balance mostrado en la figura 2.3 se obtuvo un flujo de  $18\,461 \text{ m}^3/\text{d}$  con  $53 \text{ mg SST /L}$  y en la figura 2.7 la concentración de SST en el efluente final es de  $0 \text{ mg/L}$  con una remoción del  $100\%$ .

En la siguiente figura 6.5 y 6.5.1 se observa la concentración que se analizó de SST en el tratamiento secundario y el efluente final comparándolos con la nueva concentración de SST en el tratamiento secundario y con la nueva concentración del efluente final.



Fig

ura 6.5 Concentración de sólidos suspendidos totales en el tratamiento secundario

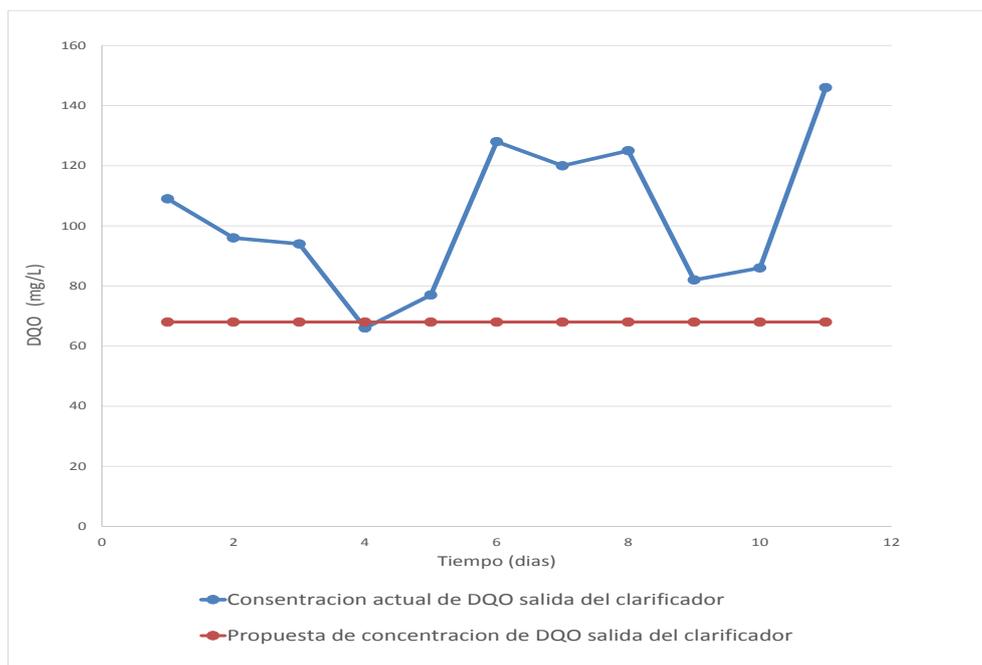


**Figura 6.5.1** Concentración de sólidos suspendidos totales en el efluente final

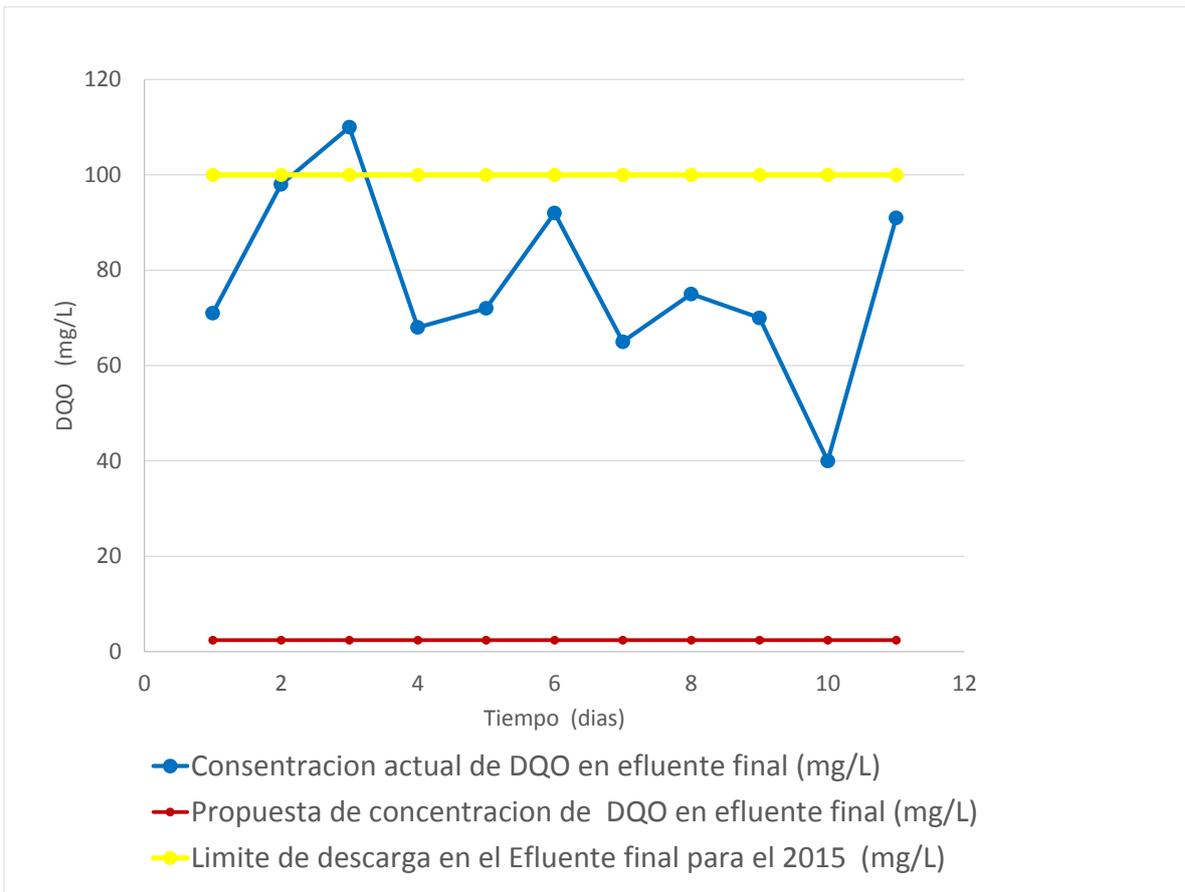
## 6.6 Concentración de DQO en la salida del clarificador y en el efluente final.

En la figura 6.6 se compara la concentración actual y propuesta de DQO a la salida del clarificador actual y la salida de la concentración de DQO de los clarificadores de la propuesta en el tratamiento secundario. Y en la figura 6.6.1 se compara la concentración actual de DQO en el efluente final del tratamiento terciario contra la nueva concentración final de DQO propuesta en el nuevo tratamiento secundario.

Actualmente en el tratamiento secundario en la salida del clarificador se cuantifica una concentración de 109 mg/L de DQO y en efluente final del tratamiento terciario con 71 mg DQO/L, obteniendo una remoción del 35 %. En comparación con el nuevo tratamiento secundario se tendrá una concentración de 68 mg DQO/L y en efluente final de 2.5 mg DQO /L obteniendo el 96% de remoción de DQO.



**Figura 6.6** Concentración actual y propuesta de DQO a la salida del clarificador.

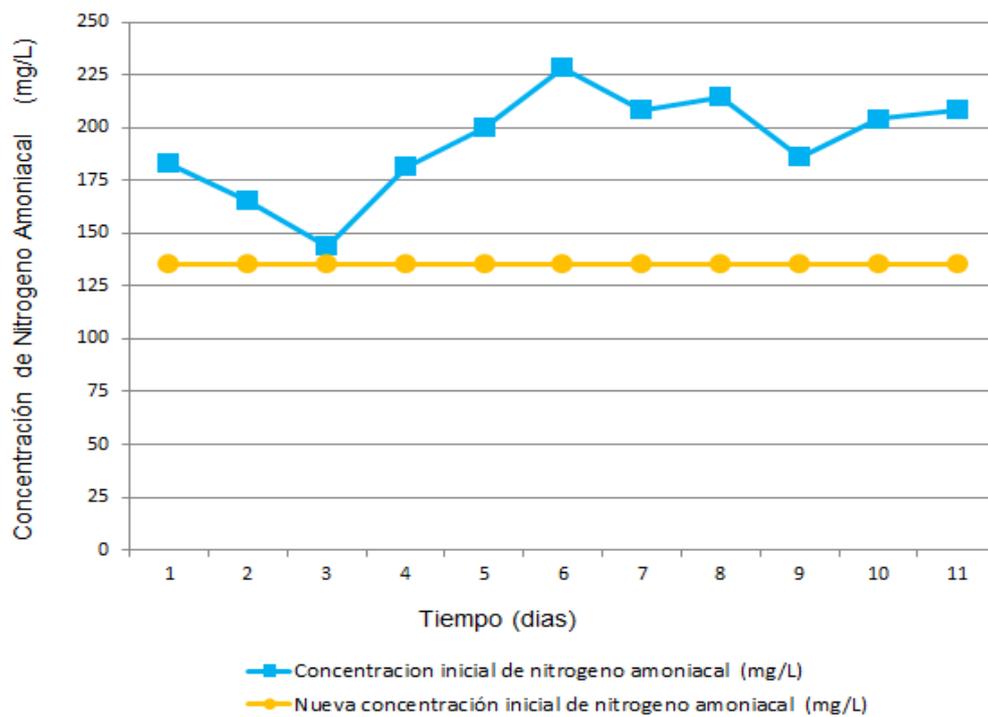


**Figura 6.6.1** Concentración actual y propuesta de DQO a la salida actual del efluente final.

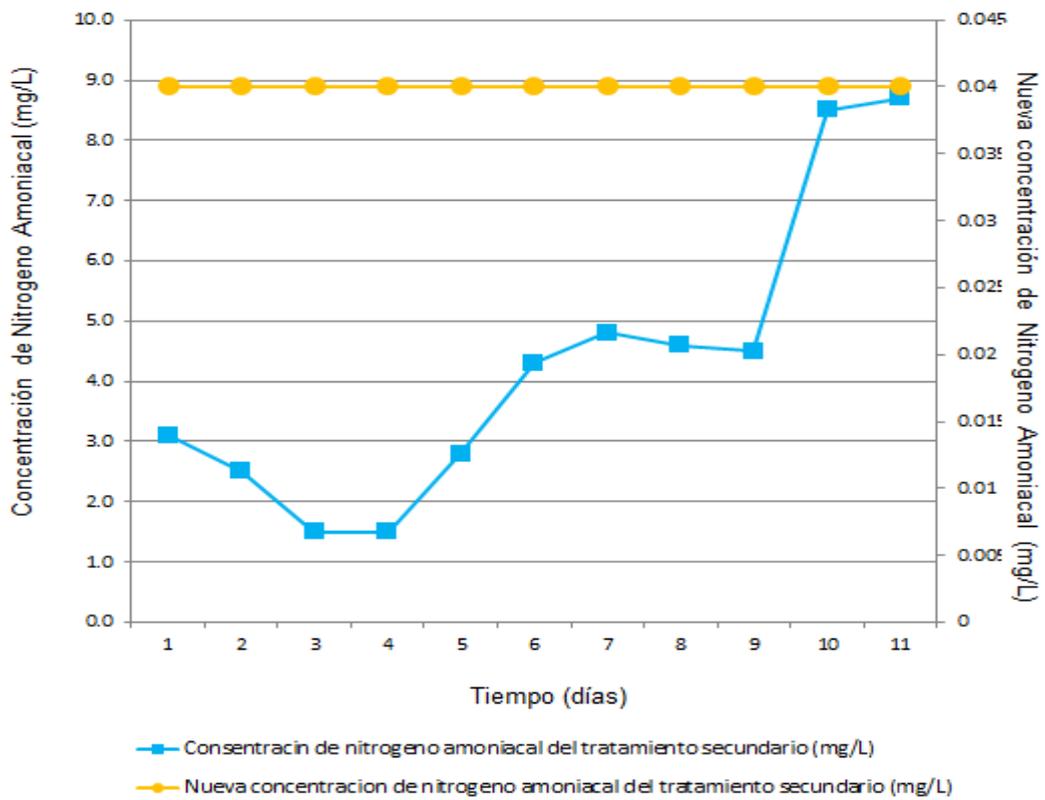
## 6.7 Concentración inicial de nitrógeno amoniacal y en el tratamiento secundario.

El nitrógeno amoniacal es un contaminante de las aguas residuales procedente de la planta de acrilonitrilo, en la figura 6.7 se demuestra la concentración inicial de nitrógeno amoniacal con 183 mg/L y en a figura 6.7.1 se presenta la concentración de dicho contaminante en el efluente final con 3.1 mg/L respectivamente con una remoción del 98%.

En la comparación de la eliminación de este contaminante se manejara una nueva concentración inicial de 135 mg/L como lo muestra la figura 6.7 y 0.04 mg/L en el efluente final presentados en la tabla 6.7.1, donde se obtuvo una remoción del 100%



**Figura 6.7** Concentración inicial de nitrógeno amoniacal.



**Figura 6.7.1** Concentración de nitrógeno amoniacoal en la salida del clarificador del tratamiento secundario

## **6.8 Discusión de resultados para la determinación de inversión para la planta de tratamiento de aguas residuales del complejo petroquímico Morelos.**

En la anterior figura 5.3 se mostró el desarrollo de los costos de inversión para el mejoramiento de la planta de tratamiento de efluentes haciendo un total de \$ 62 662 102 dólares (USD). Parte del tratamiento primario tiene como presupuesto \$ 15 804 407 USD de inversión, con el objetivo de ampliar la capacidad de la planta a un 34% de flujo volumétrico, que cuente con equipos cerrados con una línea de conexión hacia un soplador para eliminar los gases emitidos en la cada etapa del proceso.

En dicho tratamiento se obtendrá nueva tecnológica para la eliminación de sólidos y grasas, obteniendo un 99.5% de remoción de materia, teniendo así menos contaminantes al concluir el tratamiento primario y será beneficiado el tratamiento secundario al no tener emulsiones de aceite-agua.

En el proceso de la neutralización del pH tendrá un costo total de \$ 3 383 610 USD, se realizara a cada corriente de entrada la neutralización gruesa y neutralización fina, que es donde se juntaran todas las corrientes que pasaron el proceso de eliminación de sólidos, grasas y aceites, al igual de las corrientes hidráulicas que fueron neutralizadas particularmente lo cual es de vital importancia para obtener un pH optimo de 7 y una temperatura de 37 °C.

Con la neutralización fina y gruesa, la eliminación de sólidos, grasas y aceites el tratamiento primario tiene un costos de \$19 188 017 USD, contara con equipos tapados herméticamente, tendrán un línea de conexión hacia un soplador para eliminar los gases emitidos en la cada etapa del proceso siendo enviados a la Planta de Mutsui.

Para el tratamiento secundario se tiene un presupuesto de \$ 4 523 896 USD, contara con la reparación y modernización de los reactores biológicos para poder procesar en ambos reactores. Ya que actualmente de los dos reactores que existen, solo uno está en condiciones de operación,

Así también contara con equipos nuevos los clarificadores, espesador, centrifuga de lodos, cárcamo de retorno de lodos y un cárcamo de lodos biológicos.

En la demostración de la remoción de materia efectiva de las grasas y aceites se evaluó la concentración inicial contra la concentración final en el tratamiento secundario dando como resultado un 93% de remoción de materia, que es equivalente a 0.5 mg/L de grasas y aceites. Para el cumplimiento de la nueva normatividad específica 10 mg/L son permitidos para la descarga de grasas y aceites en el efluente final. Se comprueba que el tratamiento primario es necesario para cumplir con la nueva normatividad ambiental.

Con las condiciones actuales de operación que tiene la planta de tratamiento de efluentes en el tratamiento secundario tiene una concentración de SST de 2337 mg/L y en efluente final de 14 mg/L teniendo una remoción del 99.5%. En dicho tratamiento la fase del clarificador es esencial para la reducción de SST en el caudal. Si se invierte en el nuevo tratamiento secundario se tiene la disponibilidad de tres clarificadores secundarios así como de un espesador que logran la concentración de 24 mg SST/L. El nuevo límite máximo permisible de descarga en el efluente final de SST es de 55mg/L, con la inversión de la propuesta de un nuevo tratamiento secundario se podrá cumplir con el nuevo límite de descarga.

En relación a la concentración de DQO actual en el tratamiento de efluentes se tiene una remoción del 49 % con 71 mg DQO/L en el efluente final, invirtiendo el nuevo tratamiento secundario se logra obtener 68 mg DQO/L, siendo un rango suficiente para aprobar la nueva normatividad ambiental, ya que establece un límite máximo de descarga en el efluente final de 100 mg DQO/L.

En la determinación de nitrógeno amoniacal solo se analiza a la salida del clarificador (CL-5502 A/B), en la nueva normatividad ambiental exige el análisis de este contaminante en el efluente final con una concentración de límite de descarga máximo de 5mg/L de nitrógeno amoniacal.

En el resultado de la inversión de un nuevo tratamiento secundario se obtendrá una remoción del 100% de nitrógeno amoniacal con una concentración de 0.04 mg/L, el cual satisface el límite máximo de descarga en el efluente final.

Después de comparar en la graficas la concentración de los siguientes parámetros: grasas y aceites, SST, DQO, DBO, cianuros totales y nitrógeno amoniacal, todos cumplen los límites máximos permisibles para la nueva normatividad ambiental, invirtiendo en el nuevo tratamiento primario y secundario. Se llegó a la discusión que la propuesta para un nuevo tratamiento terciario, en las secciones de filtración de agua clarificada, filtración avanzada (ultrafiltración y nanofiltración) y los tanques de transferencia de filtración no será necesario invertir en esta parte de la propuesta. Logrando una reducción del nuevo tratamiento terciario \$ 21 035 211 USD, ya que de dicho tratamiento solo se invertirá para modernizar y ampliar el sistema de cloración con una inversión de \$111 520 USD.

En la siguiente figura 6.8 se describe la inversión que fue aprobada para cubrir el rediseño del sistema de tratamiento de aguas residuales del complejo petroquímico Morelos para el cumplimiento de la nueva normatividad en las descargas oficiales.

Inversión	Área de inversión	Descripción de los costos en cada area de inversión	Costo (USD)	Costo del Tratamiento	
				Importe (USD)	% Total
Proceso	Tratamiento Primario	Recepción General de Efluentes	\$1,147,521	\$19,188,017	56
		Eliminación de COVs	\$647,623		
		Separación de Grasas y Aceites	\$11,630,254		
		Ajustes de pH y Neutralización Inicial	\$2,836,686		
		Neutralización Final e Igualación	\$546,924		
		Almacenamiento de Contingencia	\$1,885,149		
		Almacenamiento de Grasas y Aceites	\$74,854		
		Tratamiento de Lodos Primario.	\$419,006		
		Sistema de Reacción Biológica	\$2,626,298		
		Transferencia y Espesamiento de Lodos	\$762,806		
		Sistema de Clarificación	\$409,979		
		Tratamiento de Lodos Secundario	\$713,887		
		Suministro de Aire para Tratamientos	\$10,926		
Proceso	Tratamiento Terciario	Filtración de Agua Clarificada	\$0	\$111,520	0.33
		Filtración Avanzada	\$0		
		Tanques de Transferencia de Filtración	\$0		
		Cloración	\$111,520		
		Aire	\$718,527		
Servicios Auxiliares	El área de Servicios Auxiliares	Agua	\$281,029	\$2,209,810	7
		Vapor	\$40,482		
		Químicos	\$731,768		
		Residuos	\$438,004		
Sistema de Tubería del Proceso	Tuberías del Proceso	Tuberías, Válvulas e instrumentos del Proceso	\$6,055,702	\$6,055,702	18
Infraestructura Auxiliar	Infraestructura Auxiliar	Sistemas Contra Incendio	\$698,114	\$1,902,488	6
		Preparación de Sitio	\$759,847		
		Estructuras Y Soportes	\$444,527		
		Edificios de Proceso	\$0		
		Edificio nuevo para CCM Y CCD	\$0		
<b>Total Del Presupuesto sin IVA</b>			<b>\$33,991,433</b>	<b>33,991,433.00</b>	<b>100</b>

Figura 6.8 Modificación de los costos de inversión para el rediseño de la planta de tratamiento de efluentes.

# Capítulo VII

## Conclusión y recomendaciones

Después de haber analizado las tecnologías y el proceso del proyecto “desarrollo de la ingeniería básica para la optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales del complejo petroquímico Morelos”, se observó que hay un gran impacto de nivel económico con un costo de \$ 62 662 101 USD (dólares), cuyo presupuesto es muy elevado para la modernización de una planta de tratamiento de efluentes de dicho complejo.

En la discusión de resultados del balance de materia y remoción de materia orgánica que se realizó con el proceso actual del tratamiento de aguas residuales y del proyecto desarrollo de la ingeniería básica para la mejora de la planta de tratamiento de aguas residuales del complejo petroquímico Morelos, se demostró que es sustentable invertir en el tratamiento primario, secundario ya que se cumplirá la nueva normatividad ambiental para la descarga del efluente final.

En cuanto al tratamiento terciario el cual tiene un fuerte costo, se observó que por el momento no es necesario para cumplir la nueva normatividad ambiental, por ello solo se invertirá en la ampliación y remodelación del sistema de cloración.

Cabe mencionar que el rediseñar esta planta de tratamiento de aguas residuales invirtiendo en la nueva propuesta del tratamiento primario y secundario, se reduce los costos de inversión en un 54% de su totalidad. Con ello se puede ampliar la capacidad de la planta. Aunque los costos de operación se eleven, se compensara puesto que el costo de instalación de una nueva planta es mayor.

Teniendo un nuevo costo de inversión de \$ 33 991 433 USD, obteniendo así la aprobación de PEMEX petroquímica para la inversión del rediseño del sistema de tratamiento de aguas residuales del complejo petroquímico Morelos.

# Capítulo VIII

## Bibliografía

Babbitt H.E., Baumann E. R. (1983). *Alcantarillado y tratamiento de aguas negras*. Distrito Federal, México: Editorial Continental.

Baraño D.Pablo A., Tapia A. Luis A. (2004) , Tratamiento de las aguas servidas: situación en Chile, *Ciencia & Trabajo*, 13, 111-117.

Cerón García J.C. Moreno López María José., Olías Álvarez Manuel., “Contaminación y tratamiento de aguas” Máster Universitario de Ingeniería Ambiental. Universidad De Huelva 2005 Segunda Edición Módulo III

Cideteq y UNAM. (2011). *Libro de proyecto desarrollo de la ingeniería básica para la optimización de la planta de tratamiento de agua residuales del Complejo Petroquímico Morelos*. Coatzacoalcos: Veracruz

Comisión nacional del agua, (2011), *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación*, México: Secretaría del medio ambiente y recursos naturales.

De Turrís A, Yabroudi S. C., Valbuena B., Gutiérrez C., Cárdenas C., Herrera L y Rojas C. (2011). Tratamiento de aguas de producción por flotación con aire disuelto. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 211-218.

ERIJMAN L., M. FIGUEROLA EVA L., D. GUERRERO L., M. AYARZA J, (2011), Impacto de los recientes avances en el análisis de comunidades microbianas sobre el control del proceso de tratamiento de efluentes, *Revista Argentina de Microbiología*, vol 43, 127-135.

Espinoza Osorio C. (2010). *Manual de capacitación tecnológico*. Coatzacoalcos, Veracruz. Sistema de capacitación modular.

J. E. Forero, J. Díaz Y V. R. Blandón. “Diseño de un nuevo sistema de flotación para tratamiento de aguas industriales” Ecopetrol - Instituto Colombiano del Petróleo, (Santander, Colombia). Dic. 1999. Vol. 1 Núm. 5. Pag 67-75 E-mail:

J. Olguín E., Hernández E.M., Sánchez Galván G., (2007), Contaminación de manglares por hidrocarburos y estrategias de biorremediación, fitorremedacion y restauración, *Red de revistas científicas de América latina, el Caribe, España y Portugal*, vol 23, 139-154.

Méndez Novelo R., Novelo López A., Coronado Peraza V., Castillo Borges E., Sauri Riancho M.R.,(2008), Remoción de materia orgánica y metales pesados de lixiviados por flotación con aire disuelto. *Red de revistas científicas de América latina, el Caribe, España y Portugal*. vol. 12, núm. 1, 13-19.

NMX-AA-003-1980

NMX-AA-008-SCFI- 2000

NMX-AA-007-SCFI- 2000

NMX-AA-030-SCFI- 2001

NMX-AA-058-SCFI- 2001

NMX-AA-034-SCFI- 2001

NMX-AA-005-SCFI- 2000

NMX-AA-026-SCFI- 2001

NMX-AA-028-SCFI- 2000

Pacheco Salazar V., Jáuregui Rodríguez B., Pavón Silva T. Y Mejía Pedrero G. V., (2003) Control del crecimiento de microorganismos filamentosos en una planta de tratamiento de aguas residuales industriales. *Rev. Int. Contam. Ambient*, 19 (1), 47-53.

Ramalho, R.S. (1996). *Tratamiento de aguas residuales*. Barcelona, España: Editorial Revertè.

Romero-Aguilar Mariana, Colín Cruz Arturo, Sánchez-Salinas Enrique y Ortiz-Hernández Ma. Laura. (2009), Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Rev. Int. Contam. Ambient*, 25 (3), 157-167.

Torrescano España Jose Luis, (2009), Parámetros de operación en el proceso de tratamiento de agua residual por lodos activados, *aquaforum*, 52, 14-19.

Winkler M. A. (1996). *Tratamiento biológico de aguas de desecho*. Distrito Federal, México. Editorial Limusa.