



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**

**ANTEPROYECTO DE UNA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUAS EN EL PROCESO
DE EMULSION DE ESTIRENO - BUTADIENO.**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERA QUÍMICA
P R E S E N T A
CAROLINA FONT PALMA

ASESOR: IQ. ARIEL BAUTISTA SALGADO



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
P R E S E N T E



ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

Anteproyecto de una Planta de Tratamiento de aguas en el
proceso de emulsion de estireno-butadieno.

que presenta la pasante: Carolina Font Palma
con número de cuenta: 09757213-8 para obtener el título de :
Ingeniera Química

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 19 de Marzo de 2002

PRESIDENTE

I.Q. Graciela Delgadillo García

VOCAL

I.Q. Margarita Alonso Espinosa

SECRETARIO

I.Q. Ariel Bautista Salgado

PRIMER SUPLENTE

O. Celestino Silva Escalona

SEGUNDO SUPLENTE I.Q.I. Celina Elena Urrutia Vargas

A mis padres:

Profa. María Engracia Palma de Font

Ing. Luis Font Ching

por su constante guía, apoyo, estímulo y cariño
que me han brindado para obtener los logros y
satisfacciones que he alcanzado como estudiante.

A mi hermana:

Lupita con amor.

**A mis primos:
*Jesús y Engracia del Carmen.***

**A mis abuelitas:
*Carmen e Irene.***

**A Marco A. Moreno Gamboa
por su cariño.**

A mis compañeros y profesores,
especialmente al *Dr. Adolfo Obaya Valdivia*
por sus consejos y apoyo.

Al *Ing. Ariel Bautista Salgado*,
por su entusiasta y valiosa ayuda
en la elaboración de este trabajo.

**A la *Fundación-UNAM* y al
Departamento de Intercambio Académico de la UNAM,
que me dieron la oportunidad de vivir experiencias
enriquecedoras en el extranjero y me proporcionaron
otra perspectiva en mi formación profesional,
preparación y posibilidad de aceptar otros retos en el futuro.**

**A la *FES-Cuautitlán*, que es la
Institución base de mi formación
profesional.**

INDICE

Introducción	3
I. Generalidades acerca del agua y sistemas de tratamiento de aguas	4
II. Descripción del proceso de emulsión de estireno-butadieno	18
III. Efluentes del proceso	22
IV. Análisis de alternativas y selección del sistema propuesto	24
V. Descripción del proceso de tratamiento de aguas	26
VI. Bases de diseño	28
VII. Balance de materia	32
VIII. Diagramas	
Diagrama de bloques	34
Diagrama de proceso	35
IX. Cálculo de equipos	36
X. Arreglo general de equipo	50
XI. Estimado de inversión	51
XII. Costo del tratamiento	57
Costos directos de operación	
Gastos indirectos de fábrica	
XIII. Evaluación económica	60
XIV. Conclusiones	61
XV. Bibliografía	62
Anexo A	64
Anexo B	65
Anexo C	66
Anexo D	67

Introducción

Debido a los grandes problemas ambientales actuales, ha sido necesaria la creación de normas que rijan la calidad de las descargas de aguas residuales para cualquier tipo de industria, por esto en el presente trabajo se pretende desarrollar una propuesta de factibilidad técnica-económica para lograr que los efluentes de una empresa productora de emulsiones de estireno-butadieno cumplan plenamente con los parámetros de descarga de efluentes establecidos por la actual normatividad ambiental del gobierno mexicano, y parte de estos efluentes reusarlos en el proceso para minimizar el volumen total de demanda de agua.

En esta empresa se manejan dos tipos de procesos: un producto se obtiene en un reactor tipo batch donde el producto final es un sólido, y el otro producto se obtiene en emulsión en un reactor continuo. Básicamente los efluentes son generados en una etapa del proceso donde se elimina el estireno residual por medio de una destilación por arrastre de vapor seguida de una condensación, y en otra etapa en la que se elimina agua de la emulsión para obtener un producto seco en forma de gránulos. También durante el lavado de los reactores se generan aguas contaminadas.

En este anteproyecto se hará un análisis de la problemática que existe con los efluentes actuales de una planta productora de emulsiones de estireno-butadieno, partiendo del proceso de emulsión de estireno-butadieno, indicar el tipo de contaminante y comparar respecto a la normatividad existente establecida por la SEMARNAT.

En base a la información obtenida de la empresa sobre la cantidad y tipos de efluentes que se tienen en las instalaciones y los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio se definirá la viabilidad de los mismos, se hará el diseño del proceso y el balance de materia, se calcularán y diseñarán los equipos.

También se hará un estimado de la inversión, se determinarán los costos directos de operación y los gastos indirectos de fábrica.

Por último se hará una evaluación económica del anteproyecto y emitirán conclusiones.

I. Generalidades acerca del agua y sistemas de tratamientos de aguas

El agua es un líquido insípido, incoloro e inodoro. Se trata de un compuesto químico representado por la fórmula H_2O . El agua pura no existe en estado natural ya que ésta puede contener una gran variedad de impurezas, debido a que es un solvente casi universal y en el que prácticamente todas las sustancias son solubles hasta cierto grado. A causa de esta propiedad, el agua se contamina frecuentemente por las sustancias con las que entra en contacto. Cuando las aguas contienen impurezas que representan elementos nocivos para el uso al que van a ser destinadas, a estas impurezas se les denominan contaminantes. Por lo que el grado de calidad requerido es lo que determina si una impureza es un contaminante o no.

La experiencia ha establecido, con bastante precisión, especificaciones definitivas para satisfacer los requisitos de los efluentes de agua en la mayoría de las industrias y ha indicado tolerancias fuera de las cuales el agua puede causar daño a los ecosistemas naturales.

Los contaminantes pueden encontrarse como:

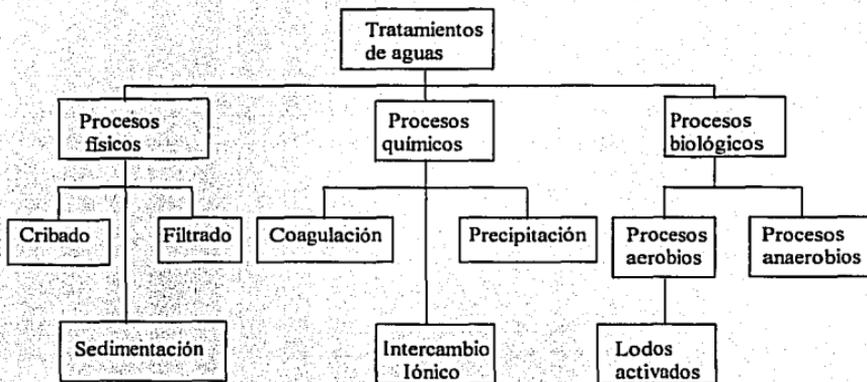
- materia orgánica soluble, medida como DBO o DQO
- aceites, grasas y material flotante
- nutrientes
- sólidos en suspensión y materia coloidal
- color, turbidez y olor
- acidez o alcalinidad
- metales pesados
- contaminantes orgánicos especiales, etc.

La mejor forma de tratar un agua residual depende de una serie de factores:

- Caudal
- Composición
- Concentraciones
- Calidad requerida del efluente
- Abundancia del agua
- Posibilidades de reutilización
- Posibilidad de vertido a una depuradora municipal

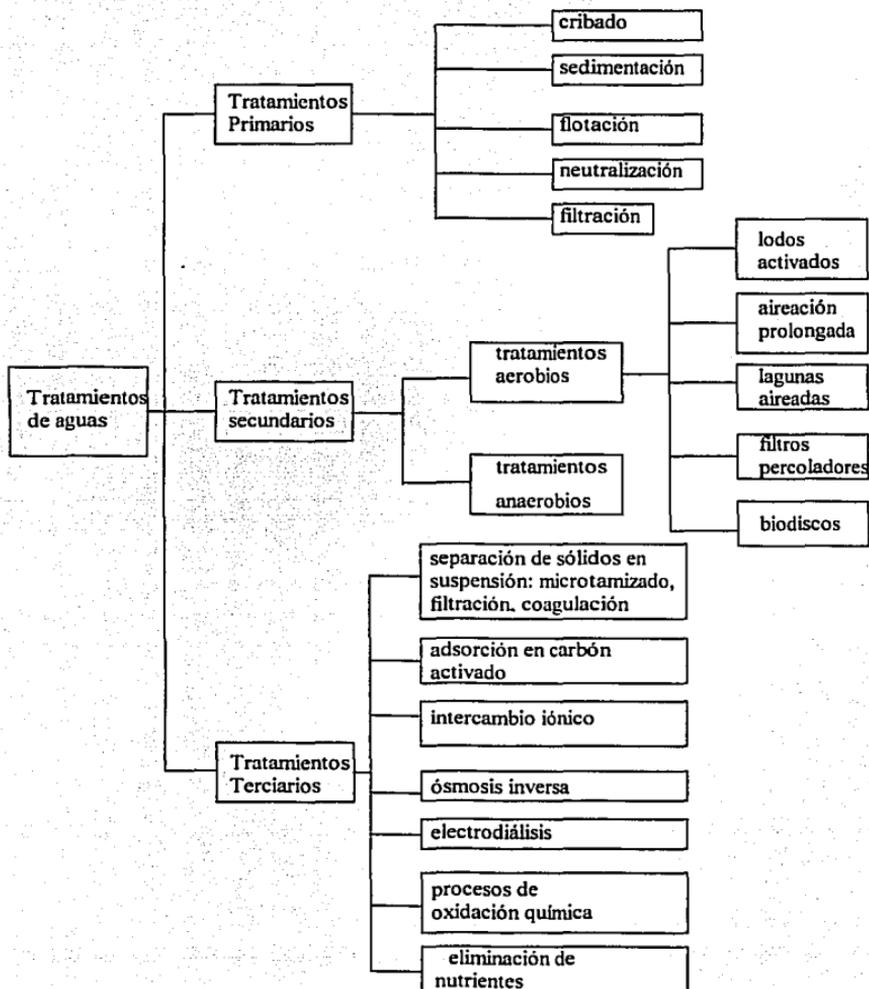
- Tasas de vertido, etc.

Una de las clasificaciones de procesos de tratamiento de aguas los dividen en:



1. **Procesos físicos.** Dependen esencialmente de las propiedades físicas de la impureza cuando ésta se encuentra en forma de sólidos suspendidos, como tamaño de partícula, peso específico, viscosidad, etc. Ejemplos comunes de este tipo de procesos son: cribado, sedimentación, filtrado.
2. **Procesos químicos.** Dependen de las propiedades químicas de la impureza o que utilizan las propiedades químicas de reactivos agregados. Algunos procesos químicos son: coagulación, precipitación, intercambio iónico.
3. **Procesos biológicos.** Utilizan reacciones bioquímicas para remover impurezas solubles o coloidales, como son las sustancias orgánicas. Los procesos biológicos aerobios (sistemas que requieren de microorganismos para descomponer y quitar sustancias orgánicas coloidales y disueltas del agua, estos microorganismos necesitan oxígeno disuelto) incluyen filtrado biológico y los lodos activados. Los procesos de oxidación anaerobia se usan para la estabilización de lodos orgánicos y desechos orgánicos de alta concentración (microorganismos que no requieren de oxígeno disuelto pues utilizan el oxígeno presente en otros compuestos como nitratos y sulfatos).

Otra clasificación de procesos de tratamiento de aguas es:



1. Tratamientos primarios.

Los tratamientos primarios preparan las aguas residuales para su tratamiento biológico, eliminan ciertos contaminantes como sólidos suspendidos, y reducen las variaciones de caudal y concentración de las aguas que llegan a la planta. Tipos de tratamientos primarios: cribado, sedimentación, flotación, neutralización y filtración.

1.1 *Cribado*. Se emplea para la reducción de sólidos en suspensión de tamaños distintos. La distancia o las aberturas de las rejillas dependen del objeto de las mismas, y su limpieza se hace bien manualmente o mecánicamente. Las materias sólidas recogidas se suelen clasificar en finos y gruesos.

Las rejillas de finos tienen aberturas de 5 mm o menos. Generalmente están fabricadas de malla metálica de acero, o en base a placas de acero perforado. Sin embargo, aunque puede llegarse a eliminar entre un 5 y un 25% de sólidos en suspensión, de un 40 a 50% se eliminan por sedimentación. Por esta razón, y también porque el atascamiento es normalmente un problema, el uso de tamices finos o con abertura pequeña no es muy normal.

Las rejillas o cribas de gruesos tienen aberturas que pueden oscilar entre los 4 y 8 o 9 cm. Se usan como elementos de protección para evitar que sólidos de grandes dimensiones dañen las bombas y otros equipos mecánicos.

1.2 *Sedimentación*. Es un tipo de separación sólido-líquido en donde la eliminación de las materias sólidas se basa en la diferencia de peso específico entre las partículas sólidas y el líquido donde se encuentran, que acaba en el depósito de las materias en suspensión. Pueden considerarse tres tipos de mecanismos o procesos de sedimentación, dependiendo de la naturaleza de los sólidos presentes en suspensión.

1.2.1 *Sedimentación discreta*. Las partículas que se depositan mantienen su individualidad, o sea, las propiedades físicas de las partículas (tamaño, forma, peso específico) no cambian durante el proceso. La deposición de partículas de arena en desarenadores es un ejemplo.

1.2.2 *Sedimentación por floculación*. La aglomeración de las partículas va acompañada de cambios en la densidad y en la velocidad de sedimentación o precipitación. La sedimentación que se lleva a cabo en clarificadores o sedimentadores primarios es un ejemplo de este proceso.

1.2.3 *Sedimentación por zonas.* Las partículas forman una especie de manta que sedimenta como una masa total presentando una interfase distinta con la fase líquida. Ejemplos de este proceso incluyen la sedimentación de lodos activados en los clarificadores secundarios y la de los flocúlos de alúmina en los procesos de tratamientos de aguas.

1.3 *Flotación.* Es un proceso para separar sólidos de baja densidad o partículas líquidas de una interfase líquida. La separación se lleva a cabo introduciendo un gas (normalmente aire) en la fase líquida, en forma de burbujas. La fase líquida se somete a un proceso de presurización para alcanzar una presión de funcionamiento que oscila entre 2 y 4 atm., en presencia del suficiente aire para conseguir la saturación en aire del agua. Luego, este líquido saturado de aire se somete a un proceso de despresurización llevándolo hasta la presión atmosférica por paso a través de una válvula reductora de presión. En esta situación, y debido a la despresurización se forman pequeñas burbujas de aire que se desprenden de la solución. Los sólidos en suspensión o las partículas líquidas (por ej. aceites) flotan, debido a que estas pequeñas burbujas les obligan a elevarse hacia la superficie. Los sólidos en suspensión concentrados pueden separarse de la superficie por sistemas mecánicos. El líquido clarificado puede separarse cerca del fondo, y parte del mismo reciclarse. La flotación se usa para los siguientes objetivos:

- a. Separación de grasas, aceites, fibras, y otros sólidos de baja densidad, de las aguas residuales.
- b. Espesado de los lodos procedentes de los procesos de lodos activados
- c. El espesamiento de los lodos floculados químicamente resultantes de los tratamientos de coagulación química.

Los componentes básicos de un sistema de flotación son:

- a) bomba de presurización
- b) sistema de inyección de aire
- c) tanque de retención (para conseguir un contacto aire-líquido)
- d) válvula reductora de presión
- e) tanque de flotación

La flotación da una mayor calidad del efluente que en la sedimentación por gravedad, en cuyo caso la separación de sólidos puede llegar a ser de un 95% o mayor. El resultado de la flotación puede ser muy mejorado por la adición de coagulantes como: alúmina, cloruro férrico y polielectrolitos.

1.4 Neutralización. Este tratamiento se utiliza normalmente en los siguientes casos que se presentan:

- a. Antes de la descarga de aguas residuales en un medio receptor.
- b. Antes de la descarga de aguas residuales industriales al alcantarillado municipal.
- c. Antes del tratamiento químico o biológico. El grado de preneutralización requerido para el tratamiento biológico depende de dos factores: 1) la alcalinidad o acidez presente en el agua residual, y 2) los mg/l de DBO que deben eliminarse en el tratamiento biológico.

Los métodos para neutralización de aguas residuales incluyen: (1) homogeneización, que consiste en mezclar las corrientes, algunas de las cuales son ácidas y otras alcalinas, disponibles en la planta, y (2) métodos de control directo de pH, que consisten en la adición de ácidos (o bases) para neutralizar las corrientes alcalinas o ácidas.

1.5 Filtración. Es el proceso de hacer pasar un líquido que contiene materia insoluble en suspensión a través de un medio poroso apropiado, de tal manera que pueda eliminarse la materia en suspensión del líquido. La filtración se utiliza en el tratamiento de aguas industriales para eliminar o reducir tanto la materia en suspensión como la turbidez. Los filtros empleados pueden ser de dos clases: de gravedad y de presión.

1.5.1 Filtros de gravedad. El flujo del agua a través de estos filtros se obtiene por gravedad, se emplea como medio filtrante antracita. Están contruidos de concreto, acero o madera y pueden ser rectangulares, cuadrados o circulares. En el fondo se encuentra un sistema de drenado inferior que recoge el agua filtrada y distribuye el agua para retrolavado.

1.5.2 Filtros de presión. Están contruidos en forma cilíndrica y cerrados en la parte superior por donde se introduce el agua a presión; como medio filtrante se usa la arena o antracita. Son más utilizados que los filtros de gravedad, su diseño es igual y no se requiere el uso de conductos de lavado.

El diseño óptimo de un filtro debe considerar:

- el tamaño del medio y la altura del lecho
- la velocidad de filtración
- la presión disponible
- el modo de filtrar.

1.6 *Ultra filtración*. Esta tecnología de membranas representa la forma más absoluta de retener sólidos en suspensión. El tamaño de los poros de las membranas puede ser tan pequeño como de 0.001 a 0.002 micras y pueden procesar aguas con concentración de sólidos relativamente importantes. Consigue retener materia coloidal y grandes moléculas orgánicas.

2. **Tratamientos secundarios.**

Se refiere a todos los procesos de tratamiento biológico de las aguas residuales tanto aerobios como anaerobios. En un tratamiento biológico, las bacterias y otros microorganismos destruyen y metabolizan las materias orgánicas solubles y coloidales, reduciendo la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO). La velocidad de degradación depende de que se hallen presentes los microorganismos adecuados.

2.1 *Tratamientos aerobios*. Son aquellos en que la biomasa está constituida por microorganismos aerobios o facultativos, consumidores de oxígeno. Bacterias y protozoarios forman parte de los grupos de microorganismos más utilizados en estos tratamientos. El carbono de la materia orgánica disuelta en el agua se convierte parcialmente en CO_2 , con producción de energía, y en parte es anabolizada para sintetizar materia celular. Estos son: proceso de lodos activados, aireación prolongada, lagunas aireadas, filtros percoladores y biodiscos.

2.1.1 *Proceso de lodos activos*. Consiste en poner en contacto en un reactor el agua residual, la biomasa y el oxígeno disuelto, en condiciones de agitación suficientes para mantener la biomasa en suspensión y asegurar un buen contacto con el oxígeno disuelto.

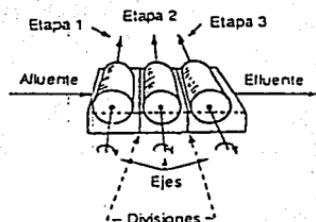
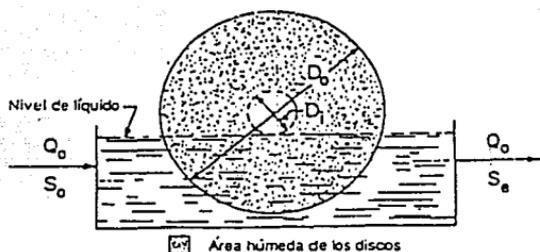
2.1.2 *Aireación prolongada* (proceso de oxidación total). Este proceso es una modificación del proceso de lodos activados. La idea fundamental de la aireación prolongada es disminuir la cantidad de lodo residual. Esto se consigue aumentando el tiempo de residencia; de esta forma el volumen del reactor es comparativamente mayor que el requerido en el proceso convencional de lodos activados. La ventaja de este proceso es que las instalaciones para la manipulación de lodos son muy pequeñas al compararlas con las que se necesitan en el proceso de lodos activados. Este proceso ha sido aplicado principalmente en el tratamiento de las aguas residuales cuando el volumen diario es menor de $8 \text{ m}^3/\text{d}$.

2.1.3 *Lagunas aireadas*. Son balsas con profundidades de 1 a 4 m en las que la oxigenación de las aguas residuales se realiza mediante unidades de aireación bien sean superficiales, turbinas o difusores. La diferencia fundamental entre lagunas aireadas y el sistema de lodos activados es que en éste se lleva a cabo la recirculación del lodo como forma de controlar la cantidad de lodo biológico en el reactor de aireación. La concentración de sólidos en las lagunas es función de las características del agua residual y del tiempo de residencia. Dicha concentración está comprendida entre 80 y 200 mg/l, esto es, mucho menor que la que se utiliza en las unidades de lodos activados convencionales (2000 – 3000 mg/l).

2.1.4 *Filtros percoladores*. Estos pertenecen al tipo de reactores de crecimiento asistido ya que requieren algún tipo de soporte del crecimiento biológico. El filtro percolador es un relleno cubierto de limo biológico a través del cual se percola el agua residual. Normalmente el agua residual se distribuye en forma de pulverización uniforme sobre el lecho de relleno mediante un distribuidor rotativo del flujo. El agua residual percola en forma descendente a través del relleno y el efluente se recoge en el fondo. La capa del limo que se forma junto al relleno tiene un espesor total comprendido entre 0.1 y 2 mm está formado de una subcapa aerobia y de otra anaerobia. El espesor de la subcapa aerobia es función del caudal del agua residual aplicado y de su DBO. Cuanto mayor sea la DBO del afluente menor será el espesor de la subcapa aerobia, ya que presenta un consumo más rápido de oxígeno. Por otra parte, los caudales elevados favorecen el mantenimiento de una subcapa aerobia más espesa debido al oxígeno disuelto suministrado con el afluente pulverizado. Algunas ventajas son: no se necesita energía para la aireación, operación sencilla, respuesta lenta y recuperación más rápida de los cambios bruscos de la DBO, y son menos sensibles a la presencia de sustancias tóxicas en el afluente.

2.1.5 *Biodiscos*. Son sistemas que fueron desarrollados para obtener el tratamiento biológico aerobio de las aguas residuales. La biomasa se presenta simultáneamente en la forma de crecimiento asistido y de crecimiento en suspensión (como en el caso de las unidades de lodos activados). Pueden haber varias etapas formadas por una serie de discos. La alimentación de agua residual pasa a través de estos tanques en serie de forma tal que los ejes se mantienen ligeramente por encima de la superficie del líquido. Esto significa que la superficie de los discos está aproximadamente el 40% sumergida en todo momento. Los

ejes giran continuamente a una velocidad comprendida entre 1 y 2 rpm. Se forma gradualmente un limo biológico de 1-3 mm de espesor que comienza a depositarse en las superficies de los discos. Algunas de las ventajas son: 1) bajo consumo de energía y mantenimiento sencillo, 2) ya que es posible tener en cada etapa un cultivo biológico diferente se cuenta con un grado adicional de flexibilidad en el proceso, 3) la biomasa presenta en general buenas características de sedimentación con lo que se disminuye el coste de la clarificación secundaria, 4) no se necesita reciclado en la biomasa.



Esquema de una unidad de biodisco típica

2.2 Tratamientos anaerobios. Se utilizan tanto para las aguas residuales como para la digestión de lodos activados. Los productos finales de la degradación anaerobia son gases, principalmente metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), y pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno (H_2S), mercaptano (RSH) e hidrógeno (H_2). El proceso comprende dos etapas: fermentación ácida y fermentación metánica.

- *Fermentación ácida.* Los compuestos orgánicos complejos del agua residual (proteínas, grasas e hidratos de carbono) se hidrolizan en primer lugar para producir unidades moleculares menores, las cuales a su vez son sometidas a biooxidación, convirtiéndose principalmente en ácidos orgánicos de cadena corta, tales como acético, propiónico, y butílico. Una población heterogénea de bacterias anaerobias es responsable de estas reacciones de hidrólisis y oxidación.
- *Fermentación metánica.* Microorganismos metanogénicos que son estrictamente anaerobios, convierten los ácidos de cadenas más largas a metano, dióxido de carbono y ácidos orgánicos de cadenas más cortas. La etapa de fermentación metánica es la que controla la velocidad de los procesos anaerobios.

Algunas de las ventajas del tratamiento anaerobio son:

- Ya que no emplea equipo de aireación, se produce ahorro de costos de equipo así como de consumo energético en el tratamiento anaerobio.
- En los procesos anaerobios es posible operar a cargas orgánicas del afluente superiores que para el caso de los procesos aerobios.
- La producción de metano en los procesos anaerobios debido a su valor como combustible.

Algunas desventajas del tratamiento anaerobio son:

- Se necesitan mayores tiempos de residencia.
- Los malos olores asociados a los procesos anaerobios, debido principalmente a la producción de H_2S y mercaptanos.
- Se necesitan mayores temperaturas para asegurar que los procesos anaerobios se producen a velocidades razonables.
- La sedimentación de la biomasa anaerobia en el clarificador secundario es más difícil que la decantación para la clarificación en el proceso de lodos activados.
- La operación de las unidades anaerobias es más difícil que las aerobias, siendo el proceso más sensible a las cargas de choque.

3. Tratamientos terciarios.

También conocidos como "tratamiento avanzado", son la serie de procesos destinados a conseguir una calidad del efluente superior a la del tratamiento secundario convencional. Algunos de los tipos de tratamientos terciarios son: separación de sólidos en suspensión, adsorción en carbón activado (separación de compuestos orgánicos), intercambio iónico, ósmosis inversa, electrodiálisis, procesos de oxidación química (cloración y ozonación), eliminación de nutrientes.

3.1 *Eliminación de sólidos en suspensión.* Se dispone de los siguientes procesos para la eliminación de estos sólidos en suspensión: microtamizado, filtración, y coagulación.

3.1.1 *Microtamizado.* Los microtamices se construyen sobre tambores rotativos. El agua residual se alimenta de forma continua en la parte interior del tambor, fluyendo hasta una cámara de almacenamiento de agua clara en la parte exterior. La limpieza de la superficie interior del tambor se lleva a cabo mediante pulverizadores de agua clara, necesiándose normalmente del orden del 5% del volumen de alimentación para esta limpieza.

3.1.2 *Filtración.* Se utiliza normalmente para conseguir rendimientos en la eliminación de sólidos en suspensión de hasta el 99%. Los materiales de relleno de los filtros más empleados son arena, antracita y tierra de diatomeas.

3.1.3 *Coagulación.* Se lleva a cabo utilizando sulfato de aluminio, polielectrolitos, cal y otros reactivos químicos.

3.2 *Adsorción en carbón activado.* Es la concentración de un soluto en la superficie de un sólido. Este fenómeno tiene lugar cuando se coloca dicha superficie en contacto con una solución. Una capa de moléculas de soluto se acumula en la superficie del sólido debido al desequilibrio de las fuerzas superficiales.

En el interior del sólido, las moléculas están rodeadas totalmente por moléculas similares y por lo tanto sujetas a fuerzas equilibradas. Las moléculas en la superficie están sometidas a fuerzas no equilibradas. Debido a que estas fuerzas residuales son suficientemente elevadas,

pueden atrapar moléculas de un soluto que se halla en contacto con el sólido. Este fenómeno se denomina adsorción física (o de Van der Waals).

El sólido (carbón activado) se denomina adsorbente y el soluto a adsorber se denomina adsorbato. La capacidad de adsorción es función de la superficie total del adsorbente, ya que cuanto mayor sea esta superficie se dispone de mayor número de fuerzas residuales no equilibradas para la adsorción.

Los carbones activados se han empleado profundamente como adsorbentes en las plantas de tratamiento de agua para eliminar los olores y sabores que producen los contaminantes.

3.3 Intercambio iónico. Es un proceso en que los iones que se mantienen unidos a grupos funcionales sobre la superficie de un sólido por fuerzas electrostáticas se intercambian por iones de una especie diferente en disolución.

Actualmente las zeolitas naturales han sido reemplazadas por resinas sintéticas tales como estireno y divinil-benceno (DVB). Estas resinas son polímeros insolubles a los que se añaden grupos básicos o ácidos mediante reacciones químicas. Existen dos tipos básicos de intercambiadores iónicos: catiónicos y aniónicos.

Intercambiadores catiónicos: las resinas de intercambio catiónico separan los cationes de una solución, intercambiándolos por iones sodio o por iones hidrógeno.

Intercambiadores aniónicos: las resinas intercambiadores aniónicos separan aniones de una solución intercambiándolos por iones oxhidrilo.

3.4 Ósmosis inversa. El afluente contaminado se pone en contacto con una membrana adecuada a una presión superior a la presión osmótica de la solución. Bajo estas circunstancias, el agua con una cantidad muy pequeña de contaminantes pasa a través de la membrana. Los contaminantes disueltos se concentran en el compartimiento del agua residual. Este concentrado, que posiblemente sea una pequeña fracción del volumen total de agua residual a tratar, se descarga. Se obtiene agua purificada en el otro compartimiento.

La ósmosis inversa es todavía muy cara para una utilización universal en el tratamiento de las aguas residuales. Está también limitada al tratamiento de residuos solubles ya que los sólidos en suspensión taponan las membranas. En consecuencia, se necesita un tratamiento previo a la alimentación cuando haya sólidos en suspensión.

3.5 *Electrodialisis*. Es un método de eliminación de nutrientes inorgánicos (fósforo y nitrógeno) de las aguas residuales y, por ello, una posible etapa final en los procesos de tratamiento de aguas residuales. Los componentes básicos de una celda de electrodialisis son una serie de membranas hechas de resina de intercambio iónico. Estas membranas son permeables solo a las especies iónicas y son relativamente selectivas de un tipo específico de iones. Existen dos tipos de membranas utilizadas en las celdas de electrodialisis:

- (1) membranas catiónicas, que poseen una carga fija negativa, permitiendo a los cationes pasar a través de ellas pero repeliendo a los aniones;
- (2) membranas aniónicas, que poseen una carga positiva fija, permitiendo el paso de los aniones a través de ellas pero repeliendo a los cationes.

Para un funcionamiento adecuado de la celda, la materia en suspensión, los iones orgánicos de gran tamaño y la materia coloidal deben separarse antes del proceso.

3.6 Procesos de oxidación química (cloración y ozonación)

3.6.1 *Cloración*. Los objetivos de la cloración se resumen como sigue:

- a. Desinfección: fundamentalmente el cloro es un desinfectante debido a su fuerte capacidad de oxidación, por lo que destruye o inhibe el crecimiento de bacterias y algas.
- b. Reducción de la DBO: el cloro reduce la DBO por oxidación de los compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales.
- c. Eliminación o reducción de colores y olores: las sustancias que producen olor y color presentes en las aguas residuales se oxidan mediante el cloro.
- d. Oxidación de los iones metálicos.
- e. Oxidación de los cianuros a productos inocuos.

Aunque el empleo de la cloración está muy extendido, debe anotarse que el cloro es un producto químico relativamente caro. Se han empleado en la desinfección de las aguas los óxidos de cloro (Cl_2O , Cl_2O_5 , Cl_2O_7).

3.6.2 *Ozonación*. Es un método efectivo para tratar las aguas residuales, basándose en los siguientes factores:

- a. El ozono reacciona fácilmente con los productos orgánicos no saturados presentes en las aguas residuales.
- b. La tendencia a la formación de espuma de las aguas residuales se reduce después del tratamiento con ozono.
- c. La ruptura de los anillos y la oxidación parcial de los productos aromáticos deja a las aguas residuales más susceptibles de tratamiento convencional biológico.
- d. El ozono presente en el efluente se convierte rápidamente a oxígeno una vez que ha servido a sus fines. Este oxígeno es beneficioso para las corrientes receptoras y ayuda a mantener la vida acuática. Por lo contrario, el cloro permanece en el efluente y se convierte en contaminante.

3.7 *Eliminación de nutrientes*. Los procesos para la eliminación de fósforo son, entre otros, precipitación química, proceso de lodos activados, ósmosis inversa, y electrodiálisis.

El proceso principal para la eliminación de nitrógeno es el de nitrificación-desnitrificación, el cual es una modificación del proceso convencional de lodos activados.¹¹

II. Descripción del Proceso de emulsión de estireno-butadieno.

Dada la importancia de conocer el origen de las aguas residuales generadas en el proceso de emulsión de estireno-butadieno para determinar el sistema de tratamiento del agua tal como se mencionó en el capítulo anterior, se dará una descripción del proceso y los puntos en los que se generan estas aguas residuales.

El proceso consiste en la polimerización en emulsión de los monómeros de estireno y butadieno, los cuales son dispersados en una fase continua acuosa con la ayuda de emulsificantes, y polimerizados con iniciadores vía radicales libres para obtener un látex. Éste consiste en un líquido con apariencia lechosa constituido por polímero disperso en el agua. Los usos industriales de este látex son: recubrimiento de papel y cartón de impresión; respaldo adhesivo en alfombras y tapetes; componente para sistema adhesivo en fabricación de llantas; en la saturación de papel para masking tape y medios filtrantes.

El proceso consiste en las siguientes etapas:

- Preparación de reactivos
- Reacción
- Separación de monómeros residuales
- Coagulación y sinerizado
- Secado
- Almacenamiento

La planta maneja dos tipos de procesos: el tipo batch y el de adición continua de monómeros (CMA). En el caso del proceso batch, todas las materias primas requeridas son transferidas al reactor desde el inicio. En el proceso CMA la transferencia al reactor de algunas de las materias primas se hace en forma continua a lo largo del proceso por medio de bombas dosificadoras. Las ventajas de este proceso es que se obtiene una mayor conversión y es más fácil controlar la exotermia de la reacción porque la energía se libera gradualmente.

Descripción de cada etapa.

1. *Preparación de reactivos.* El butadieno es lavado con una solución de sosa para eliminar el inhibidor en el tanque FA-2, posteriormente la sosa es eliminada mediante un lavado acuoso a través del tanque FA-3. La razón de hacer estas operaciones se debe a que el butadieno es muy reactivo consigo mismo y podría polimerizarse mientras es almacenado, por lo que se le agrega un inhibidor de polimerización. Una vez libre de inhibidor, el butadieno es enviado al tanque de alimentación de butadieno FA-5. El estireno se tiene en tanques de almacenamiento y de éstos es enviado al tanque de alimentación de estireno FA-1.

Los aditivos para ser bombeados al reactor DC-2 se preparan previamente en el tanque de aditivos FA-4. Estos son: iniciadores, monómeros funcionales, que pueden ser carboxilantes o no carboxilantes en función de las características que se quieran en el producto final, y emulsificantes para que se lleve la polimerización en emulsión por vía radicales libres.

2. *Reacción.* Consiste en la adición al reactor DC-2 de los monómeros de estireno y butadieno provenientes de los tanques FA-1 y FA-5, además de los aditivos preparados en el tanque FA-4. La reacción libera calor, por lo que se controla la temperatura mediante agua de enfriamiento circulada bajo control de flujo por la chaqueta del reactor.

3. *Separación de monómeros residuales.* Los monómeros de butadieno que no reaccionaron son fácilmente eliminados por desgasificación aplicando vacío al reactor.

Proceso batch. Los monómeros de estireno que no reaccionaron se eliminan por medio de una destilación por arrastre con vapor en el destilador DA-1, que consiste en la difusión de las moléculas de estireno del interior de la partícula de polímero a la superficie de la misma, de ahí a la fase dispersa (el agua) y por último éstas son arrastradas por las burbujas de vapor. El vapor con el estireno pasan por un condensador EA-1 y después son mandados a un decantador FA-8, de donde se separa el estireno del agua residual obtenida.

Proceso CMA. Se utiliza agotamiento químico para eliminar el estireno residual utilizando un agente reductor y otro oxidante para agotar el estireno residual en forma de poliestireno. En este proceso la siguiente etapa es la 6 de ajuste final y de almacenamiento.

4. *Coagulación y Sinerizado.* La coagulación es necesaria para la formación de grumos. En esta etapa, el material proveniente del destilador DA-1 es recibido en el tanque de coagulación FA-9, en donde se le agrega un coagulante (sulfato de magnesio), ya que se requiere romper el equilibrio entre la fase dispersa (el polímero) y la fase continua (el agua). La siguiente etapa se llama sinéresis, que es una operación realizada en el tanque FA-10, donde se quita la humedad interna del grumo que se formó durante la coagulación mediante temperatura y tiempo de residencia.

5. *Secado.* La separación de las partículas sólidas del agua se lleva a cabo por medio de una centrifugación. El equipo D-2 es una centrífuga pusher, que es un equipo de separación rotatorio que utiliza la fuerza centrífuga para separar la fase sólida de la líquida. En esta etapa se obtiene un agua residual. Una vez centrifugado, el material sólido es transportado por medio de un gusano S-1 al secador de lecho fluidizado D-1, en donde la humedad remanente es eliminada, quedando un producto con un máximo del 2% de humedad.

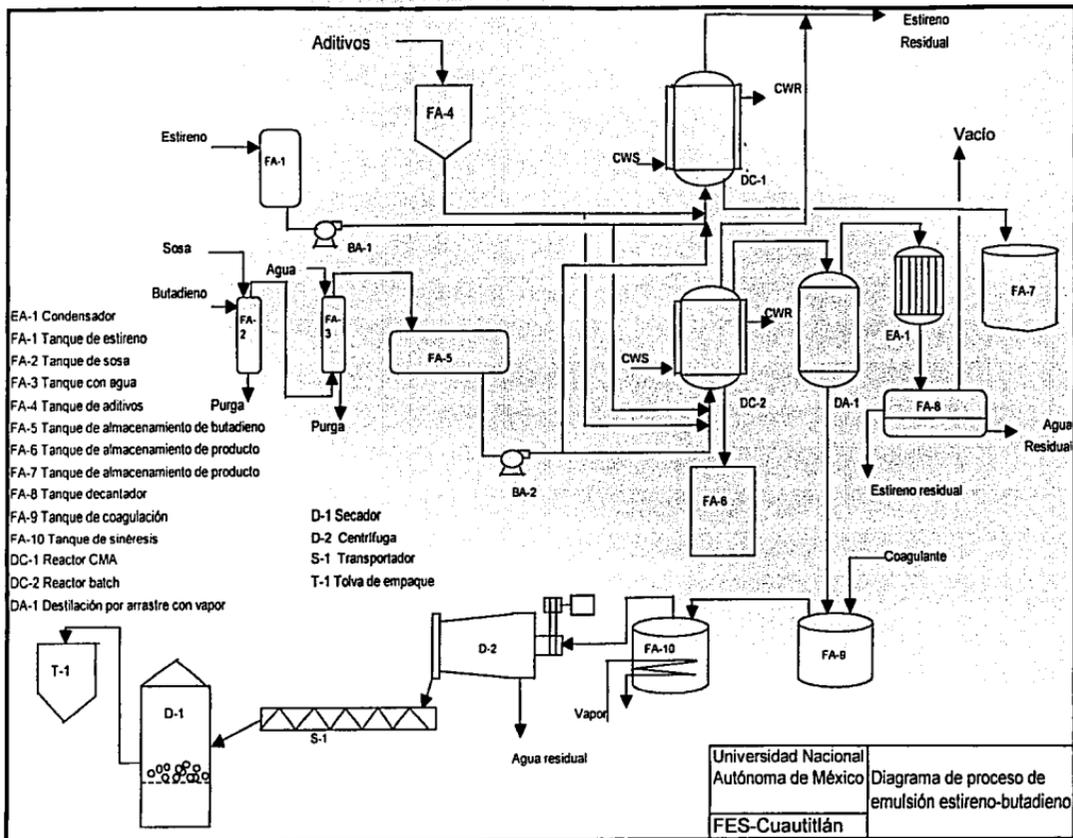
6. *Ajuste final y almacenamiento.*

Proceso batch. El material después de secarse es transportado neumáticamente por medio de un soplador hasta la tolva T-1 de empaque, como puede verse en el diagrama de proceso de emulsión de estireno-butadieno, y desde donde finalmente es ensacado. Este producto se utiliza como reforzante granular para mezcla de hule.

Proceso CMA. Se ajusta pH en el reactor DC-1, se determina el contenido de sólidos y se controla la temperatura según las especificaciones de la formulación que se esté preparando y se envía al tanque de almacenamiento FA-7.

Algunas emulsiones se venden tal y como salen después de la destilación, pero hay otras a las que se les agregan algunos aditivos en el tanque FA-7 antes de que el material se venda, para mejorarla según su aplicación. Los aditivos que se agregan son:

- dispersantes: que le dan estabilidad a la emulsión.
- biocidas: que evitan que el material se descomponga por la formación de bacterias y hongos.
- antioxidantes



III. Efluentes del proceso

En el proceso de producción de emulsión de estireno-butadieno tal como se señala en el diagrama anterior se generan aguas residuales en:

- separación de agua del producto sólido en la centrifuga.
- secado de producto para generar una resina sólida
- lavado de reactores, se cuenta con 2 reactores y se realiza un lavado por reactor cada 8 días
- descarga de agua del tanque decantador
- lavado de tanques de envasado, se cuenta con 2 tanques de envasado y se realizan dos enjuagues por semana.

En la tabla 1 se tiene la cantidad de agua que se genera en las etapas mencionadas.

Los principales contaminantes del agua en el proceso de emulsión de estireno-butadieno son:

- Sólidos suspendidos (estireno y poliestireno)

Efluentes de los servicios auxiliares:

- Purga continua y de fondo de las calderas
- Purga de fondo de las torres de enfriamiento
- Aguas resultantes de la regeneración de la unidad desmineralizadora de agua de alimentación a calderas

Otros efluentes provienen de:

- Comedor
- Sanitarios de Oficinas generales
- Baños del personal sindicalizado

El agua de los efluentes no es de alto riesgo ya que no contiene metales pesados ni cianuros.

Tabla 1.

Cálculo de efluentes de Planta.

		m ³ /mes
1. Planta de Emulsiones.		
Reacción.	Lavado de reactores. 0.2 m ³ /lavado ,4 lavados/mes. 2 reactores	1.6
Destilación.	Purga del tanque decantador. 750 lt/h, 113h/semana	339.0
Coagulación.	Purga de salmuera de la centrifuga 2610 lt/h, 115 h/mes	300.0
Tanques de envasado.	0.4 m ³ /lavado, 2 lavados/semana, 2 tanques	1.6
Lavado de butadieno.	Purga de torres lavadoras. 11.5 lt/min	497.0
2. Torres de enfriamiento.		
Purga de torre	D-8/D25 0.672 m ³ /h	484.0
Purga de torre	D-23 0.333 m ³ /h	240.0
3. Purga de calderas.		
	16793 ton de vapor/mes. 20 ciclos de concentración	884.0
4. Agua desmineralizada.		
Agua de regeneración y lavado	15% de la generación 1167 m ³ /mes	175.0
5. Otras fuentes.		
Laboratorio	Lavado de material 1.4m ³ /día	42.0
Comedor	Lavado de trastes y aseo 3 m ³ /día	90.0
Regaderas y WC	160 personas a 200 lt/día/persona	960.0
Lavado de las áreas	3 m ³ /día	90.0
	total	4104.2

IV. Análisis de Alternativas y Selección del Sistema

Se analizarán las distintas alternativas para el tratamiento de los efluentes generados en el proceso de emulsión de estireno-butadieno.

a) *Recolección de todas las aguas en una misma fosa* seguida de una homogeneización de las mismas. Esta tiene la ventaja de ser una sola fosa y una sola bomba, lo cual disminuye la inversión, pero el inconveniente de que cuando se drenen los lavados de los reactores o lavados de los tanques de almacenamiento, se tendrá en forma temporal una muy alta concentración de sólidos, lo cual dificultaría la clarificación.

b) *Recolección de las aguas en dos fosas*, una que contenga únicamente las aguas residuales generadas en el proceso de emulsión de estireno-butadieno y la otra para almacenar el resto de las aguas que se generan en la planta. Tiene la desventaja que requiere la construcción de dos fosas, y la instalación de dos bombas, pero la ventaja de poder dosificar las aguas almacenadas que se obtuvieron de los lavados de los reactores y los tanques, de tal forma que se controla la concentración de sólidos, lo cual permite asegurar una clarificación eficiente.

En este caso se elegirá la opción que considera la utilización de dos fosas, la cual garantiza una calidad uniforme del agua tratada.

Una vez recolectada el agua residual se podrá realizar una sedimentación:

a) *Discreta*, es decir sin adición de floculantes, esto tiene la ventaja de no demandar sustancias adicionales como floculantes, pero la desventaja de requerir altos tiempos de residencia para separar los sólidos por sedimentación natural.

b) *Por floculación*, utilizando coagulantes químicos, lo cual tiene la desventaja de requerir sustancias adicionales con su consiguiente sistema de dosificación, pero la ventaja de necesitar un tiempo de residencia muy breve lo cual disminuye el tamaño del equipo, y a la vez garantiza una eficiente eliminación de sólidos por clarificación.

A partir de pruebas de laboratorio (realizadas en la empresa) se llegó a la conclusión que lo más efectivo era el uso de coagulantes, ya que la sedimentación por medios naturales era prácticamente nula, por lo que se optó por la segunda alternativa.

Debido a la gran variedad de coagulantes que existen se hicieron pruebas con sulfato de magnesio, sulfato de aluminio, hidróxido de calcio y otros polímeros. Una vez encontrados los coagulantes que podrían funcionar se hicieron pruebas para el encontrar el óptimo y la cantidad necesaria del mismo, además se trabajaron con aguas que contenían distintos productos para ver su comportamiento. Se encontró que se obtienen los mejores tiempos de sedimentación utilizando 50 ppm de cal, 50 ppm de sulfato de aluminio y 5 ppm de polímero HI500.

Debido a que después de la clarificación aún queda cierta cantidad de sólidos suspendidos, se analizaron dos alternativas para eliminar totalmente los sólidos remanentes:

- a) Enviar las aguas a fosas de sedimentación para su completo asentamiento y después realizar una decantación, lo cual llevaría un tiempo mínimo de un día.
- b) Realizar una filtración, lo cual de inmediato proporciona una agua cristalina.

Se optó por la filtración a fin de garantizar la calidad con una menor inversión.

El siguiente paso consistió en definir como manejar los lodos del fondo del clarificador, y existían dos opciones:

- a) Enviarlos a una fosa de desecación para posteriormente extraer los lodos secos. Esto requiere de gran superficie que permita extender los lodos y esperar que en forma natural se sequen a través del tiempo, lo cual tomaría varios días, y posteriormente utilizar palas u otro medio para extraer los sólidos de la fosa.
- b) Mandar los lodos a cajas porosas que retienen los sólidos y permiten la salida del agua y el agua clarificada enviarla a la fosa de efluentes por gravedad, esto tiene la ventaja de llevar menos de un día para que queden secos y se pueda disponer de ellos, transportándolos en las mismas cajas porosas de desecación hacia un área autorizada para desechos sólidos.

Se optó por el uso de cajas porosas, lo cual requiere menos espacio y facilita el manejo de los lodos, pues las cajas porosas se pueden subir mediante un montacargas al vehículo que los transporta al área asignada y autorizada para la disposición.

V. Descripción del proceso de tratamiento de aguas

Las aguas generadas en el proceso de emulsión de estireno-butadieno después del lavado de los equipos se recolectarán en una fosa llamada fosa de aguas blancas. Las aguas generadas en el resto de la planta se colectarán en una segunda fosa llamada fosa colectora de efluentes de diversas fuentes. La segunda fosa tendrá un controlador de nivel que enviará una señal a la válvula de descarga de la bomba que alimentará de la fosa hacia el clarificador, ajustando un flujo para que el nivel se mantenga al 50% en la fosa en forma constante. La fosa de aguas blancas tendrá una bomba dosificadora que enviará las aguas blancas hacia la línea de alimentación del clarificador a un flujo de 5 l/hr. La cual tendrá un sistema de control de arranque y paro de tal manera que cuando el nivel baje a 10% la bomba pare, y cuando el nivel suba hasta 50% arranque nuevamente, ajustada la capacidad para que opere la mayor parte del tiempo y al mezclarse los flujos se obtenga un contenido de sólidos totales suspendidos que oscilará de 800 a 1000 ppm. El ajuste mencionado de la bomba se logra aforándola y ajustando su capacidad mediante la carrera del pistón.

El clarificador recibirá las aguas mezcladas, y en la misma línea de alimentación en la parte vertical antes de descargar al clarificador recibirá la solución de hidróxido de calcio, sulfato de aluminio y polímero, estos últimos coagulantes, los cuales se mezclarán en forma homogénea con el agua conteniendo los sólidos a eliminar. En este equipo se formarán flóculos de hidróxido de aluminio, que sedimentarán atrapando los sólidos suspendidos, pero que serán mantenidos suspendidos en la parte media por el movimiento suave del rastrillo del clarificador, el cual les dará un leve movimiento que facilitará la coalescencia de los sólidos suspendidos para formar corpúsculos grandes que tiendan a sedimentar. El motor que acciona el rastrillo del clarificador tendrá un controlador de velocidad, el cual se ajustará de tal forma que se logre el mejor desempeño de clarificación a través de pruebas en campo, buscando que los lodos estén suspendidos mediante un movimiento tal que favorezca la aglomeración y crecimiento de las partículas, sin que lleguen a tener un movimiento tan violento que origine que asciendan hasta la parte superior del derrame, pues de lo contrario se tendría un arrastre excesivo de sólidos hacia los filtros.

El efluente del clarificador que saldrá por la parte superior descargará por derrame hacia un filtro de arena de gravedad mediante tubería y canales de distribución sobre la superficie del filtro. El filtro tendrá un sistema de retrolavado utilizando la misma agua filtrada para remover la costra de

sedimento sobre el filtro al ser introducida por un tubo rotatorio distribuidor con perforaciones a lo largo que originan un empuje contrario al flujo de salida del agua que incide sobre la superficie del filtro originando el movimiento circular del tubo limpiador de costra, y posteriormente introducir un flujo inverso hacia el filtro a fin de eliminar las impurezas acumuladas sobre la superficie, la cual descargará hacia la fosa colectora de efluentes de diversas fuentes. En operación normal se tendrá un incremento gradual en la presión diferencial a través del lecho filtrante. Cuando se alcance una presión diferencial de 1.2 pies de agua sonará una alarma durante 2 segundos, se suspenderá la filtración y se iniciará el retrolavado del filtro, para realizar esto se dispondrá de un programador automático, el cual hará toda la secuencia de retrolavado, siguiendo los siguientes pasos:

Paso 1. Abrirá la válvula de bypass de la línea del clarificador hacia el filtro para que las aguas se desvien hacia la fosa de efluentes diversos y se pararán las bombas de las dos fosas.

Paso 2. Se abrirá la válvula de suministro de agua de lavado y se cerrará la válvula de descarga del filtro. Después de dos minutos de lavado de la superficie cerrará la válvula de lavado, abrirá la válvula de la línea de retrolavado y arrancará la bomba de retrolavado durante 4 minutos, el flujo de retrolavado fluirá por la línea de sobreflujo del filtro hacia la fosa de efluentes diversos.

Paso 3. Se cerrará la válvula de la línea de retrolavado, se abrirá la válvula de la línea normal de descarga del filtro, se cerrará el bypass del filtro y se arrancarán las bombas de las dos fosas, con lo que quedará concluido el ciclo de retrolavado y estará nuevamente en operación el filtro de arena.

El agua clara proveniente del filtro recibirá una dosificación de cloro controlando 3 ppm a fin de eliminar las bacterias patógenas, colectándose en una fosa de aguas residuales tratadas y se empleará de la siguiente forma: como agua de reposición de las torres de enfriamiento, para riego de jardines y para uso en WC, el exceso de agua se verterá al drenaje municipal, cumpliendo con la normatividad definida por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Los lodos del filtro serán enviados a la fosa recolectora de efluentes diversos para posteriormente regresar al clarificador.

Los lodos del fondo del clarificador serán succionados por una bomba y se enviarán a cajas porosas que permiten la salida del agua que se encuentra ocluida en estos lodos, y serán enviados hacia un cementerio de desechos sólidos. El agua eliminada se recuperará por gravedad hacia la fosa colectora de diversos efluentes, para reciclarse de nuevo al clarificador.

VI. Bases de diseño.

La capacidad de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales es de 4104 m³/mes con un factor de sobre diseño de 40%. La operación es continua los 365 días del año, y se puede suspender la operación hasta por 1 día continuo para mantenimiento programado, para lo cual se tendrá que vaciar totalmente la fosa de efluentes diversos antes del paro, y considerando el sobre diseño puede parar hasta 7 hrs/día por imprevistos, teniendo como requisito el operar el nivel de la fosa de efluentes diversos al 50% de nivel como control normal de operación.

El efluente de la Planta de Tratamiento objeto de este trabajo es un agua clara libre de materia suspendida, que cumple con las normas ambientales mexicanas para las descargas de aguas residuales.

La Planta está diseñada para tratar los efluentes de una Planta Química productora de Emulsiones de Estireno-Butadieno de 6000 tons/año de capacidad, más los efluentes de servicios auxiliares y de las oficinas administrativas incluyendo el comedor, los sanitarios de oficinas y baños, y los sanitarios de plantas.

Los servicios auxiliares que demanda la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales son electricidad y aire de instrumentos.

Los efluentes del proceso de emulsiones van inicialmente a una fosa colectora llamada de aguas blancas para posteriormente mezclarse con el resto de los efluentes los cuales son:

- los efluentes de servicios auxiliares como purga continua de generadores de vapor, agua de enfriamiento, purgas continua de la torre de agua de enfriamiento, que se canalizan a la fosa de diversos efluente,
- los efluentes de la planta desmineralizadora de aguas para alimentación a calderas y proceso las cuales están constituidas por las regeneraciones ácidas y básicas que se neutralizan mutuamente al mezclarse en la fosa de efluentes generales,

- los efluentes de sanitarios, oficinas y comedor, estos efluentes inicialmente son enviados a unas fosas sépticas en las cuales sufren una biodegradación de materia orgánica y sedimentación para que posteriormente sus efluentes clarificados puedan juntarse con los demás efluentes.

Se considera una población total dentro de la empresa de 160 personas.

Para el caso de estudio aplica la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales para uso en riego agrícola.

Tabla 2. Comparación entre límites máximos permisibles para contaminantes básicos y características del agua antes y después del tratamiento.

PARAMETROS	Límites máximos permisibles para contaminantes básicos RIOS, uso en riego agrícola		Características del agua antes y después del tratamiento	
	Promedio mensual	Promedio diario	Agua por tratar	Agua ya tratada
Miligramos por litro, excepto cuando se especifique				
Temperatura °C (1)	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Grasas y Aceites (2)	15	25	30	20
Materia flotante	ausente	ausente	Presente	Ausente
Sólidos sedimentables (ml/l)	1	2	400	0
Sólidos Suspendedos Totales	150	200	800	0
Demanda Bioquímica de Oxígeno	150	200	210	170
Nitrógeno Total	40	60	30	30
Fósforo Total	20	30	25	25

(1) Instantáneo

(2) Muestra simple promedio ponderado

(3) Ausente según el Método de Prueba definido en la NMX-AA-006

N.A. No aplica

Tabla 3. Comparación entre límites máximos permisibles para metales pesados y cianuro, y características del agua antes y después del tratamiento.

PARAMETROS	Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuro		Características del agua antes y después del tratamiento	
	RIOS, uso en riego agrícola		Agua a tratar	Agua tratada
Miligramos por litro, excepto cuando se especifique	Promedio mensual	Promedio diario		
Arsénico	0.2	0.4	0.10	0.10
Cadmio	0.2	0.4	0.05	0.05
Cianuro	2.0	3.0	ausente	ausente
Cobre	4.0	6.0	0.3	0.3
Cromo	1.0	1.5	0.6	0.6
Mercurio	0.01	0.02	ausente	ausente
Níquel	2.0	4.0	0.4	0.4
Plomo	0.5	1.0	0.4	0.4
Zinc	10	20	0.10	0.10

Tabla 4. otras especificaciones a cumplir.

PARAMETROS	RIOS, uso en riego agrícola		Características del agua antes y después del tratamiento	
	Promedio mensual	Promedio diario	Agua a tratar	Agua tratada
Potencial hidrógeno (pH)	5 a 10 unidades	5 a 10 unidades	6 - 9	6 - 9
Coliformes, número mas probable/100ml (NMP)	1000	2000	> 4000	< 100
Huevos de helminto, Huevos/l	1	1	0	0

La Fosa Colectora de Efluentes Diversos estará ubicada en el nivel de piso terminada más bajo de la planta a fin de que los drenajes puedan fluir con pendiente natural hacia la fosa. La Fosa de Aguas Blancas estará ubicada dentro de los límites de batería de la planta de emulsiones a fin de que se puedan colectar con facilidad. El Clarificador estará ubicado a dos metros del nivel de piso terminado a fin de descargar con facilidad los lodos del fondo y poder limpiar la tubería cuando sea necesario y a la vez facilitar el acceso a las líneas inferiores. El nivel freático es de 20 m.

VII. Balance de materia

Cálculo de la concentración de sólidos en el afluente hacia el clarificador.

En base a la tabla 1, se tienen 3.2 m³/mes de agua generada directamente del proceso de emulsión de estireno-butadieno que contienen 20% de sólidos.

El resto del agua suma 4101 m³/mes, esta agua contiene 0.08% de sólidos.

Datos de entrada:

$$Q_1 = 3.2 \text{ m}^3/\text{mes} = 0.107 \text{ m}^3/\text{d} \text{ efluentes de reacción y lavado}$$

$$Q_2 = 4101 \text{ m}^3/\text{mes} = 136.700 \text{ m}^3/\text{d} \text{ de otros efluentes}$$

$$X_1 = 20\% \text{ de sólidos} = 200000 \text{ mg/l}$$

$$X_2 = 0.08\% \text{ de sólidos} = 800 \text{ mg/l}$$

Incógnita:

X_0 : concentración de afluente al clarificador

$$Q_0 X_0 = Q_1 X_1 + Q_2 X_2 \quad \text{ec. 1}$$

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 = 3.2 \text{ m}^3 + 4101 \text{ m}^3 = 4104.2 \text{ m}^3/\text{mes} = 136.807 \text{ m}^3/\text{d}$$

Despejando ec. 1 para calcular X_0

$$X_0 = \frac{Q_1 X_1 + Q_2 X_2}{Q_0}$$

$$X_0 = \frac{0.107 \times 200000 + 136.700 \times 800}{136.807}$$

$$X_0 = 956 \text{ mg/l}$$

Cálculo de las corrientes de salida del clarificador.

Balance total de los líquidos en circulación:

Datos:

$Q_0 = 136.807 \text{ m}^3/\text{d}$ Afluente al clarificador (entrada)

$X_0 = 956 \text{ mg/l}$ Concentración del afluente

$X_e = 35 \text{ mg/l}$ Concentración del efluente de agua clarificada (rebosadero). Determinado experimentalmente en laboratorio.

$X_u = 100000 \text{ mg/l}$ Concentración del efluente de lodos (fondo). Determinado experimentalmente en laboratorio.

Incógnitas:

$Q_e =$ Flujo del efluente clarificado (rebosadero)

$Q_u =$ Flujo del efluente de lodos (fondo)

Balance para sólidos en suspensión:

$$Q_0 = Q_u + Q_e \quad \text{ec. 2}$$

$$Q_0 X_0 = Q_u X_u + Q_e X_e \quad \text{ec. 3}$$

Despejando Q_u la ecuación 2

$$Q_u = Q_0 - Q_e \quad \text{ec. 4}$$

Sustituyendo el valor de Q_u en la ec. 3

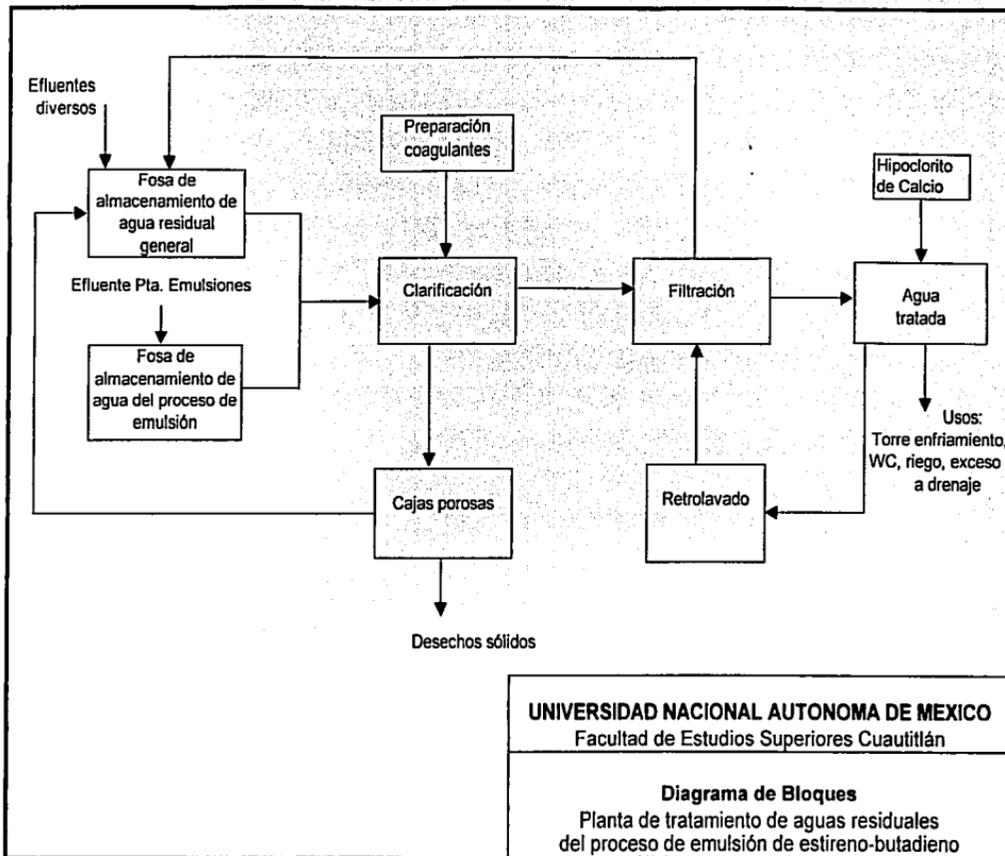
$$Q_0 X_0 = (Q_0 - Q_e) X_u + Q_e X_e$$

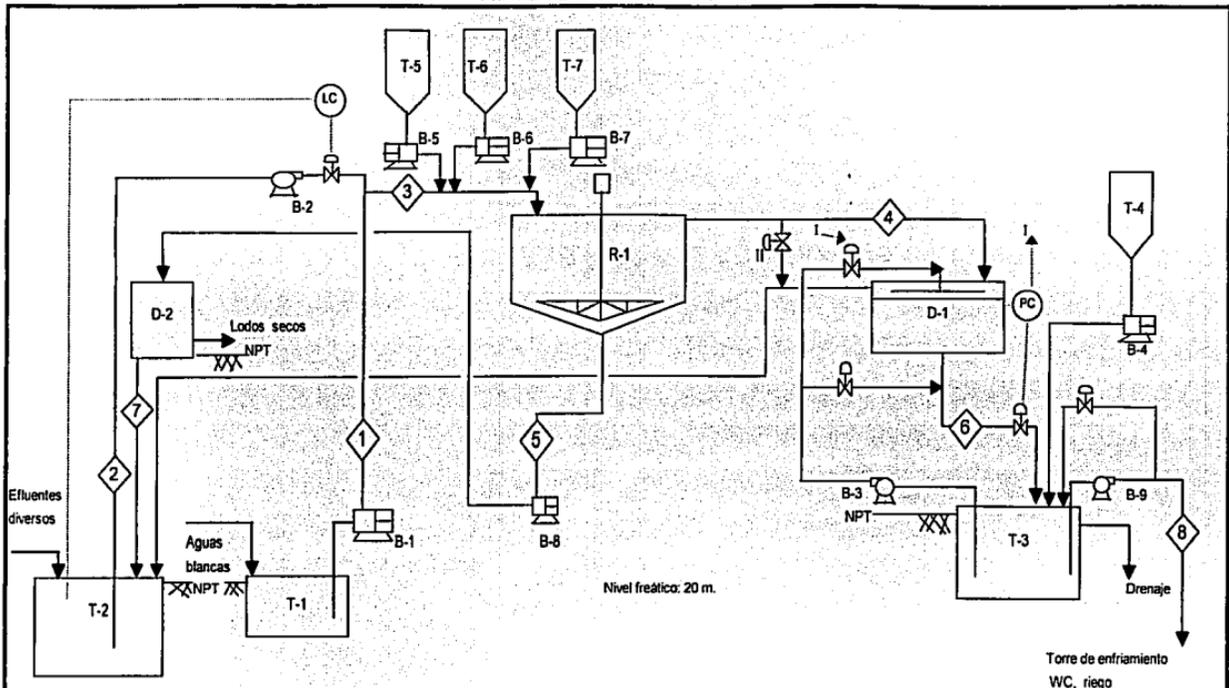
$$Q_e = \frac{Q_0 (X_u - X_0)}{X_u - X_e}$$

$$Q_e = \frac{136.807(100000 - 956)}{10000 - 35} = 135.546 \text{ m}^3 / \text{d}$$

Se determina Q_u de la ec. 4

$$Q_u = 136.807 - 135.546 = 1.261 \text{ m}^3/\text{d}$$





	1	2	3	4	5	6	7	8
Flujo (m ³ /d)	0.107	136.7	136.807	135.546	1.261	136.807	1.261	136.807
Sólidos(mg/L)	200000	800	956	35	100000	0	0	0

II. Normalmente sin flujo,
uso para retrolavado

T-2 Fosa de efluentes diversos
T-3 Fosa de aguas residuales tratadas
T-4 Tanque de hipoclorito de calcio
T-5 Tanque de cal hidratada
T-6 Tanque de sulfato de aluminio

T-7 Tanque de polielectrolito
R-1 Clarificador
D-1 Filtro de arena
D-2,D-3 Caja porosa
PR Programador de retrolavado

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan
Diagrama de Proceso
Planta de tratamiento de aguas residuales

IX. Cálculo de equipos

Clarificador

Determinación de la velocidad de sedimentación a partir de datos experimentales:

$$V_s = \frac{H_0}{t} \quad \text{ec. 5}$$

Donde:

- V_s Velocidad de sedimentación
 H_0 Altura del espejo de agua de la probeta graduada de 1000 ml. al fondo
 t Tiempo de sedimentación

$$H_0 = 0.34 \text{ m}$$

$$t = 20 \text{ min} \quad \text{Determinado experimentalmente. Ver Anexo D.}$$

Sustituyendo datos en la ec. 5 tenemos:

$$V_s = \frac{0.34}{20}$$

$$V_s = 0.017 \text{ m/min}$$

Determinación del área mínima requerida para conseguir la clarificación.

De la ecuación:

$$A_c = \frac{Q_c}{V_s} \quad \text{ec. 6}$$

donde:

- A_c Área mínima requerida para conseguir la clarificación del agua.
 Q_c Efluente del clarificador
 V_s Velocidad de sedimentación

Sustituyendo valores en la ec. 6

$$A_c = \frac{Q_c}{V_s} = \frac{(135.546 \text{ m}^3 / \text{d}) \times (1 / 1440 \text{ d} / \text{min})}{0.017 \text{ m} / \text{min}}$$

$$A_c = 5.537 \text{ m}^2$$

Considerando un sobrediseño de 40%, se tiene:

$$A_c = 5.537 \text{ m}^2 \times 1.4 = 7.751 \text{ m}^2$$

El diámetro queda:

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

$$D = 3.14 \text{ m} \approx 3.10 \text{ m}$$

$$A_c = 7.571 \text{ m}^2$$

Si se considera un tiempo de residencia de 2 h, el volumen del clarificador será:

$$V = Q_0 t = 136.807 \text{ m}^3 / \text{d} (2 \text{ h}) (1/24 \text{ d} / \text{h}) = 11.4 \text{ m}^3$$

La profundidad será de:

$$H = \frac{V}{A} = \frac{11.4 \text{ m}^3}{7.571 \text{ m}^2}$$

$$H = 1.50 \text{ m}$$

Filtro

El diseño es de un filtro de arena de gravedad, con sistema de retrolavado.

Como el tamaño de las partículas en suspensión, que han de formar la torta filtrante, y el flujo del fluido a través de la misma se considera laminar, la ecuación de Ergun (Oton y Tojo⁷, pág. 329) se simplifica a:

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2 \mu}{\varepsilon^3 D^2 g_c} u_s \quad \text{ec. 7}$$

Datos:

$\Delta P = 30.48 \text{ cms (1ft)}$ Pérdida de presión a través del lecho poroso. Es el incremento de altura de agua del lecho poroso que se requiere alcanzar para tener el flujo de diseño requerido a través del filtro.

$L = 65 \text{ cms}$ Espesor del lecho poroso

$\mu = 0.01 \text{ g/cm-s}$ Viscosidad

$\varepsilon = 0.4$ Porosidad

$g_c = 981 \text{ cm/s}^2$ Aceleración de la gravedad

Incógnita:

u_s Velocidad del fluido

D Diámetro equivalente

El diámetro equivalente se calcula a partir de la ecuación propuesta por Ocón y Tojo⁷, pág. 325 tomado como dimensión característica de la partícula de forma esférica. La superficie específica del relleno, S_0 , o superficie por unidad de volumen de relleno, es

$$S_0 = \frac{A_p}{V_p} = \frac{6}{D}$$

Siendo A_p el área de superficie de las partículas que constituyen el lecho poroso y V_p el volumen de dichas partículas. Despejando D la ecuación se transforma a:

$$D = \frac{6}{S_0} \quad \text{ec. 8}$$

ε y S_0 pueden determinarse por tablas de Ocón y Tojo⁷, pág. 330.

Tamaño de la partícula = 1/32 pulgs. = 0.79 mm.

Forma	Superficie, S_0 (cm^{-1})	Porosidad, ε
esfera	76	0.393

$$D = \frac{6}{76} = 0.0789 \text{ cm}$$

Conocido D, podemos despejar u_s .

$$u_s = \frac{\Delta P \cdot \epsilon^3 D^2 g_c}{150L(1-\epsilon)^2 \mu} \text{ ----- ec. 9}$$

Sustituyendo los datos podemos calcular u_s

$$u_s = \frac{30.48(0.393)^3(0.0789)^2 981}{150(65)(1-0.393)^2(0.01)} = 0.314 \text{ cm/seg}$$

$$Q = 136.807 \text{ m}^3/\text{d} = 95004.86 \text{ cm}^3/\text{min} = 1583.4 \text{ cm}^3/\text{seg}$$

Considerando:

Que una vez por día se retrolava el filtro con un flujo 6 veces el flujo normal, por un período de 10 minutos, el flujo de adicional filtrado será:

$$95004.86 \text{ cm}^3/\text{min} \times 6 \times 10\text{min} = 5700291.6 \text{ cm}^3/\text{día} = 65.97 \text{ cm}^3/\text{seg}$$

Que se tienen tiempos perdidos 12 hrs/semana para mantenimiento preventivo, que equivalen a un promedio de tiempo perdido diario de 7.14%.

$$\text{Volumen diario a filtrar} = 1583.4 \text{ cm}^3/\text{seg} + 65.97 \text{ cm}^3/\text{seg} = 1649.37 \text{ cm}^3/\text{seg}$$

El volumen filtrado por el filtro debe considerar el tiempo promedio fuera de operación por lo que la capacidad real debe ser el flujo teórico calculado entre el factor de operación. Que para 7.14% de tiempo perdido es $(100-7.14)/100 = 0.9286$

$$\text{Volumen real requerido} = (1649.37 \text{ cm}^3/\text{seg})/0.9286 = 1776.8 \text{ cm}^3/\text{seg}$$

Area requerida del filtro.

$$A = \frac{Q}{u_s} = \frac{1776.18 \text{ cm}^3/\text{seg}}{0.314 \text{ cm/seg}} = 5647 \text{ cm}^2$$

Considerando un factor de sobrediseño de 50%.

$$A = 5647 \times 1.5 = 8471 \text{ cm}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4(8741) \text{ cm}^2}{\pi}} = 103.8 \text{ cm} \approx 105 \text{ cm} = 1.05 \text{ m.}$$

Bombas

Teorema de Bernoulli aplicado a un sistema de transporte de fluido a través de una tubería, cuando se ejerce trabajo sobre el sistema, McCabe⁵, pág. 78.

$$W + z_1 + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2g_c} = z_2 + \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2g_c} + h_f \quad \text{----- ec. 10}$$

W = trabajo realizado sobre el sistema

z = altura en m

P = presión en kg/m²

v = velocidad en m/s

ρ = densidad en kg/m³

g_c = aceleración de la gravedad en m/s²

h_f = pérdidas por fricción en m

Agrupando y despejando W tenemos:

$$W = \left(\frac{P_2}{\rho_2} - \frac{P_1}{\rho_1} \right) + \left(\frac{v_2^2}{2g_c} - \frac{v_1^2}{2g_c} \right) + (z_2 - z_1) + h_f$$

Como el fluido que se transporta es un líquido, la energía cinética es despreciable, por lo que se pueden eliminar estos términos, y si la descarga es de un recipiente abierto a otro abierto, la ecuación se simplifica a:

$$W = (z_2 - z_1) + h_f \quad \text{----- ec. 11}$$

Las pérdidas por fricción se calculan a través de la ecuación:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{u^2}{2g} \quad \text{ec. 12}$$

donde:

f = factor o coeficiente de fricción

L = longitud de la tubería

D = diámetro de la tubería

u = velocidad del fluido

g = aceleración de la gravedad

Para determinar el valor de f se requiere conocer el número de Reynolds, Re , dada por la ecuación:

$$Re = \frac{uD\rho}{\mu} \quad \text{ec. 13}$$

donde:

u = velocidad

D = diámetro de la tubería

ρ = densidad

μ = viscosidad

Bomba para agua tratada.

El flujo Q a bombear es de $1776.8 \text{ cm}^3/\text{s}$ de acuerdo al balance de materia.

$$Q = \frac{1776.8 \text{ cm}^3}{\text{s}} \times \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ cm}^3} \times \frac{\text{m}^3}{1000 \text{ l}} = 0.001777 \text{ m}^3/\text{s} = 6.4 \text{ m}^3/\text{h}$$

De:

$$Q = uA \quad \text{ec. 14}$$

$$A = \frac{Q}{u} \quad \text{ec. 15}$$

donde:

A = Area de sección transversal

Q = Flujo volumétrico

u = velocidad lineal

Para una velocidad de 1 m/s , sustituyendo la ec. 15

$$A = \frac{0.001777 \text{ m}^3 / \text{s}}{1 \text{ m} / \text{s}} = 0.001777 \text{ m}^2$$

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad \text{ec. 16}$$

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4(0.001777) \text{ m}^2}{\pi}} = 0.047 \text{ m}$$

Se selecciona una tubería de acero al carbón de 2 pulgs. Diámetro nominal cédula 40.

De tabla 10-18 Properties of Steel Pipe, Perry⁸ pág. 10-72.

$$\text{Diámetro interno} = 2.067 \text{ pulgs} = 2.067 \text{ pulgs} \times \frac{25.4 \text{ mm}}{1 \text{ pulg}} = 52.5 \text{ mm} = 0.0525 \text{ m}$$

$$\text{Area de sección transversal} = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} (0.0525 \text{ m})^2 = 0.002165 \text{ m}^2$$

La velocidad lineal es:

$$u = \frac{Q}{A} = \frac{0.001777 \text{ m}^3 / \text{s}}{0.002165 \text{ m}^2} = 0.82 \text{ m/s}$$

Cálculo de número de Reynolds:

Sustituyendo valores en la ec. 13

$$\text{Re} = \frac{0.0525 \text{ m} (0.82 \text{ m} / \text{s}) 1000 \text{ kg} / \text{m}^3}{1 \times 10^{-3} \text{ kg} / (\text{m} \cdot \text{s})} = 43050$$

De la fig. 6-9, Fanning friction factors. Reynolds Number, y de Tabla 6-1, Perry⁸ pág. 6-10.

$$\varepsilon = 0.0457 \text{ mm}$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.0457 \text{ mm}}{52.5 \text{ mm}} = 0.00087$$

$$f = 0.0057$$

Sustituyendo en la ec. 12

$$h_f = f \frac{2L}{D} \frac{u^2}{g} = 0.0057 \frac{2(20 \text{ m})(0.82 \text{ m} / \text{s})^2}{(0.0525 \text{ m})(9.8 \text{ m} / \text{s}^2)} = 0.2979 \text{ m}$$

$$z_2 = 3 \text{ m}$$

$$z_1 = 0 \text{ m}$$

De la ec. 11

$$W = (3\text{m} - 0\text{m}) + 0.2979 = 3.2979 \text{ m}$$

Se selecciona una bomba con una descarga de 5 Kg/cm² igual a 50 m de columna ya que es la presión necesaria para poder emplear el agua en jardines, enviarla a torre de enfriamiento.

$$\text{Potencia} = \frac{QW\rho}{\eta} \quad \text{ec. 17}$$

La eficiencia η se determina a partir de la curva de la gráfica 1 que se encuentra en anexo A, del fabricante de bombas Goulds Pumps.

$$\text{Potencia} = \frac{0.001777 \text{ m}^3/\text{s} (50\text{m}) (1000 \text{ Kg}/\text{m}^3)}{0.36} = 246.8 \frac{\text{Kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Potencia} = 246.8 \frac{\text{Kgm}}{\text{s}} \times \frac{1\text{HP}}{75\text{Kgm}/\text{s}} = 3.29 \text{ HP}$$

Se selecciona un motor de 4 HP.

Bomba de agua de retrolavado

$$Q = 0.001777 \text{ m}^3/\text{s} \times 6 = 0.010662 \text{ m}^3/\text{s} = 38.2 \text{ m}^3/\text{h}$$

Para una velocidad de 1.5 m/s de la ec. 15

$$A = \frac{0.010662 \text{ m}^3/\text{s}}{1.5 \text{ m}/\text{s}} = 0.007108 \text{ m}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4(0.007108) \text{ m}^2}{\pi}} = 0.09513 \text{ m}$$

Se selecciona una tubería de acero al carbón de 4 pulgs. Diámetro nominal cédula 40.

De tabla 10-18 Properties of Steel Pipe, Perry², pág. 10-72.

$$\text{Diámetro interno} = 4.026 \text{ pulgs} = 4.026 \text{ pulgs} \times \frac{25.4 \text{ mm}}{1 \text{ pulg}} = 102.26 \text{ mm} = 0.1022 \text{ m}$$

$$\text{Área de sección transversal} = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} (0.1022 \text{ m})^2 = 0.008213 \text{ m}^2$$

La velocidad lineal es:

$$u = \frac{Q}{A} = \frac{0.010662 \text{ m}^3/\text{s}}{0.008213 \text{ m}^2} = 1.298 \text{ m/s}$$

Se selecciona una bomba con una descarga de 3 Kg/cm² igual a 30 m de columna. La eficiencia será de 0.62 de acuerdo a la gráfica 2 del anexo B, proporcionada por el fabricante Goulds Pumps.

De la ec. 17

$$\text{Potencia} = \frac{0.010662 \text{ m}^3 / \text{s} (30 \text{ m}) (1000 \text{ Kg} / \text{m}^3)}{0.62} = 515.9 \frac{\text{Kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Potencia} = 515.9 \frac{\text{Kg} \cdot \text{m}}{\text{s}} \times \frac{1 \text{ HP}}{75 \text{ Kg} \cdot \text{m} / \text{s}} = 6.878 \text{ HP}$$

Se selecciona un motor de 7 HP.

Bomba de aguas de diversas fuentes.

$$Q = 4101 \text{ m}^3 / \text{mes} = 0.001582 \text{ m}^3 / \text{s} = 5.69 \text{ m}^3 / \text{h}$$

Para una velocidad de 1 m/s de la ec. 15

$$A = \frac{0.001582 \text{ m}^3 / \text{s}}{1 \text{ m} / \text{s}} = 0.001582 \text{ m}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4(0.001582) \text{ m}^2}{\pi}} = 0.0448 \text{ m}$$

Se selecciona una tubería de acero al carbón de 2 pulgs. Diámetro nominal cédula 40.

De tabla 10-18 Properties of Steel Pipe, Perry⁸, pág. 10-72.

$$\text{Diámetro interno} = 2.067 \text{ pulgs} = 2.067 \text{ pulgs} \times \frac{25.4 \text{ mm}}{1 \text{ pulg}} = 52.5 \text{ mm} = 0.0525 \text{ m}$$

$$\text{Area de sección transversal} = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} (0.0525 \text{ m})^2 = 0.002165 \text{ m}^2$$

La velocidad lineal es:

$$u = \frac{Q}{A} = \frac{0.001582 \text{ m}^3 / \text{s}}{0.002165 \text{ m}^2} = 0.73 \text{ m/s}$$

Se selecciona una bomba con una descarga de 3 Kg/cm² igual a 30 m de columna. De acuerdo a la gráfica 3 $\eta = 0.38$, del anexo C, proporcionada por el fabricante de bombas Goulds Pumps.

De la ec. 17

$$\text{Potencia} = \frac{0.001582 \text{ m}^3 / \text{s} (30 \text{ m}) (1000 \text{ Kg} / \text{m}^3)}{0.38} = 124.89 \frac{\text{Kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Potencia} = 124.89 \frac{\text{Kgm}}{\text{s}} \times \frac{1\text{HP}}{75\text{Kgm/s}} = 1.66\text{HP}$$

Se selecciona un motor de 2 HP.

Bomba dosificadora

Para la alimentación de aguas provenientes de reacción y tanques de lavado al clarificador.

$$3.2 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}} \times 1000 \frac{\text{L}}{\text{m}^3} \times \frac{\text{mes}}{30\text{días}} \times \frac{\text{día}}{24\text{h}} = 4.444 \text{L/h}$$

Selección Capacidad de bomba

Considerando que opere al 60% de capacidad

$$\frac{4.444 \frac{\text{L}}{\text{h}}}{0.6} = 7.407 \approx 7.5 \frac{\text{L}}{\text{h}}$$

Volumen de Fosa de Aguas Blancas provenientes de Planta de Emulsiones.

Para determinar el volumen de la Fosa de Aguas Blancas se tomó el volumen de aguas residuales generadas durante un mes, que es de 3.2 m^3 .

Considerando una capacidad suficiente de almacenamiento durante dos meses. El volumen de la fosa será:

$$V = (3.2 \text{ m}^3/\text{mes}) \times (2 \text{ mes}) = 6.4 \text{ m}^3$$

Suponiendo una fosa de 1.5 m de profundidad y de 2 m de ancho.

$$V = h \times a \times L$$

$$L = \frac{V}{h \times a} = \frac{6.4 \text{ m}^3}{1.5\text{m}(2\text{m})} = 2.13\text{m} \approx 2.2\text{m}$$

Profundidad 1.5 m

Largo 2.2 m

Ancho 2.0 m

$$V = 6.6 \text{ m}^3$$

Volumen de Fosa receptora de Efluentes Diversos.

Volumen total/día = 136.7 m³

Considerando que se opere con un nivel máximo de 90% y con una capacidad de almacenamiento de un día, V = 150 m³.

Suponiendo una fosa de 3 m de profundidad y de 6 m de ancho.

$$V = h \times a \times L$$

$$L = \frac{V}{h \times a} = \frac{150 \text{ m}^3}{3 \text{ m}(6 \text{ m})} = 8.33 \text{ m}$$

Profundidad 3.0 m

Largo 8.33 m

Ancho 6.00 m

Volumen de Fosa de Aguas Residuales tratadas.

Volumen total/día = 136.8 m³

Considerando que se opere con un nivel máximo de 90% y con una capacidad de almacenamiento de 12 horas, V = 76 m³.

Suponiendo una fosa de 3 m de profundidad y de 6 m de ancho.

$$V = h \times a \times L$$

$$L = \frac{V}{h \times a} = \frac{76 \text{ m}^3}{3 \text{ m}(6 \text{ m})} = 4.22 \text{ m}$$

Profundidad 3.0 m

Largo 4.22 m

Ancho 6.00 m

Tanque para preparación de cal, sulfato de aluminio y polímero.

Q_{cal} = 0.684 m³/d

Considerando que se opere con un nivel del 85% y con una capacidad de almacenamiento de un día,

V = 0.8 m³

$$V = \pi r^2 h$$

$$h = 2r$$

$$V = 2\pi r^3$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{V}{2\pi}} = \sqrt[3]{\frac{0.8}{2\pi}}$$

$$r = 0.503 \text{ m} \cong 0.5 \text{ m}$$

$$h = 1.0 \text{ m}$$

Bomba dosificadora de cal, sulfato de aluminio y polímero.

$$0.684 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \times 1000 \frac{\text{L}}{\text{m}^3} \times \frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}} = 28.5 \text{ L/h}$$

Selección capacidad bomba

Considerando que opere al 60% de capacidad

$$\frac{28.5 \text{ L/h}}{0.6} = 47.5 \text{ L/h}$$

Agitador

Cálculo del consumo de potencia, a partir de la ec. 9.20 de McCabe & Smith⁵, pág. 253.

$$P = \frac{N_p N_{Fr}^m n^3 D_a^5 \rho}{g_c} \quad \text{ec. 18}$$

donde:

P	Potencia
N_p	Función de potencia
N_{Fr}	Número de Froude
n	Velocidad de giro
D_a	Diámetro del rodete
ρ	Densidad
g_c	Aceleración de la gravedad

D_a para agitadores de hélice son menores de 45 cm, agitadores de paletas entre el 50 al 80% del diámetro interior del tanque, agitadores de turbina entre el 30 al 50% del diámetro del tanque.

N_p para agitadores de turbina y hélice se determina a través de las gráficas de la Fig. 9.12 y Fig. 9.13, McCabe & Smith⁴, pág. 250-251.

$$N_{Fr} = \frac{n^2 D_a^3}{g_c} \quad \text{ec. 19}$$

$$m = \frac{a - \log N_{Re}}{b} \quad \text{ec. 20}$$

$$N_{Re} = \frac{D_a^2 n \rho}{\mu} \quad \text{ec. 21}$$

N_{Re} Número de Reynolds

a y b constantes que se determinan a partir de la tabla 9.1, McCabe & Smith⁴, pág. 252.

μ viscosidad

Cuando el número de Froude no es un factor importante, la potencia está dada por

$$P = \frac{N_p n^3 D_a^5 \rho}{g_c} \quad \text{ec. 22}$$

Agitador para clarificador

Agitador de paleta tipo ancla.

$$D_a = 0.8 (3.10\text{m}) = 2.48 \text{ m}$$

$$n = 12 \text{ rpm}$$

De la ec. 19

$$N_{Fr} = \frac{\left(\frac{12 \text{ rpm}}{60 \text{ s} / \text{min}} \right)^2 (2.48 \text{ m})}{9.8 \text{ m} / \text{s}^2} = 0.01012$$

La ec. 22 se transforma a la siguiente en el caso de agitadores de paletas con número de Reynolds mayor a 10000.

$$P = \frac{K_T n^3 D_a^5 \rho}{g_c} \quad \text{ec. 23}$$

De la tabla 9.3 de McCabe & Smith⁴, se obtiene el valor de la constante K_T .

$$K_T = 1.7$$

$$P = \frac{(1.7) \left(\frac{10}{60} \right)^3 (2.48)^3 (1000)}{9.8} = 130.18 \frac{\text{Kg} \cdot \text{m}}{\text{s}} = 1.73 \text{HP}$$

Se selecciona un motor de 2 HP.

Agitador de tanque de preparación de cal, sulfato de aluminio y polímero.

$$D_a = 30 \text{ cm} = 0.3 \text{ m}$$

$$n = 300 \text{ rpm}$$

De la ec. 19

$$N_{Fr} = \frac{\left(\frac{300 \text{ rpm}}{60 \text{ s/min}} \right)^2 (0.3 \text{ m})}{9.8 \text{ m/s}^2} = 0.765$$

De la ec. 21

$$N_{Re} = \frac{(0.3 \text{ m})^2 \left(\frac{300 \text{ rpm}}{60} \right) (1000 \text{ Kg/m}^3)}{1 \times 10^{-3} \text{ Kg/m} \cdot \text{s}} = 450000$$

Agitador de hélice de tres patas sin placas deflectoras de la Fig. 9.13 McCabe & Smith⁵.

$$N_p = 0.45$$

De la ec. 20 y de la tabla 9.1, McCabe⁵.

$$a = 1.7$$

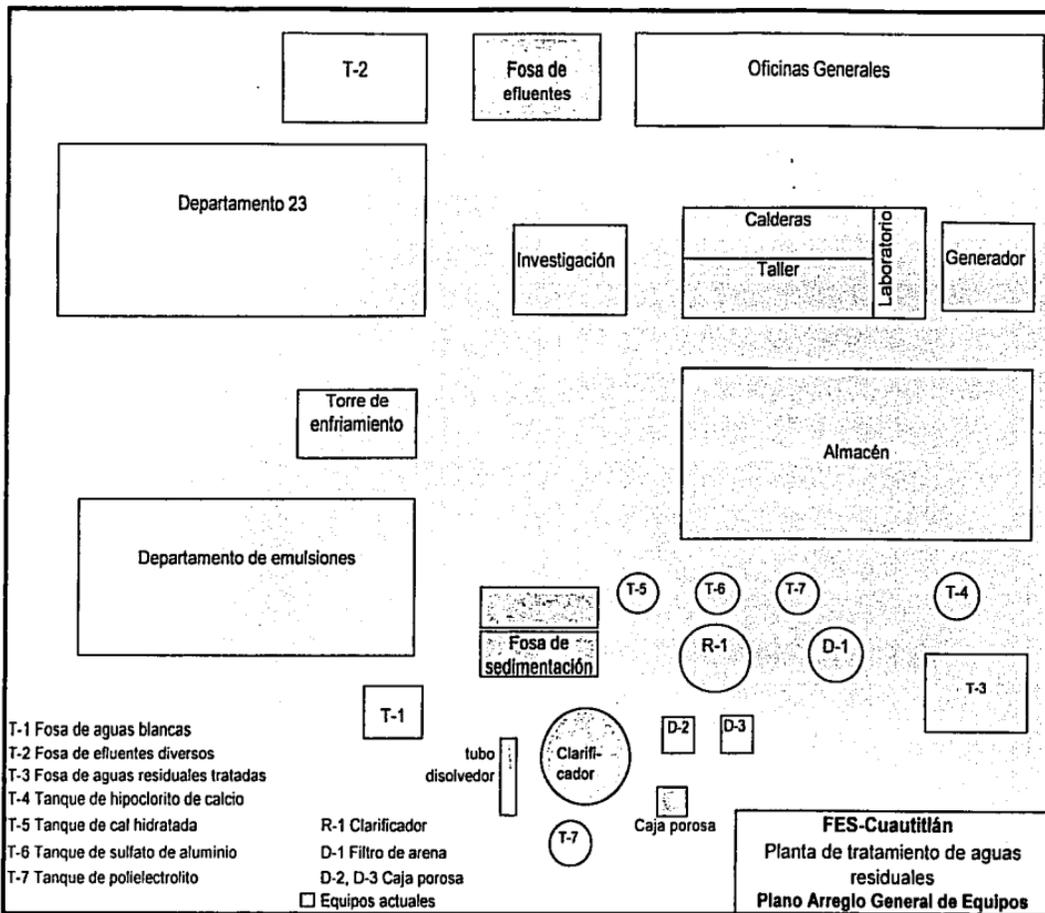
$$b = 18.0$$

$$m = \frac{1.7 - \log 450000}{18} = -0.2196$$

de la ec. 18

$$P = \frac{(0.45)(0.765)^{-0.2196} \left(\frac{300}{60} \right)^3 (0.3)^3 (1000)}{9.8} = 14.79 \frac{\text{Kg} \cdot \text{m}}{\text{s}} = 0.197 \text{HP}$$

Se selecciona un motor de ¼ HP.



- T-1 Fosa de aguas blancas
- T-2 Fosa de efluentes diversos
- T-3 Fosa de aguas residuales tratadas
- T-4 Tanque de hipoclorito de calcio
- T-5 Tanque de cal hidratada
- T-6 Tanque de sulfato de aluminio
- T-7 Tanque de polielectrolito

- R-1 Clarificador
- D-1 Filtro de arena
- D-2, D-3 Caja porosa

Equipos actuales

XI. Estimado de inversión.

Para el estimado de inversión se partió de información con que cuenta el Departamento de Ingeniería de Desarrollo Tecnológico de la empresa, a partir de registros de proyectos realizados y procedimientos de estimación de costos de literatura especializada.

Bombas.

Para las bombas centrífugas se empleó el método de exponencial (seis decimas) con la ecuación (1), pag. 169, Max S. Peters/ Klaus D. Timmerhaus⁹.

$$C_2 = C_1 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^{0.6}$$

C_1 Costo del equipo de referencia. Tomado de datos proporcionados por la empresa

C_2 Costo del equipo que se desea calcular

Q_1 Capacidad del equipo de referencia

Q_2 Capacidad del equipo que se desea calcular

Como el tamaño y potencia de las bombas centrífugas está relacionado con el caudal y la columna, las cuales determinan la potencia de los equipos, se tomó ésta como referencia para determinar el precio en base a la escalación de la potencia empleando el método exponencial.

Costo de referencia: Precio real de una bomba centrífuga marca Goulds de acero al carbón, de 10 HP de potencia, precio \$25.000.00, según registros de avalúos en la empresa donde se realizó el estudio.

Bomba de aguas tratadas 4 HP.

$$C_2 = 25 \left(\frac{4}{10} \right)^{0.6} = 14 \text{ miles de pesos}$$

Descripción del equipo	Potencia	Costo estimado
Bomba de aguas tratadas	4 HP	\$14,000.00
Bomba de retrolavado	7 HP	\$20,000.00
Bomba de diversas fuentes	2 HP	\$9,500.00
	Total	\$43,500.00

Para las bombas dosificadoras, se utilizaron precios reales de este tipo de equipos en base a registros de proyectos recientes realizados de la empresa donde se realizó el estudio.

Tanques

Para el estimado de costo de los tanques, se calculó el peso de los mismos y se utilizaron los precios unitarios por unidad de peso publicados por internet de la empresa constructora *Sigma Proyectos* ubicada en Cuautitlán Izcalli, para tanques de acero industriales.

T-4,T-5,T-6,T-7 Tanques de preparación de cal, polímero, sulfato de aluminio, hipoclorito de calcio.

Diámetro: 1 m D
 Altura: 1 m h
 Espesor: 0.25 pulgs. = 0.00635 m

Area lateral: πDh = 3.1416 m²

Fondo: $\pi/4 * D^2$ = 0.7854 m²

Area total: 3.927 m²

Volumen: (Area)(espesor) 0.0249365 m³

Peso específico del acero: 7.03 tons/m³ Pe

Peso del tanque: V*Pe 0.1753032 tons. = 175.30 kg.

Peso de baffles y boquilla: 10% del peso del cuerpo = 17.53

Peso total del tanque con accesorios = 192.83 Kg

Costo unitario por peso del tanque: \$20.5/kg Precio comercial tomado de la constructora Sigma Proyectos de Cuautitlán Izcalli

Costo total del tanque: \$3953.015 aprox. \$4,000.00

D-1 Filtro.
 Diámetro: 1.05 m
 Altura: 1.4 m
 Espesor: 5/8" 0.016 m

Area lateral: πDh 4.618 m²
 Fondo: $\pi/4 * D^2$ 0.866 m²

Area total: 5.484 m²
 Volumen: (Area)(espesor) 0.088 m³

Peso específico del acero: 7.03 tons/m³ Pe

Peso del filtro : 0.617 tons

Peso de filtro incluido soporte interno, sistema de distribución, mecanismo removedor de costra y boquilla:

Se considera un peso adicional de 30%. = 0.185 tons

Peso total del tanque con accesorios = 0.802 tons

Costo unitario por peso del filtro: Se considera un factor de 3 con respecto a los tanques por ser equipo especial, costo = \$61.50/kg

Costo total del filtro: \$49,316

R-1 Clarificador
 Diámetro: 3.1 m
 Altura: 1.5 m
 Espesor: 5/8" 0.016 m

Area lateral: πDh = 14.61 m²
 Fondo: $\pi/4 * D^2$ 7.55 m²

Area total: 22.16 m²
 Volumen: (Area)(espesor) 0.35 m³

Peso específico del acero: 7.03 tons/m³ Pe

Peso del clarificador : 2.49 tons

Peso de clarificador incluido sistema de agitación, derrame y boquillas.

Considerando un peso adicional de 40%. 0.997 tons

Peso total del clarificador con accesorios 3.489 tons

Costo unitario por peso de clarificador: Se considera un factor de 3 con respecto a los tanques por ser equipo especial, costo = \$61.50/kg

Costo total del clarificador: \$214,572

Estimación de costo de fosas:

T-1 Fosa de aguas blancas

Se tomó como referencia los precios reales de concreto armado de 15 cms. de espesor con varillas de 3/8" a 20 cm. de distancia, incluye materiales y mano de obra.

Costo de m² de losa de concreto reforzado: \$500.00/m²

El costo de excavación y acarreo de \$70.00/m³

Volumen de excavación: 2.30x2.5x1.8 m = 10.35 m³

Costo total de excavación y acarreo: = \$725

Area

2 paredes de 2x1.5 m 6.0 m²

2 paredes de 2.2x1.5 m 6.6 m²

fondo y losa de 2.2x2 m 8.8 m²

21.4 m²

Costo total de concreto armado \$10,700

Costo total de fosa \$11,425

T-2 Fosa de efluentes diversos

Volumen de excavación: $6.30 \times 8.63 \times 3.3$ m = 179.4177 m³
Costo total de excavación y acarreo: = \$12,559

	Area
2 paredes de 6x3 m	36.00 m ²
2 paredes de 8.33x3 m	49.98 m ²
fondo y losa de 8.33x6 m	<u>99.96 m²</u>
	185.94 m ²
Costo total de concreto armado	\$92,970
Costo total de fosa	\$105,529

T-3 Fosa de aguas tratadas

Volumen de excavación: $6.30 \times 4.52 \times 3.3$ m = 93.9708 m³
Costo total de excavación y acarreo: = \$6,578

	Area
2 paredes de 6x3 m	36.00 m ²
2 paredes de 4.22x3 m	25.32 m ²
fondo y losa de 4.22x6 m	<u>50.64 m²</u>
	111.96 m ²
Costo total de concreto armado	\$55,980
Costo total de fosa	\$62,558

**Estimado de inversión
en miles de pesos**

Equipos.	Cantidad	Costo unit.	Total
Clarificador	1	214	214
Filtro	1	49	49
Tanques dosificadores	4	4	16
Fosa efluentes diversos	1	105	105
Fosa de aguas blancas	1	11	11
Fosa de agua residual tratada	1	62	62
Bombas centrifugas	4	10	43
Bombas dosificadoras	5	10	50
Cajas porosas	3	5	15
Costo de equipos	CE		565
De acuerdo a los factores de Lang, a partir de Tabla 17, Peters & Timmerhaus ⁹ :			
Tubería y accesorios		16% costo de equipos	90
Sistema eléctrico, incluye arrancadores, interruptores, cableado.		11% CE	62
Instalaciones de equipos e instrumentos		47% CE	265
Gran total			982

XII. Costo del tratamiento.

Costos directos de operación.

Se tomaron como base costos reales en base a la información con que cuenta la empresa.

Base: 4104.2 m³/mes de afluente.

1. Consumo de productos químicos.

Cal hidratada. Concentración en el clarificador: 50 ppm

$$4104.2 \frac{m^3}{mes} \cdot \frac{50g}{m^3} \cdot \frac{kg}{1000g} \cdot \frac{\$1.40}{kg} = \$287.00 / mes$$

Sulfato de aluminio. Concentración : 50 ppm

$$4104.2 \frac{m^3}{mes} \cdot \frac{50g}{m^3} \cdot \frac{kg}{1000g} \cdot \frac{\$1.97}{kg} = \$404.00 / mes$$

Polímero. Concentración: 5 ppm

$$4104.2 \frac{m^3}{mes} \cdot \frac{5g}{m^3} \cdot \frac{kg}{1000g} \cdot \frac{\$43.2}{kg} = \$886.00 / mes$$

Hipoclorito de calcio. Concentración: 3 ppm

$$4104.2 \frac{m^3}{mes} \cdot \frac{3g}{m^3} \cdot \frac{kg}{1000g} \cdot \frac{\$29.0}{kg} = \$357.00 / mes$$

Total de costo de productos químicos: \$ 1,914.00/mes

2. Consumo de electricidad.

Bombas.

Fosa de efluentes diversos: ----- 2.00 HP

Fosa de aguas Blancas:----- 0.25 HP

Retrolavado de filtros:----- 7.00 HP

Aguas residuales tratadas:-----	4.00 HP
4 bombas dosificadoras de ¼ HP c/u -----	4.00 HP
Total -----	17.25 HP
Agitadores.	
Clarificador: -----	2.00 HP
4 Agitadores de tanques de químicos ¼ HP c/u -----	1.00 HP
Total -----	3.00 HP
Gran total de bombas y agitadores -----	20.25 HP

Costo por consumo de electricidad.

El costo unitario real es de \$0.65/kwh

$$20.25\text{HP} \cdot \frac{0.746\text{kw}}{\text{HP}} \cdot \frac{24\text{h}}{\text{día}} \cdot \frac{30\text{días}}{\text{mes}} \cdot \frac{\$0.65}{\text{kwh}} = \$ 7,069.00/\text{mes}$$

4. Mano de obra directa:

Se estima que la operación de planta consume el 20% del tiempo de un obrero calificado de servicios auxiliares que atiende las calderas, planta de tratamiento de aguas de alimentación a calderas, torres de enfriamiento, compresores de aire, pozos de agua y subestación eléctrica.

Se tienen un grupo de 4 operadores para cubrir las 24 horas de operación los 365 días del año en un rol de 6 días de trabajo por 2 de descanso, las vacaciones y ausencias por distintos motivos se cubren con tiempo extra.

Salario diario: \$150.00/día, gastos adicionales sobre el salario (vacaciones, pagos de impuestos, seguro social, SAR, otras prestaciones): 80%

Costo real (salario + más sobresalario): \$270.00/día

Costo directo de mano de obra para operar la planta de Tratamiento de aguas residuales:

$$\frac{4 \text{ operadores}}{\text{día}} \cdot \frac{\$270.00}{\text{operador}} \cdot \frac{30 \text{ días}}{\text{mes}} = \$32,400.00 / \text{mes}$$

Resumen de costos directos mensuales.

Productos químicos -----	\$ 1,914.00
Electricidad -----	7,069.00
Mano de obra directa -----	<u>32,400.00</u>
Total -----	\$ 41,383.00

Gastos indirectos de fábrica.

Se considera el factor promedio estadístico de gastos de mantenimiento mensuales sobre el valor de los activos fijos de fábrica revaluados durante los últimos 5 años de la empresa en donde se hizo el anteproyecto.

Factor de gastos mensuales de mantenimiento: 5 % del valor del activo de fábrica (CE).

$$\text{Gastos indirectos de fábrica} = \$ 565,000 \times 0.05 = \$ 28,250.00/\text{mes}$$

Costo total mensual.

Costo directo de operación -----	\$ 41,383.00
Gastos indirectos de fábrica -----	<u>28,250.00</u>
Suma -----	\$ 69,633.00

Costo unitario.

$$\frac{\$69,633.00 / \text{mes}}{4,104.2 \text{ m}^3 / \text{mes}} = \$16.97 / \text{m}^3$$

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

XIII. Evaluación económica.

Actualmente se tiene un gasto por tratamiento de aguas residuales de aproximadamente \$110,000/mes y no se reusa el agua por tener variaciones de calidad que ocasionan un pago anual de derechos del orden de \$ 150,000 anuales por no cumplir en forma sistemática los parámetros establecidos por las autoridades. De hacerse el proyecto se ahorraría :

$$\$110,000 - \$69,633.00 = \$ 40,367.00 /mes$$

Se estima que con el proyecto, además de reducir el costo del tratamiento, se podría reusar aproximadamente el 50% del agua residual tratada, lo que reduciría el consumo de agua de pozo en aproximadamente 2050 m³/mes, que a un costo de \$13.00/m³ por derecho de extracción, representa un costo de extracción de:

$$2050 \text{ m}^3/\text{mes} \times \$13/\text{m}^3 = \$ 26,650.00/\text{mes}.$$

La planta de tratamiento actual no separa ni controla la concentración de sólidos del afluente a la planta, lo cual dificulta el control del clarificador, y adolece de la etapa de filtración, lo cual no le permite eliminar totalmente los sólidos suspendidos, el control es totalmente manual y con muchas dificultades para lograr el tratamiento. No se hace una segregación de aguas que no deberían de ser enviadas a la planta de tratamiento, lo cual origina una sobrecarga, mala operación y altos costos.

Resumen de ahorros mensuales de ejecutarse el proyecto.

Costos por tratamiento -----	\$ 40,367.00
Pagos de derechos de descarga -----	12,500.00
Pago de derechos de extracción -----	<u>26,650.00</u>
Total -----	\$ 79,517.00

Cálculo de los meses en que se recupera la inversión.

$$\frac{\$982,000.00}{\$79,517.00/\text{mes}} = 12.35 \text{ meses} \approx 1 \text{ año}$$

XIV. Conclusiones.

Dada las tendencias actuales a nivel mundial y nacional de cuidar el medio ambiente y racionalizar el uso y explotación de los recursos naturales como el agua, es conveniente que las aguas residuales de las industrias cumplan plenamente con la normatividad impuesta por los gobiernos y adicionalmente las empresas hagan todo lo necesario para minimizar el uso de los recursos acuíferos en los lugares en donde éste es escaso, como lo es la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Aunque es necesario recalcar que para que se efectúe un efectivo control de contaminantes en las aguas de desecho de una planta de tratamiento, es recomendable optimizar los procesos de las plantas que descargan efluentes a los sistemas de recolección de desechos, y evitar hasta donde sea posible desperdicios de productos, sean éstos desde materia prima hasta producto terminado.

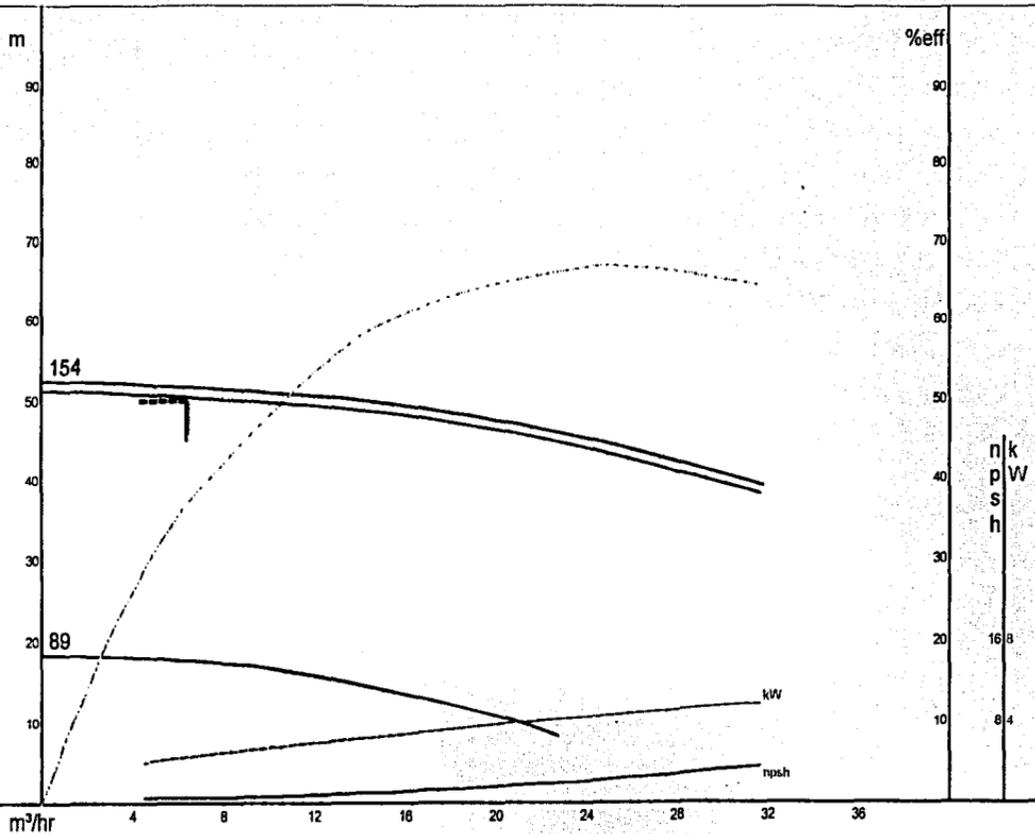
Que la planta cuente con un buen mantenimiento preventivo que nulifique fugas de materiales al drenaje. Es decir, que el control de contaminantes empiece a serlo desde la misma planta de proceso.

En base a lo anterior, el anteproyecto de instalar una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales que permita el reuso del agua y que la descarga vertida al cuerpo receptor externo sirva para uso agrícola, resulta altamente recomendable pues contribuye a la ecología, además de ser viable técnica y económicamente.

XV. Bibliografía

1. Baird, Colin. *Química Ambiental*. Editorial Reverté. Segunda Edición. Barcelona, España. 2001.
2. Hammer, Mark J. *Water and Waste-Water Technology*. John Wiley & Sons Publishing. Canadá. 1975.
3. Juárez, Clemente; Rochin Lemus, Carlos. *Manual de Química Aplicada*. Editorial Rorez. México. 1966.
4. Manahan, Stanley E. *Environmental Chemistry*. Seventh Edition. USA. 1999.
5. McCabe, Warren L.; Smith, Julian C., Harriott, Peter. *Unit Operations of Chemical Engineering*. Fifth Edition. McGraw-Hill. USA. 1993.
6. Nordell, Eskel. *Tratamiento de agua para la industria y otros usos*. Compañía Editorial Continental. Segunda Edición. México. 1961.
7. Ocón García, Joaquín; Tojo Barreiro, Gabriel. *Problemas de Ingeniería Química*. Ediciones Aguilar, Madrid, España, 1970.
8. Perry, Robert H.; Green, Don W. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. Seventh Edition. McGraw-Hill. 1997.
9. Peters, Max S.; Timmerhaus, Klaus D. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. Fourth Edition. McGraw-Hill. 1991.

10. Powell, Sheppard T. *Acondicionamiento de Aguas para la Industria*. Editorial Limusa – Wiley. México. 1970.
11. Ramalho, R. S. *Tratamiento de Aguas Residuales*. Editorial Reverté. Segunda Edición. España. 1993.
12. Rigola Lapena, Miguel. *Tratamiento de Aguas Industriales*. Editorial Alfaomega marcombo. México. 1999.
13. Unda Opazo, Francisco. *Ingeniería Sanitaria aplicada a saneamiento y salud pública*. Editorial Limusa. México. 1994.



Anexo A

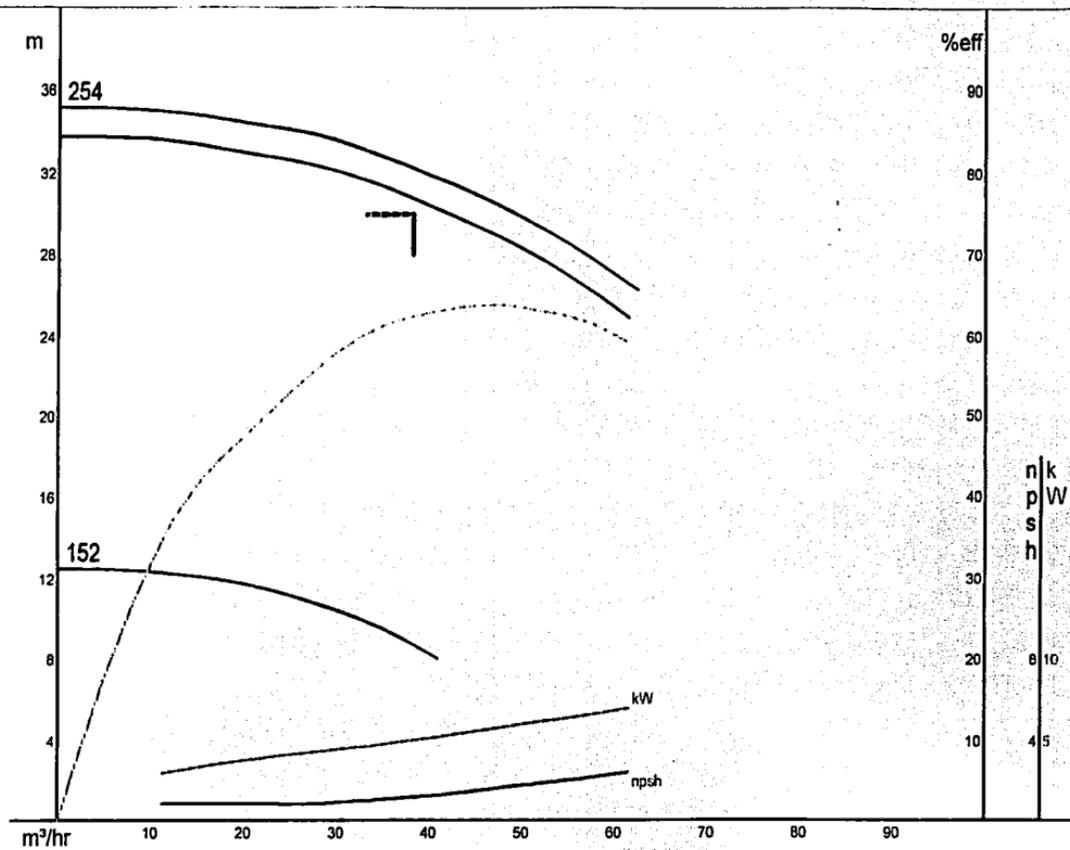
Hidromaquinaria Integral
 Bomba de aguas tratadas
 Date: 02/02/102 File: GRAF1

Goulds Pumps 60 Hz Catalog
 Catalog: GOULDS80 ver 1.1
 Curve: 3030-1

Type: 3196ALLOY
 Size: 1x1.5-6_ST
 Speed: 3500 Dia: 152



64



Anexo B

Hidromaquinaria Integral

Bomba de agua de retrolavado

Date: 02/02/102 File: GRAF2

Goulds Pumps 60 Hz Catalog

Catalog: GOULDS60 ver 1.1

Curve: 4051-1

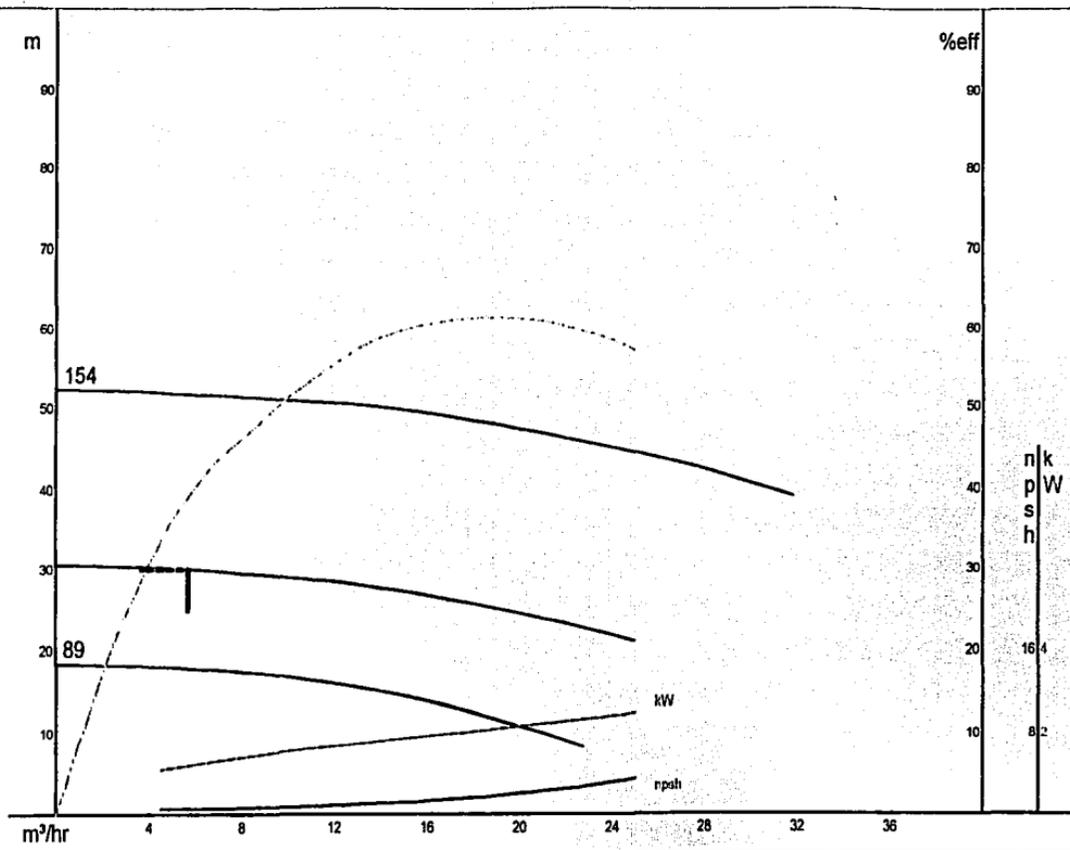
Type: NM3196

Size: 2x3-10_MT

Speed: 1750 Dia: 249



65



Anexo C

Hidromaquinaria Integral
 Bomba de aguas de diversas fuentes
 Date: 02/02/102 File: GRAF3

Goulds Pumps 60 Hz Catalog
 Catalog: GOULDS80 ver 1.1
 Curve: 3030-1

Type: 3196ALLOY
 Size: 1x1.5-6_ST
 Speed: 3500 Dia: 118



CS

Anexo D

La determinación del tiempo de sedimentación se determinó experimentalmente como se indica:

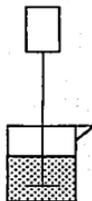
Se hicieron pruebas para determinar el coagulante adecuado utilizando vasos de precipitados de 2000 ml en los que se ponía el agua residual con el coagulante y se iniciaba la agitación por medio de agitadores eléctricos a 250 rpm, después de 10 min de agitación se vaciaba el agua a probetas de 1000 ml para medir el tiempo de sedimentación.

Estas pruebas se hicieron con distintos coagulantes a distintas concentraciones, y también con distintas aguas residuales.

H_0 : Altura de la probeta graduada = 0.34 m.

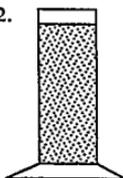
Descripción de coagulantes adicionados para el tratamiento del agua, 0.1 % de sólidos	Tiempo de sedimentación
5 ml cal 1% 5ml Al_2SO_4 1% 5 ml polímero 0.1 %	20 min
5 ml cal 1% 5 ml polímero 0.1 %	22 min
5 ml polímero 0.1 %	No se observó cambio en un día.

1.



Se adiciona agua y coagulantes, y se agita.

2.



Se vacía el contenido del vaso a la probeta.

3.



Se toma el tiempo de sedimentación.