

DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA  
LA INDUSTRIA DE ACEITES Y GRASAS VEGETALES

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades

Departamento de Ingeniería Industrial

DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA  
LA INDUSTRIA DE ACEITES Y GRASAS VEGETALES

CARLOS EDUARDO CORDON TOWNSEND

Trabajo de graduación presentado para optar  
el grado académico de  
Licenciado en Ingeniería Industrial



Guatemala

1997

Vo. Bo. :

(f)

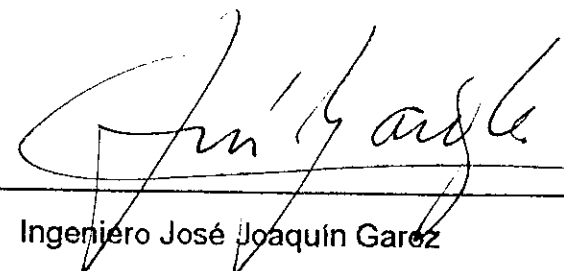
  
Ingeniero Luis Alberto Paz Masek

Tribunal :

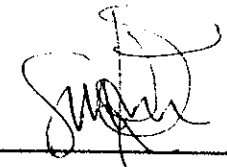
(f)

  
Ingeniero Luis Alberto Paz Masek

(f)

  
Ingeniero José Joaquín Garz

(f)

  
Ingeniero Oscar Gil Girón

Fecha de aprobación: 14 de octubre de 1997.

A mis padres

## CONTENIDO

	Pág.#
RESUMEN	
I. INTRODUCCION.....	1
II. ANTECEDENTES.....	3
A. Importancia de la conservación del medio ambiente.....	3
B. Descripción breve del proceso de producción de aceites y grasas vegetales.....	4
C. Ingeniería de aguas residuales.....	8
1. Ingeniería Sanitaria.....	8
2. Caudales de aguas residuales.....	10
3. Características de las aguas residuales.....	13
4. Operaciones físicas unitarias.....	14
D. Tratamiento de aguas residuales en la industria de aceites y grasas vegetales.....	15
E. Parámetros propuestos por CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente) y AMSA (Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y Lago de Amatitlán).....	25
III. OBJETIVOS.....	27
IV. ENSAYOS PILOTO.....	28
A. Material y equipo.....	28
B. Resultados.....	32
V. METODOLOGIA.....	38
A. Diseño del sistema de tratamiento.....	38
1. Generalidades.....	38
2. Parámetros de diseño.....	38

3. Descripción del equipo y flujo de tratamiento.....	39
4. Diseño del tanque de sedimentación I.....	41
5. Diseño del tanque de sedimentación II.....	42
6. Diseño del tanque de aireación.....	43
7. Diseño del tanque de flotación.....	44
8. Diseño del tanque de lodos.....	45
9. Diseño del sistema de deshidratación de lodos.....	46
10. Balance del proceso.....	47
B. Especificaciones.....	48
1. Estructuras metálicas de soporte y obra civil.....	48
C. Costos.....	48
1. Costos de construcción.....	48
2. Costos de montaje.....	49
3. Costos de operación y mantenimiento mensual.....	50
D. Comparación monetaria de la planta de tratamiento diseñada contra plantas de igual capacidad que se ofrecen en el mercado.....	51
VI. DISCUSIONES.....	53
VII. CONCLUSIONES.....	55
VIII. RECOMENDACIONES.....	56
IX. BIBLIOGRAFIA.....	57
ANEXOS	
1. Cálculos de costos de construcción del tanque de sedimentación I.....	59
2. Cálculos de costos de construcción del tanque de sedimentación II.....	61
3. Cálculos de costos de construcción del tanque de	

aireación.....	63
4. Cálculos de costos de construcción del tanque de flotación.....	65
5. Cálculos de costos de construcción del tanque de lodos.....	67
6. Cálculos de costos de construcción de galera.....	68
7. Figura 1: Principales dispositivos empleados para la compresión y la saturación de aire del agua presurizada.....	69
8. Figura 2: Tanque piloto.....	70
9. Figura 3: Trampa de grasa.....	71
10. Figura 4: Diagrama de flujo del proceso de tratamiento.....	72
11. Figura 5: Tanque de sedimentación I.....	73
12. Figura 6: Tanque de sedimentación II.....	74
13. Figura 7: Tanque de aireación.....	75
14. Figura 8: Tanque de flotación.....	76
15. Figura 9: Tanque de lodos.....	77
16. Figura 10: Diagrama de Gantt del balance del proceso.....	78
17. Figura 11: Vistas auxiliares de la planta de tratamiento.....	79

## LISTA DE TABLAS

Tabla	Pág.#
1. Métodos de evacuación y reutilización de fangos para plantas con caudales de aguas residuales menores a 3,800 m <sup>3</sup> / día.....	9
2. Aparatos y sistemas de reducción de caudales.....	12
3. Principales propiedades físicas del agua residual y sus principales constituyentes químicos y biológicos.....	13
4. Aplicaciones de las operaciones físicas unitarias en el tratamiento de aguas residuales.....	14
5. Parámetros propuestos por CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente) y AMSA (Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y Lago de Amatitlán).....	25
6. Descripción de pruebas a nivel laboratorio.....	30
7. Resultados de análisis fisicoquímicos de la prueba 1.....	33
8. Resultados de análisis fisicoquímicos de las pruebas 2,3,4,5 y 6.....	33
9. Resultados de análisis fisicoquímicos de las pruebas 7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17 y 18.....	34
10. Porcentajes de remociones de las pruebas 7,8 y 9 con respecto a la prueba 1.....	34
11. Porcentajes de remociones de las pruebas 10,11 y 12 con respecto a la prueba 1.....	35
12. Porcentajes de remociones de las pruebas 13 y 14 con respecto a la prueba 1.....	35
13. Porcentajes de remociones de la prueba 14 con respecto a la	

prueba 13.....	35
14. Porcentajes de remociones de la prueba 15 con respecto a la prueba 1.....	36
15. Porcentajes de remociones de las pruebas 16,17 y 18 con respecto a la prueba 1.....	36
16. Porcentajes de remociones de la prueba 17 con respecto a la prueba 16.....	36
17. Porcentajes de remociones de la prueba 18 con respecto a la prueba 17.....	37
18. Desglose de costos. ....	48

## RESUMEN

En el presente trabajo se diseña una planta de tratamiento de aguas residuales en una industria guatemalteca de aceites y grasas vegetales. Esta industria ya contaba con la operación de desbaste con trampas de grasa mediante separación por densidades, la cual es eficaz como pretratamiento.

Anterior al diseño, fue necesario un monitoreo para la cuantificación de los caudales del agua residual y la realización de pruebas a nivel de laboratorio, con una planta piloto que simulara el proceso de tratamiento. Con estas pruebas se determinó que las operaciones físicas unitarias de sedimentación y flotación por aire disuelto, son las más eficaces en este orden.

Al utilizar primero cal  $\text{Ca(OH)}_2$  y luego sulfato de aluminio  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  en relaciones aproximadas de 1:3 respectivamente, la sedimentación logra reducir la demanda química de oxígeno (DQO) un 67.54%, los sólidos sedimentables un 99.50%, los sólidos en suspensión un 7.89%, los sólidos disueltos un 2.68%, los aceites y grasas un 7.95%, y el pH entre 6.5 y 8.5. Para la flotación por aire disuelto, el sistema que mejor resultado dio, fue el de una bomba con una te de mezcla, y se logra reducir la DQO un 81.32%, los sólidos sedimentables un 99.75%, los sólidos en suspensión un 97.72%, los sólidos disueltos un 45.77%, los aceites y grasas un 98.21%, y el pH entre 6.5 y 8.5.

Según los análisis de laboratorio efectuados al agua tratada, con estas dos operaciones se logra satisfacer todos los parámetros propuestos por CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente) y AMSA (Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y Lago de Amatitlán) para la etapa I (3 años). Para las etapas II (6 años) y III (9 años) también se satisfacen todos los parámetros, a excepción de la DQO que se satisface en un 68.55% (etapa I) y en un 45.70% (etapa

II).

Para el tratamiento, se utilizaron tres tanques que la industria dejó de usar en cierto proceso, por lo que el diseño está basado en las dimensiones de estos tanques, tomando en cuenta el promedio del caudal del agua residual.

Se realizó un estudio económico en donde el costo de construcción y equipo de la planta de tratamiento diseñada, asciende a Q251,056.16, el de operación mensual a Q5,700.00, y el de mantenimiento mensual a Q13,750.39. El costo de plantas nuevas de igual capacidad, que se ofrecen en el mercado, se encuentra alrededor de Q 3,000,000.00 con costos de operación similares a la diseñada, por lo que con la planta diseñada, se tiene un ahorro de Q2,748,943.84, que representa el 91.63%.

## I. INTRODUCCION

A nivel internacional, la tendencia para armonizar los procesos productivos con el medio ambiente aumenta. El mercado que consume los productos, está cada vez más consciente de la responsabilidad ambiental y exige, en algunos casos, productos cuyo proceso sea consecuente con la protección del medio ambiente.

La industria de aceites y grasas vegetales genera, por lo general, desechos líquidos que contaminan en diferente magnitud los cuerpos de agua receptores (ríos, lagos), que eventualmente tendrían que ser utilizados aguas abajo, para otros usos (agua potable, riego, industria).

Proteger el medio ambiente podría significar desarrollar dentro de un proceso productivo, las acciones que tiendan a minimizar la contaminación del agua, aire y suelo. Una de las formas más eficaces de proteger el medio ambiente es la optimización del uso del agua. Reducir al mínimo, el volumen de desechos líquidos y contar con un tratamiento adecuado.

En este trabajo, se analiza la disposición de las aguas residuales provenientes de una industria refinadora de aceites vegetales, es decir; se parte desde el aceite crudo recorriendo los procesos de blanqueo, desodorización, hidrogenación, winterización, fraccionamiento e interesterificación; hasta llegar al envase y empaque del aceite vegetal, margarina vegetal y grasas vegetales especiales.

Este estudio pretende la evaluación de los distintos métodos de tratamiento, a modo de diseñar una planta de tratamiento de aguas residuales que se adapte a los requerimientos que la industria guatemalteca de aceites y grasas vegetales necesita, para llegar a cumplir con los parámetros propuestos por CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente) y AMSA (Autoridad para el Manejo

Sustentable de la Cuenca y Lago de Amatitlán). Además, se presenta un estudio económico para dar a conocer una estimación del costo de la inversión y compararlo con el costo de plantas nuevas de igual capacidad que se ofrecen en el mercado.

## II. ANTECEDENTES

### A. Importancia de la conservación del medio ambiente

El 22 de abril de 1990, se celebró el vigésimo "Día de la Tierra". Se estima que participaron 200 millones de personas en 141 países de los 7 continentes -la demostración mundial más grande de la historia-. Sus principales metas fueron llegar a las minorías y a los pobres que luchan diariamente por la sobrevivencia en todo el mundo. Hacer que la gente de todas partes esté consciente de la diferencia que sus acciones podrían tener en el sostenimiento y conservación de la Tierra, actuando localmente y pensando mundialmente (resumido ello en su lema: "Quién dice que usted no puede cambiar el mundo?"); y convencer a todos para que hagan de cada día el "Día de la Tierra". Si sólo 5% de quienes participaron en la Celebración Planetaria de 1990, permaneciera involucrado activamente en la carrera por conservar nuestra Tierra, tal número sería de 10 millones de personas: una fuerza enorme para el cambio.

Tratar los problemas ambientales y de recursos que afrontamos, no será fácil o poco costoso. Implicará mucha controversia y requiere que hagamos transacciones y cambios significativos en nuestra visión del mundo, los sistemas políticos y económicos, y los estilos de vida.

El énfasis se aplicará al paso de remediar la contaminación, a prevenirla; de la disposición de los desechos, a evitarlos y reducirlos; de la protección de las especies, a la del hábitat; y del uso creciente de recursos, a la conservación acelerada de ellos.

Es necesario usar los sistemas económicos y políticos existentes para recompensar las actividades económicas de la conservación de la Tierra y desalentar las que la dañen. Debemos reconocer que la codicia económica a corto

plazo, eventualmente conduce al perjuicio económico y ambiental a largo plazo.

Tendremos que permitir que sanen las partes del mundo que hemos dañado. Ayudar a restaurar las áreas severamente lesionadas, y proteger las áreas silvestres restantes contra cualquier forma de desarrollo destructivo. Los gobiernos tendrán que cooperar para tratar de resolver un cúmulo enorme de problemas ambientales y de recursos de tipo regional y mundial. (Miller, 1994).

## **B. Descripción breve del proceso de producción de aceites y grasas vegetales**

La producción mundial de aceites y grasas, es alrededor de 60 millones de toneladas al año. La mayoría (aproximadamente el 80%) se utiliza para consumo humano, y el resto se utiliza para alimento animal (aproximadamente el 6%) y en oleoquímica (aproximadamente el 14%). Esta última categoría tiende a crecer por el interés en utilizar recursos renovables en lugar de recursos petroquímicos no renovables.

La mayoría de los aceites y grasas son de origen vegetal (72%), y el resto corresponde a recursos animales y marinos. En los últimos años, la soya, la palma, el girasol, y la colza han mostrado ampliación en su producción. Pero actualmente, el aceite de palma posee el mayor aumento y se estima que será igual al de la soya (el líder actual) aproximadamente en veinte años. (Gunstone, 1987).

Los principales procesos en la industria de aceites y grasas vegetales son: extracción, refinación, blanqueo, desodorización, hidrogenación, winterización, fraccionamiento e interesterificación.

### **1. Extracción**

En la extracción, generalmente se utiliza un extractor mecánico, el cual es

un equipo usado para extraer el aceite de la semillas oleaginosas consistente de un tornillo que se mueve dentro de un barril ranurado a través del cual se drena el aceite. También se le llama prensa de tornillo sin fin. (Samperio)

La torta de semilla saliente de la prensa de tornillo sin, fin todavía contiene cierto porcentaje de aceite, por lo que es necesaria la extracción por solvente. Generalmente se utiliza hexano. En este punto, se tienen el aceite crudo de la semilla y la harina de la misma.

## **2. Refinación**

Los procesos de purificación o refinación, son necesarios para reducir al máximo posible aquellos contaminantes del aceite crudo que afectarán la calidad de los productos finales y la operación eficiente de los procesos de modificación por fraccionamiento, hidrogenación e interesterificación.

Existen dos métodos para la refinación: (1) la física, en donde los ácidos grasos libres son destilados; y (2) la química, en donde los ácidos grasos libres son neutralizados con un reactivo alcalino, de donde se forman jabones que son removidos del aceite por separación de fase. (Gunstone, 1987).

En los dos tipos de refinación mencionados anteriormente, existen dos procesos de mucha importancia: blanqueo y desodorización.

## **3. Blanqueo**

El blanqueo es un tratamiento que se da para eliminar pigmentos naturales (Carotenoides, clorofilas, xantofilas) y otras impurezas, como los cationes de hierro, cobre y zinc. Los cuerpos colorantes, son absorbidos mediante tierra de blanqueo natural o arcilla, que se agrega al aceite a altas temperaturas y al vacío. La tierra de blanqueo con los cuerpos colorantes absorbidos, pueden eliminarse durante la filtración. (Samperio).

#### **4. Desodorización**

Este proceso elimina del aceite los rastros de elementos relativamente volátiles que contribuyen al sabor, olor y color. Estos son en su mayoría quetonos, aldehídos, alcoholes y ácidos grasos libres.

La desodorización se lleva a cabo mediante la inyección de vapor al aceite calentado a una alta temperatura y bajo un alto vacío. Bajo estas condiciones, es posible separar los ácidos grasos libres y otros componentes volátiles. (Samperio).

#### **5. Hidrogenación**

La hidrogenación es un proceso que se utiliza para alterar las propiedades químicas y usualmente, las físicas de la grasa. En términos generales, la hidrogenación se usa para cambiar un aceite líquido a una grasa semisólida o sólida a temperatura ambiente y para aumentar la estabilidad oxidativa.

El proceso de hidrogenación, implica la adición de átomos de hidrógeno a los enlaces dobles de carbono que se encuentran en los ácidos grasos insaturados. Esto se lleva a cabo a temperaturas elevadas, dentro de un reactor presurizado de gas hidrógeno con el uso de un catalizador. El catalizador que comúnmente se usa es el níquel. Una vez cumplido su propósito, éste se remueve del aceite mediante la filtración al finalizar la reacción. (Samperio).

#### **6. Winterización**

El proceso de winterización remueve los sólidos de alta fusión (triglicéridos) de origen natural o los sólidos de alta fusión que se forman durante la hidrogenación parcial del aceite. Esto se lleva a cabo al mantenerlo a una temperatura reducida en tanto que ocurre la cristalización de las grasas sólidas. La porción sólida, se separa mediante filtración, y deja un aceite que tiene mayor resistencia a la cristalización o granulación a temperaturas bajas. (Samperio).

## **7. Fraccionamiento**

En este proceso, el aceite es previamente calentado hasta una temperatura por encima del punto de fusión del mismo, con el fin de destruir por completo los cristales presentes en la fase líquida. A continuación, el aceite es enfriado de forma progresiva, hasta alcanzar la temperatura de separación.

Durante el enfriamiento, se produce la nucleación y el crecimiento del cristal.

Después de alcanzado el equilibrio, los cristales y la fase aceite son separados por filtración.

En el fraccionamiento del aceite de palma, el objetivo principal es la obtención de oleínas fraccionadas de bajo punto de nube y buena estabilidad al frío.

Las estearinas fraccionadas encuentran un buen campo de aplicación en las grasas para freír, margarinas y shortenings. (Hendrix & Kellens, 1993).

## **8. Interesterificación**

El término interesterificación generalmente es usado para aquellas reacciones en donde una grasa u otra materia compuesta por ésteres de ácidos grasos, es reaccionada con ácidos grasos (acidólisis), alcoholes (alcoholisis) o con otros ésteres (transesterificación), con el intercambio de grupos de ácidos grasos para producir un nuevo éster.

Aplicado a aceites y grasas, el término interesterificación se refiere a la reacción entre diferentes triglicéridos con un rearrreglo de los grupos acyl con y entre los diferentes triglicéridos.

Interesterificación es normalmente usado para cambiar las propiedades físicas de las materias grasas. Es aplicado directamente en aceites o grasas derivados naturalmente, o en aceites hidrogenados o fraccionados. (Kellens, 1996).

## **C. Ingeniería de aguas residuales**

### **1. Ingeniería sanitaria**

Toda comunidad genera residuos tanto sólidos como líquidos. La fracción líquida de los mismos -aguas residuales- es esencialmente el agua que se desprende de la comunidad una vez que ha sido contaminada durante los diferentes usos para los cuales ha sido empleada.

Si se permite la acumulación y estancamiento del agua residual, la descomposición de la materia orgánica que contiene, puede conducir a la generación de grandes cantidades de gases malolientes, de numerosos microorganismos causantes de enfermedades, de nutrientes que pueden estimular el crecimiento de plantas acuáticas. Es por todo ello que la evacuación inmediata y sin molestias del agua residual de sus fuentes de generación, seguida de su tratamiento y eliminación, es no sólo deseable, sino también necesaria en toda sociedad industrializada.

La ingeniería sanitaria es la rama de la ingeniería ambiental que aplica los principios básicos de la ciencia y de la ingeniería a los problemas de control de las aguas contaminadas.

Se conoce como operaciones unitarias aquellos métodos de tratamiento en los que predominan los fenómenos físicos, mientras que aquellos métodos en los que la eliminación de los contaminantes se realiza en base a procesos químicos o biológicos, se conocen como procesos unitarios. Las operaciones y procesos unitarios, se agrupan entre sí para constituir los así llamados tratamientos primario, secundario y terciario (o tratamiento avanzado).

El tratamiento primario contempla el uso de operaciones físicas tales como la sedimentación y el desbaste para la eliminación de los sólidos sedimentables y flotantes presentes en el agua residual. En el tratamiento secundario son procesos

biológicos y químicos los que se emplean para eliminar la mayor parte de la materia orgánica. En el tratamiento terciario se emplean combinaciones adicionales de los procesos y operaciones unitarias, con el fin de eliminar otros componentes, tales como el nitrógeno y el fósforo.

Actualmente los métodos de evacuación y reutilización de fangos para plantas con caudales de aguas residuales menores a 3,800 m<sup>3</sup>/ día son:

Tabla 1

Método utilizado	Porcentaje (%)
Aplicación al terreno	39
Evacuación a vertederos controlados	31
Incineración	1
Distribución y comercialización	11
Vertidos al mar	1
Otros	17
Total	100

Como se puede comprobar a partir de estos datos, la práctica más empleada consiste en la aplicación al terreno o la evacuación a vertedero. La evacuación al terreno y a los vertederos está viéndose sometida a una legislación cada vez más estricta, amén del problema que existe para la localización de terrenos para la instalación de nuevos vertederos. Debido a las potenciales limitaciones de la solución a este problema, basado en la evacuación a los vertederos, las plantas de compostaje están ganando crédito como método para la

estabilización y distribución del fango para su posterior uso como abono o mejorador de suelos.

En algunos lugares, las plantas de tratamiento se han diseñado y ubicado de tal manera que parte del efluente tratado, pueda ser evacuado aplicándose al terreno y reutilizándose para diversos fines, como pueden ser el riego de campos de golf o como agua de refrigeración industrial. (Metcalf, 1996).

## **2. Caudales de aguas residuales**

La composición de los caudales de aguas residuales de una comunidad, depende del tipo de sistema de recogida que se emplee, y puede incluir los siguientes componentes:

- *Agua residual doméstica (o sanitaria)*. Procedente de zonas residenciales o instalaciones comerciales, públicas y similares.
- *Agua residual industrial*. Agua residual en la cual predominan vertidos industriales.
- *Infiltración y aportaciones incontroladas*. Agua que entra tanto de manera directa como indirecta en la red de alcantarillado. La infiltración hace referencia al agua que penetra en el sistema a través de juntas defectuosas, fracturas y grietas, o paredes porosas. Las aportaciones incontroladas, corresponden a las aguas pluviales que se descargan a la red por medio de alcantarillas pluviales, drenajes de cimentación, bajantes de edificios y tapas de pozos de registro.
- *Aguas pluviales*. Agua resultante de la escorrentía superficial.

Mediante el análisis de los datos de caudales de las aguas residuales deben obtenerse importantes parámetros, entre los cuales destacan:

- *Caudal medio diario*. Es el caudal medio en 24 horas obtenido a partir de los datos de todo el año. Los caudales medios, se emplean para la determinación de la capacidad de una planta de tratamiento y para obtener los caudales de

diseño. También se puede emplear para evaluar los costos de bombeo, inversión de productos químicos, volumen de fangos y carga orgánica.

- *Caudal máximo diario.* Máximo caudal en 24 horas obtenido a partir de los datos anuales de explotación. Es de especial interés en el proyecto de elementos que contemplen un cierto tiempo de retención, como puede ser el caso de tanques de homogeneización o de cloración.
- *Caudal máximo horario.* Es el caudal horario punta que se da en un período de 24 horas, obtenido a partir de los datos de explotación anuales. Es de interés para el diseño de colectores, estaciones de bombeo de aguas residuales, medidores de caudal de aguas residuales, desarenadores, tanques de sedimentación, tanques de cloración, y conducciones y canales de una planta de tratamiento.
- *Caudal mínimo diario.* El caudal mínimo registrado en 24 horas a partir de los datos de explotación. Conocerlo es importante, de cara al diseño de conducciones en las que se pueda producir sedimentación cuando circulan caudales pequeños.
- *Caudal mínimo horario.* El caudal horario permanente mínimo que se presenta en un período de 24 horas, obtenido a partir de datos anuales. Esta información es necesaria para determinar posibles efectos sobre algunos procesos y para el dimensionamiento de caudalímetros, especialmente de aquellos que controlan los sistemas de adición de reactivos.
- *Caudal permanente.* Es el caudal cuyo valor persiste o es excedido durante un número especificado de días consecutivos, obtenido a partir de datos anuales. Esta información, es útil para el dimensionamiento de tanques de regulación y otros elementos hidráulicos de la planta.

En el desarrollo de sistemas de gestión de aguas residuales, suele ser necesario determinar las características estadísticas de los caudales. El primer paso en la obtención de las características estadísticas de una serie de datos,

consiste en ver si los datos se ajustan a una distribución normal o si son datos sesgados. En la mayoría de los casos prácticos, la determinación del tipo de distribución se lleva a cabo representando los datos en diferentes papeles probalísticos y comprobando si pueden o no ser ajustados por una recta. Si se trata de una distribución normal, los parámetros que se emplean para caracterizar la serie de datos incluyen, entre otros, la media, la mediana, la moda, la desviación típica, el coeficiente de asimetría y el coeficiente de curtosis. Si se trata de una distribución sesgada, resultan relevantes tanto la media geométrica como la desviación típica.

Dada la importancia del ahorro tanto de recursos como de energía, los procesos que puedan llevar a la reducción tanto de los caudales de aguas residuales domésticas como de la carga contaminante de las mismas, está ganando interés. La reducción de los caudales de agua residual, depende directamente de la reducción en el consumo interior de agua. Los aparatos y sistemas de reducción de caudales, se presentan a continuación:

Tabla 2

Aparato/Dispositivo	Descripción y/o aplicación
Difusor de grifo	Incrementa el poder de aclarado del agua añadiendo aire y concentrando el caudal.
Ducha con limitador de caudal	Restringe y concentra el paso del agua por medio de orificios y limitan y desvían el flujo.
Retretes de caudal reducido	Reduce la cantidad de agua en cada descarga.
Válvula reductora de presión	Mantiene una presión deseada del agua.

Kits de reducción de consumo para cuartos de baño.	Consisten en sistema de restricción del agua en las duchas, retretes con sistemas de retención y tabletas para la detección de pérdidas en las cisternas de los retretes.
Retretes con sistemas de retención	Una división en la cisterna que reduce el volumen de agua en cada descarga.
Detector de fugas en los retretes.	Pastillas que se disuelven en la cisterna y colorean el agua, que se emplean como trazadores.
Lavajillas de consumo eficiente.	Reducen la cantidad de agua empleada.
Lavadora de consumo eficiente.	Reducen la cantidad de agua empleada.

(Metcalf & Eddy, 1996).

### 3. Características de las aguas residuales

Las aguas residuales se caracterizan por su composición física, química y biológica. A continuación, se muestran las principales propiedades físicas del agua residual, así como sus principales constituyentes químicos y biológicos.

Tabla 3

<b>Propiedades físicas</b>	Color, Olor, Sólidos, Temperatura
<b>Constituyentes químicos orgánicos</b>	Carbohidratos, Aceites, Grasas, Pesticidas, Fenoles, Proteínas, Contaminantes prioritarios, Agentes tensoactivos, Compuestos orgánicos volátiles
<b>Constituyentes químicos inorgánicos</b>	Alcalinidad, Cloruros, Metales pesados, Nitrógeno, pH, Fósforo, Contaminantes prioritarios, Azufre
<b>Constituyentes químicos gaseosos</b>	Sulfuro de hidrógeno, Metano, Oxígeno
<b>Constituyentes biológicos</b>	Animales, Plantas, Virus, Protistas:(Eubacterias,Arqueobacterias)

(Metcalf & Eddy, 1996).

#### **4. Operaciones físicas unitarias**

Las operaciones llevadas a cabo en el tratamiento de las aguas residuales, en las que los cambios de las características y propiedades del agua se realizan mediante la aplicación de las fuerzas físicas, se conocen como operaciones físicas unitarias. Dado que el origen de estas operaciones se halla en la observación directa de fenómenos que se daban en la naturaleza, constituyen los primeros métodos de tratamiento empleados por el hombre.

Las operaciones físicas unitarias más comúnmente empleadas en el tratamiento del agua residual incluyen, entre otros: (1) medición de caudales; (2) desbaste; (3) homogeneización de caudales; (4) mezclado; (5) floculación; (6) sedimentación; (7) flotación; y (8) filtración.

Las aplicaciones de las operaciones físicas unitarias en el tratamiento de aguas residuales son:

Tabla 4

<b>Operación</b>	<b>Aplicación</b>
Medición de caudal	Control y seguimiento de procesos, informes de descargas.
Desbaste	Eliminación de sólidos gruesos y sedimentables por intercepción (retención en superficie)
Homogeneización de caudales	Homogeneización del caudal y de las cargas de DBO y de sólidos en suspensión
Mezclado	Mezclado de productos químicos y gases con el agua

	residual, mantenimiento de los sólidos en suspensión
Floculación	Provoca el agregado de pequeñas partículas, aumentando el tamaño de las mismas, para mejorar su eliminación por sedimentación por gravedad.
Sedimentación	Eliminación de sólidos sedimentables y espesado de fangos.
Flotación	Eliminación de sólidos en suspensión, finamente divididos y de partículas con densidades cercanas a la del agua. También espesa los fangos biológicos.
Filtración	Eliminación de sólidos en suspensión, residuales presentes después del tratamiento químico o biológico.

(Metcalf & Eddy, 1996)

#### D. Tratamiento de aguas residuales en la industria de aceites y grasas vegetales

Las operaciones y los procesos más utilizados para la remoción de aceites y grasas son: (1) separación por gravedad, (2) flotación por aire disuelto, (3) sedimentación por cuagulación-floculación, (4) filtración, (5) procesos con membrana, (6) procesos biológicos, (7) adsorción con carbón activado, y (8) tratamiento de lodos.

##### 1. Separación por gravedad

Los equipos de separación de aceite por gravedad, son simples tanques con rascadores, los cuales son eficientes en remover grandes cantidades de aceite

libre y algunos aceites emulsificados de aguas residuales. Sin embargo, fracciones de aceite soluble y la mayoría de las emulsiones, no son removidos por este tipo de separación.

Existen tres tipos comunes de separadores por gravedad: el tipo API, el interceptor de platos corrugados (CPI), y el interceptor de platos paralelos (PPI).

El separador API es un tanque rectangular o circular en donde el agua residual fluye horizontalmente, mientras las partículas de aceite libre suben debido a fuerzas de flotación. Teóricamente las gotas de aceite suben linealmente como lo predice la ley de Stokes.

Ley de Stokes: una pequeña esfera, que cae por la sola acción de la gravedad en un medio viscoso, alcanza una velocidad constante representada por la siguiente fórmula:

$$v = \frac{g r^2 (d_1 - d_2)}{9 \eta}$$

de donde, v: velocidad; g: aceleración del peso; r: radio de la esfera; d1: densidad de la esfera; d2: densidad del medio; η: coeficiente de viscosidad del medio.

El CPI consiste en paquetes de 12 a 48 platos corrugados. Mientras el agua residual fluye entre las placas, los glóbulos de aceite más livianos flotan hacia la parte superior del corrugado en donde se incorporan en grandes gotas que se mueven hacia arriba de las placas y hacia una capa flotante que es constantemente rascada desde la superficie del tanque. Las placas establecen condiciones de flujo laminar del líquido, a través del conjunto de placas, para reducir la distancia en que la gota de aceite debe subir para ser recolectada.

El PPI no es utilizado extensamente. (Ford & Elton, 1977).

## 2. Flotación por aire disuelto

En el tratamiento del agua, se reserva el término de flotación a los procesos en los que se utilizan burbujas de aire muy finas o "microburbujas", de 40 a 70

micras de diámetro, similares a las que se encuentran en el "agua blanca" que sale por el grifo de una tubería de agua a gran presión.

La separación, por flotación, de las partículas sólidas en suspensión en un líquido, sigue las mismas leyes que la sedimentación, pero en un campo de fuerza "invertido". Se tiene, en primer lugar, la flotación simple regida por la ley de Stokes. Después, en el caso de partículas floculadas o de suspensiones muy cargadas, se encuentran fases de flotación difusa y de flotación a través de un lecho de fango. Es preciso ver, sin embargo, cómo se produce esto y en qué medida puede considerarse uniforme.

La uniformidad y la continuidad, están ligadas al diámetro de las burbujas emitidas en la masa líquida.

La variación de la velocidad ascensorial de burbujas de aire, está en función de su diámetro. Las burbujas de 20 micras tienen una velocidad ascensorial de algunos milímetros por segundo, mientras que burbujas de unos milímetros de diámetro, tienen velocidades 10 a 30 veces superiores. Si, dentro de un depósito, se introduce en un punto una emulsión, estando previa la evacuación en el otro extremo, la duración de la inmersión de las burbujas de aire en el agua, y por consiguiente, la zona llena de burbujas de aire, serán tanto mayores cuanto menor sea la velocidad ascensorial de las burbujas, es decir, cuanto menor sea su diámetro.

Para un flotador de sección dada, el empleo de burbujas de algunos milímetros de diámetro exigirá un caudal de aire mucho mayor que en el caso de microburbujas, si se desea una buena repartición de las burbujas en toda la sección.

Paralelamente, este aumento de caudal de aire, engendra corrientes turbulentas, que dificultan una buena separación y crean una especie de agitación mecánica.

Las burbujas sólo producen un efecto de flotación en la medida en que se fijan a las partículas. Esto supone generalmente, que su diámetro sea inferior al de las materias o flóculos en suspensión.

Un proceso de flotación sin el empleo de microburbujas, sólo podrá utilizarse en el caso de suspensiones que contengan materias voluminosas y ligeras, cuya recogida de superficie no esté entorpecida por movimientos de torbellino.

La técnica más extendida de producción de microburbujas es la de presurización. Las burbujas se obtienen por expansión de una solución enriquecida de aire disuelto a una presión de varias atmósferas. Como líquido presurizado, se utiliza el agua bruta, o agua tratada recirculada. El caudal de agua presurizada es sólo una fracción del caudal nominal de la instalación; para presiones de 3 a 8 atmósferas. Esta fracción, equivale del 10 al 30% del caudal a tratar, y se obtiene como valor medio la disolución de un exceso de aire del 60% aproximadamente, con relación al nivel de saturación a la presión considerada. El consumo de aire comprimido, varía entre 15 y 50 litros normales de aire por m<sup>3</sup> de agua tratada.

Cuando se eleva la cantidad de materias sometidas a flotación, y se tiene ante todo un proceso de espesamiento (caso de los fangos activados) el caudal recirculado puede representar hasta un 200% del caudal nominal del aparato. Se llega así mediante la utilización de un polielectrólito, a obtener concentraciones de fangos que pueden alcanzar un 3 a 6% para cargas específicas de 5 a 13 kg. de materia seca por m<sup>2</sup> y por hora y una velocidad descendencial del orden de 2 m/h.

Los flotadores pueden ser circulares o rectangulares, reservándose generalmente esta última forma, al tratamiento de aguas de abastecimiento público, ya que con ella se consigue realizar conjuntos compactos, que agrupan el floculador, el flotador y los filtros, dentro de un espacio reducido.

Cuando se plantea un problema de flotación, es extraordinariamente interesante efectuar ensayos previos, a escala de laboratorio o a escala semi-industrial. Seguidamente puede pasarse a la fase de dimensionamiento, que está condicionada por dos parámetros fundamentales: La velocidad descensional y la cantidad de materia separable por flotación, por unidad de superficie y de tiempo.

Una velocidad reducida de descenso, disminuyendo el arrastre hacia abajo de las partículas, conduce teóricamente a un mejor rendimiento de separación, pero igualmente trae como consecuencia un incremento del tiempo de permanencia en el aparato de los fangos flotados, que de esta forma, podrían desairearse y disgregarse, en perjuicio de su concentración. Por ello, corresponderá al especialista decidir, en cada caso, sobre la conveniencia entre un mayor espesamiento de los fangos o un mejor rendimiento de separación.

La forma interior tiene, igualmente, gran influencia en los resultados de un flotador.

El reparto de las burbujas de aire es mejor en los aparatos de forma circular que en los de forma rectangular. La distancia entre la columna de llegada y la chimenea de salida, es menor a la igualdad de capacidad, y puede mantenerse un reparto casi uniforme de las burbujas en toda la sección horizontal del aparato.

La alimentación está constituida siempre por una columna o una cámara que tiene por objeto:

- La puesta en contacto del agua a tratar (floculada o no) con el agua presurizada. La expansión del agua presurizada debe efectuarse preferentemente, a la entrada inmediata del aparato;
- La disposición de la energía cinética de la mezcla agua de bruta-agua presurizada y reducción de las velocidades antes de su introducción en la zona de flotación propiamente dicha.

En esta cámara se eliminan además, las burbujas gruesas que hayan

podido formarse en la entrada.

En el caso de una floculación previa, tienen una gran importancia los puntos y niveles relativos de introducción del agua bruta y del agua presurizada.

Las precauciones que deben tomarse para la tranquilización de la mezcla, al introducirla a la zona de flotación, varían según el grosor, la estabilidad y la densidad de las materias que deben flotar, floculadas o no. En el caso de una flotación de agua potable o de aceite muy poco viscoso, debe cuidarse este punto de forma especial.

El agua emulsionada se introduce, generalmente, en la mitad superior del aparato. La recogida de fangos se efectúa en la superficie libre y la salida del líquido claro se dispone en el tercio inferior del aparato.

La toma del líquido claro, deberá situarse tanto más alejada del fondo cuanto más altura tenga el aparato y cuanto mayor sea la cantidad de fangos que puedan depositarse. Se efectúa generalmente, en una cámara periférica limitada por un tabique en forma de sifón. En algunos casos, se emplean colectores ramificados sumergidos.

La altura del aparato, comprendida generalmente entre 2 y 4 m, podrá ser tanto menor cuanto más uniforme sea el aparato del agua y de las microburbujas.

La figura 1 de los anexos, indica los principales dispositivos empleados para la compresión y la saturación de aire del agua presurizada (que generalmente es agua recirculada).

En algunos, se prevé la introducción de aire en la entrada de la bomba de compresión. Los sistemas con balón de saturación de colchón de aire son más costosos, pero su funcionamiento es más estable. Se proponen también dispositivos con dispersión de aire a presión, en la tubería de impulsión de la bomba.

La capa de fangos en la superficie puede alcanzar, en algunos casos, varias

decenas de centímetros y puede ser extremadamente estable (espesamiento de fangos activados). En otros casos, es más fina y frágil (flotación de flóculos de hidróxidos metálicos o de aceites). Cuando la eliminación de los fangos no es total, la capa se espesa con el tiempo y presenta una cohesión que puede facilitar la adherencia de las partículas que acaban de flotar.

Es por consiguiente, muy importante, la eliminación progresiva y regular de los fangos, por lo que en un flotador destinado a espesamiento, el dispositivo de barrido de fangos debe ser de gran potencia.

En los flotadores circulares, los fangos son empujados, por una o varias rasquetas, hacia un canal radial de longitud igual a la mitad del radio, y cuya rampa de acceso debe realizarse de forma que se asegure su contacto con la lámina rascadora.

El número de rasquetas está condicionado por la cantidad de fango que ha de evacuarse, por la rapidez con que deba hacerse esta evacuación, con el fin de evitar todo riesgo de desaireación, y por la distancia a la que puede empujarse este fango sin que se disgregue.

En los flotadores rectangulares, el fango es empujado por una serie de rascadores arrastrados por cadenas sin fin, hacia un canal de evacuación dispuesto en uno de los extremos. (Degrémont, 1979).

### 3. Sedimentación por coagulación-floculación

Este proceso incluye la adición de coagulantes químicos, para producir microfloculos por coagulación, y la floculación de estas pequeñas partículas, que son removidas por sedimentación. (Ford & Elton, 1977).

Los químicos más utilizados para la coagulación son:

*Sales de aluminio*

- Sulfato de aluminio.

- Cloruro de aluminio.
- Sulfato de aluminio + cal.
- Sulfato de aluminio + soda cáustica.
- Sulfato de aluminio + carbonato sódico.
- Aluminato sódico.
- Polímeros de aluminio.

#### *Sales de hierro*

- Cloruro férrico.
- Cloruro férrico + cal.
- Sulfato férrico.
- Sulfato férrico + cal.
- Sulfato ferroso.
- Sulfato ferroso + cloro.
- Sulfato ferroso + cal.
- Cloruro férrico + aluminato sódico.

Los químicos más utilizados para la floculación son:

- Sílice activada.
- Algunas arcillas.
- Blanco de Meudon o carbonato cálcico precipitado.
- Carbón activo en polvo.
- Arena fina, Kieselguhr (diatomeas). (Degrémont, 1979).

#### **4. Filtración**

En filtración terciaria de aguas residuales, se distinguen dos tipos de filtración:

- La filtración clásica, en la que la eliminación de la contaminación sólo se pretende por vía físico-química.

- La filtración biológica, en la que se superpone a la eliminación por vía físico-química, una eliminación por vía biológica, para conseguir una reducción complementaria de la DBO soluble.

Ambos tipos de filtración son aplicables después de un tratamiento biológico o de un tratamiento fisicoquímico. (Degrémont, 1979).

### 5. Procesos con membrana

Procesos con membrana, como la ultrafiltración o la ósmosis inversa, han sido propuestos como procesos para remoción de aceites, y pruebas en laboratorio han indicado buenos resultados para la remoción de los aceites. Sin embargo, la vida útil de la membrana, limita su aplicación práctica. (Ford & Elton, 1977).

### 6. Procesos biológicos

Los procesos de tratamiento biológico tienen limitantes en la aplicación de remoción de aceite. Los organismos biológicos, son eficientes en oxidar compuestos orgánicos solubles, incluyendo algunos aceites dispersos o emulsificados. Grandes cantidades de aceite libre, en un exceso de aproximadamente 0.10 lb/lb MLVSS (mixed-liquor volatile suspended solids), debe evitarse, debido a que tapa el floculo biológico, e impide la transferencia de oxígeno hacia la biomasa, y reduce la estabilidad del lodo. Por lo tanto, mientras se requiera del tratamiento biológico, se necesitará un pretratamiento adecuado capaz de remover el aceite hasta aquellos niveles de concentración en donde el proceso biológico podrá ser efectivo. (Ford & Elton, 1977).

### 7. Adsorción con carbón activado

Esta aplicación, ha sido muy limitada para la remoción de aceites. El pretratamiento debe llevarse hasta un alto grado, para prever que los poros del

carbón activado se tapen, ya que se tendría que lavar con frecuencia, o reponerlo en su totalidad. (Ford & Elton, 1977).

## **8. Tratamiento de lodos**

Entre los principales sistemas mecánicos para el tratamiento de lodos se encuentran los centrifugos, los filtros de vacío, los filtros prensa, y otros.

La centrifugación, separa el agua de los lodos por medio de la fuerza centrífuga. Los dos principales tipos de centrifugas utilizados para el tratamiento de lodos son: tipo transportador y tazón sólido, y tipo canasta. La operación del primero, consiste en una unidad rotativa de compresión, por medio del tazón y transportador, los cuales son diseñados para rotar a velocidades ligeramente variadas. En la centrifuga de canasta, la alimentación y la descarga son semicontinua y los sólidos son depositados en las paredes de la canasta.

Los filtros de vacío básicamente consisten en un tambor cilíndrico que rota parcialmente sumergido (15 a 35%) en un recipiente de lodos. Se aplica vacío entre la superficie del tambor y el medio filtrante causando la filtración del agua y la retención de la torta de sólidos, la cual es removida por una cuchilla rascadora.

Los filtros prensa, consisten en una serie de marcos y placas, montados en dos vigas metálicas paralelas que van unidas a dos soportes de cabeza. Las placas y marcos, son presurizadas por medio de un tornillo sin fin o por medio de un pistón hidráulico. Las placas son cubiertas con lonas filtrantes que retienen los lodos en las cámaras de los marcos. El ciclo de presurización, varía de 1.5 a 4 h, dependiendo de la concentración de sólidos que se desee. La presión de operación de la prensa varía de 100 a 200 psig.

Entre otros se encuentran los filtros prensa de banda y los filtros prensa de membrana (o de diafragma). En el primero, los lodos pasan a través de dos bandas, las cuales son presurizadas por medio de varios rodillos. Los filtros prensa

de membrana utilizan el mismo concepto de los filtros prensa de marcos y placas, a excepción de que utilizan presión de agua o aire dentro de las membranas, para una mayor concentración de los sólidos. (WPCF/ASCE, 1991)

**E. Parámetros propuestos por CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente) y AMSA (Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y Lago de Amatitlán).**

Se presentan los límites máximos permisibles de los parámetros para las etapas I, II y III; a 3, 6 y 9 años respectivamente:

Tabla 5

Parámetro	Etapas 1	Etapas 2	Etapas 3
Sólidos sedimentables, mL/L	1.0	0.5	0.3
Sólidos en suspensión, mg/L	60	30	20
Sólidos totales, %	1.0	1.0	<1.0
DBO5, mg/L	100	80	20
DQO, mg/L	200	120	80
Fósforo total, mg/L	-	3	2
Nitrógeno total, mg/L	-	15	10
pH	6-9	6.5-8.5	6.5-8.5
Materia flotante	ausente	ausente	ausente
Coliformes totales, UFC/ 100mL	E5 NMP	E4 NMP	E3 NMP
Coliformes fecales, UFC/ 100mL	E5 NMP	E4 NMP	E3 NMP
Oxígeno disuelto, mg/L (mínimo)	4.0	7.0	7.0
Temperatura, oC	25-30	25-30	25-30

Sulfitos, mg/L	2.0	1.0	0.5
Aceites y grasas, mg/L	50	20	10
Cloro residual, mg/L	2.0	1.0	0.5
Peróxido	ausente	ausente	ausente
Cromo VI, mg/L	-	0.5	0.1
Sustancias activas al azul de metileno (detergentes y/o dispersantes), mg/L	4.0	3.0	2.0

### III. OBJETIVOS

#### General

- Proponer una solución práctica y económica para el problema del tratamiento de aguas residuales en la industria de aceites y grasas vegetales.

#### Específicos

- Describir el proceso necesario para el tratamiento del agua que desecha la industria de aceites y grasas vegetales.
- Diseñar una planta de tratamiento de aguas residuales, para la industria de aceites y grasas vegetales.
- Realizar una evaluación económica que indique la magnitud del costo de inversión de la planta de tratamiento diseñada y compararla contra el costo de plantas de la misma capacidad que se ofrecen en el mercado.
- Cumplir con los parámetros propuestos por CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente) y AMSA (Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y Lago de Amatitlán) para la conservación del medio ambiente.
- Satisfacer la necesidad de incrementar el número de plantas de tratamiento de aguas residuales en Guatemala.

## IV. ENSAYOS PILOTO

### A. Material y equipo

Previo al diseño del equipo, se efectuaron pruebas experimentales en el taller de mantenimiento y en el laboratorio.

En el taller de mantenimiento, se probaron los distintos sistemas para la formación de diminutas burbujas de aire en el agua, para determinar cuál es el idóneo en el tanque de flotación. Se probó con difusores de cerámica y de hule. También se probó la presurización del agua por medio de las siguientes bombas:

- Tipo: centrífuga; gpm: 100; rpm: 3,400; hp: 10; tdh: 50'; diámetro succión: 2"; diámetro descarga: 2"
- Tipo: centrífuga; gpm: 200; rpm: 1,725; hp: 20; tdh: 80'; diámetro succión: 4"; diámetro descarga: 3"
- Tipo: diafragma; gpm: 100; tdh: 80'; diámetro succión: 2"; diámetro descarga: 2"
- Tipo: turbina; gpm: 80; rpm: 3,400; hp: 10; tdh: 100'; diámetro succión: 2"; diámetro descarga: 2"
- Tipo: centrífuga; gpm: 300; rpm: 3,400; hp: 30; tdh: 150'; diámetro succión: 4"; diámetro descarga: 3"

Las pruebas de laboratorio, se realizaron con el objeto de encontrar los aditivos químicos idóneos y sus respectivas dosificaciones.

Se construyó una planta piloto, la cual consiste en un tanque de plástico transparente, para observar los efectos de la sedimentación y flotación.

Las dimensiones del tanque piloto son las siguientes:

Capacidad: 14.6 L

Diámetro: 25.5 cm

Altura: 34.5 cm

Se colocaron tomas de muestra a un cuarto del fondo y a la mitad del tanque piloto con válvulas de bola de  $\frac{1}{4}$  " de diámetro.

Las pruebas en este tanque, consisten en la mezcla del agua residual con los aditivos químicos (sedimentación) y con el "agua blanca" (flotación), la cual contiene diminutas burbujas de aire que ayudan a flotar las partículas contaminantes del agua residual. El método que se utilizó para la obtención del "agua blanca" se describe en la sección V.A.6.

El primer paso, es la introducción del agua residual al tanque, para ser mezclada con cal  $\text{Ca(OH)}_2$  y luego con sulfato de aluminio  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ . Es necesaria la agitación para que las moléculas de los aditivos químicos estén en contacto con las moléculas del agua residual, pero ésta no debe ser brusca ya que se rompería el efecto de coagulación-floculación.

Al momento de agregar la cal, el pH del agua residual sube. Degremont recomienda una dosificación de 100 a 200 g/  $\text{m}^3$ . En este punto se agrega el sulfato de aluminio con un control constante de pH para bajarlo lo más cercanamente posible a 7.

Teniendo neutra el agua residual, se deja en reposo, para ver el efecto de sedimentación y cuantificar la velocidad de descenso de las partículas contaminantes.

Terminado el tiempo de sedimentación, se abre la válvula de muestreo colocada a un cuarto del fondo del tanque. En el fondo del tanque piloto, quedará un cuarto del volumen con los lodos. Esta agua y los lodos, deben ser removidos para luego depositar nuevamente el agua extraída en el tanque piloto.

Esta agua se agrega al tanque piloto, según el porcentaje a utilizar. Luego se le agrega el "agua blanca", mediante una manguera flexible de  $\frac{1}{4}$  " de diámetro, de modo que entre en espiral. Es decir, el "agua blanca" debe chocar suavemente con la pared del tanque de modo que suba con flujo laminar. Si el "agua blanca"

llegara a chocar bruscamente contra una superficie, o si existiera flujo turbulento, las diminutas burbujas de aire del "agua blanca" desaparecerían.

Al momento de llegar al nivel alto del tanque piloto, se cierra la válvula del "agua blanca" y se abre la válvula de muestreo, colocada a la mitad del tanque piloto para sacar la muestra en un recipiente de vidrio.

Luego, esta agua se filtra con papel filtro bajo vacío.

El tanque piloto se puede observar en la figura 2 de los anexos.

Las pruebas que se realizaron en el laboratorio son:

Tabla 6

<p><b>Prueba 1:</b> en esta prueba únicamente se tomó una muestra del agua residual para poder conocer los parámetros de diseño y las mejoras a obtener.</p>
<p><b>Prueba 2:</b> se dosificó 2.92 g de cal en 14,600 mL de agua residual (200 g/m<sup>3</sup>). Se neutralizó con 9.93 g de sulfato de aluminio en agitación constante y se dejó en reposo.</p>
<p><b>Prueba 3:</b> se dosificó 2.56 g de cal en 14,600 mL de agua residual (175 g/m<sup>3</sup>). Se neutralizó con 8.19 g de sulfato de aluminio en agitación constante y se dejó en reposo.</p>
<p><b>Prueba 4:</b> se dosificó 2.19 g de cal en 14,600 mL de agua residual (150 g/m<sup>3</sup>). Se neutralizó con 6.57 g de sulfato de aluminio en agitación constante y se dejó en reposo.</p>
<p><b>Prueba 5:</b> se dosificó 1.83 g de cal en 14,600 mL de agua residual (125 g/m<sup>3</sup>). Se neutralizó con 5.13 g de sulfato de aluminio en agitación constante y se dejó en reposo.</p>
<p><b>Prueba 6:</b> se dosificó 1.46 g de cal en 14,600 mL de agua residual (100 g/m<sup>3</sup>). Se neutralizó con 3.80 g de sulfato de aluminio en agitación constante y se dejó en</p>

reposo.

**Prueba 7:** se mezcló agua residual, sin químicos, con el "agua blanca" en proporciones de 75% y 25% respectivamente.

**Prueba 8:** se mezcló agua residual, sin químicos, con el "agua blanca" en proporciones de 50%.

**Prueba 9:** se mezcló agua residual, sin químicos, con el "agua blanca" en proporciones de 25% y 75% respectivamente.

**Prueba 10:** se mezcló agua residual, previamente mezclada con 1.46 g de cal en 14,600 mL ( $100 \text{ g/m}^3$ ), con el "agua blanca" en proporciones de 50%.

**Prueba 11:** se mezcló agua residual, previamente mezclada con 2.92 g de cal en 14,600 mL ( $200 \text{ g/m}^3$ ), con el "agua blanca" en proporciones de 50%.

**Prueba 12:** se mezcló agua residual, previamente mezclada con 4.38 g de cal en 14,600 mL ( $300 \text{ g/m}^3$ ), con el "agua blanca" en proporciones de 50%.

**Prueba 13:** se mezcló agua residual, previamente mezclada con 1.83 g de cal en 14,600 mL y neutralizada con 280 mL de ácido sulfúrico  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , con el "agua blanca" en proporciones de 50%.

**Prueba 14:** se mezcló agua residual, previamente mezclada con 1.83 g de cal en 14,600 mL y neutralizada con 280 mL de ácido sulfúrico  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , con el "agua blanca" en proporciones de 50% y se filtró con papel filtro bajo vacío.

**Prueba 15:** se mezcló agua residual, previamente mezclada con 2.92 g de sulfato de aluminio en 14,600 mL, con el agua blanca en proporciones de 50%.

**Prueba 16:** se dosificó 1.83 g de cal en 14,600 mL de agua residual, se neutralizó con 5.27 g de sulfato de aluminio, se dejó en reposo, y se extrajeron  $\frac{3}{4}$  del volumen por la válvula de muestreo colocada a  $\frac{1}{4}$  del fondo del tanque piloto.

**Prueba 17:** el agua obtenida en la prueba 16, se colocó nuevamente en el tanque piloto (previamente drenado), se mezcló con el "agua blanca" en proporciones de

50%, y se extrajo la muestra de la válvula colocada a la mitad del tanque piloto.

**Prueba 18:** el agua obtenida en la prueba 17 se filtró con papel filtro bajo vacío.

## **B. Resultados**

En las pruebas efectuadas en el taller de mantenimiento, se notó que los difusores de cerámica son los que mejor resultado dan para la formación de las diminutas burbujas de aire en el agua, pero tiene el inconveniente de que forma turbulencia, provocando una agitación que no es deseada para efectos de flotación.

De las bombas que se probaron para la presurización del agua, la que dio buenos resultados fue la siguiente:

- Tipo: centrífuga; gpm: 300; rpm: 3,400; hp: 30; tdh: 150'; diámetro succión: 4"; diámetro descarga: 3"

El resto de bombas, no presentaron buenos resultados en la formación del "agua blanca". Para comprobar si la bomba forma el "agua blanca", se extrae una muestra de la tubería (ver sección V.A.6.).

Los análisis de laboratorio que se efectuaron son los siguientes:

- Demanda química de oxígeno (DQO).
- Sólidos sedimentables.
- Sólidos en suspensión.
- Sólidos disueltos.
- Aceites y grasas
- pH.

También es muy importante el análisis de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), pero ésta no se obtuvo debido a la falta del equipo para este análisis en la industria aceitera donde se realizó el estudio.

Los resultados de análisis fisicoquímicos de la prueba 1 son:

Tabla 7

# Prueba	DQO (mg/L)	Sólidos sediment (mL/L)	Sólidos en suspensión (mg/L)	Sólidos disueltos (mg/L)	Aceites y grasas (mg/L)	pH
1	937.26	40	1.14	710	19	9.56

Los resultados de análisis fisicoquímicos de las pruebas 2,3,4,5 y 6 son:

Tabla 8

# Prueba	pH con cal	pH neutro	Sedimentación visible
2	10.40	7.04	positivo
3	10.36	7.06	positivo
4	10.31	7.07	positivo
5	10.24	7.03	positivo
6	10.19	7.09	negativo

En la prueba 5 se dividió la altura del tanque piloto en secciones de 5 cm y se tomó el tiempo en que los sedimentos recorrían estas secciones. El promedio de las velocidades de sedimentación fue de 1.7 cm/min. Con la velocidad de sedimentación, se obtuvo un tiempo de sedimentación para el tanque piloto de 20.29 min. En este lapso de tiempo, se obtiene un porcentaje de lodo sedimentado de 20%. Este porcentaje de lodos fue filtrado bajo una presión de 9 psig con una membrana de nylon de 0.45  $\mu$ m x 47 mm y se redujo el porcentaje de lodos a 3.87% con 86.82% de humedad. Los lodos filtrados fueron deshidratados con calor y se redujo el porcentaje de lodos a 0.51% con 0% de humedad. También se hicieron pruebas de agitación con un agitador de hélice y uno de paleta. El agitador

de hélice rompe los flóculos formados, por lo que el que mejor resultados dio fue el de paleta a 10 rpm.

Los resultados de análisis fisicoquímicos de las pruebas 7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17 y 18 son:

Tabla 9

# Prueba	DQO (mg/L)	Sólidos sediment (mL/L)	Sólidos en suspensión (mg/L)	Sólidos disueltos (mg/L)	Aceites y grasas (mg/L)	pH
7	894.99	5	0.075	510	1.16	9.20
8	880.99	2	0.036	428	0.51	9.15
9	866.12	2	0.035	302	0.49	8.70
10	267.78	3	0.025	327	0.32	10.21
11	303.02	5	0.035	355	0.49	10.36
12	310.05	10	0.044	388	0.64	10.50
13	874.69	1	0.027	682	0.36	6.98
14	861.81	0.5	0.023	527	0.29	7.08
15	764.36	1	0.064	678	0.98	9.78
16	304.26	0.2	1.05	691	17.49	7.07
17	175.05	0.1	0.026	385	0.34	7.15
18	145.88	0.05	0.021	359	0.26	7.12

Los porcentajes de remociones de las pruebas 7,8 y 9 con respecto a la prueba 1 son:

Tabla 10

# Prueba	DQO	Sólidos sediment	Sólidos en suspensión	Sólidos disueltos	Aceites y grasas
----------	-----	------------------	-----------------------	-------------------	------------------

7	4.51%	87.50%	93.42%	28.17%	93.89%
8	6.00%	95.00%	96.84%	39.72%	97.32%
9	7.59%	95.00%	96.93%	57.47%	97.42%

Los porcentajes de remociones de las pruebas 10,11 y 12 con respecto a la prueba 1 son:

Tabla 11

# Prueba	DQO	Sólidos sediment	Sólidos en suspensión	Sólidos disueltos	Aceites y grasas
10	71.43%	92.50%	97.81%	53.94%	98.32%
11	67.67%	87.50%	96.93%	50.00%	97.42%
12	66.92%	75.00%	96.14%	45.35%	96.63%

Los porcentajes de remociones de las pruebas 13 y 14 con respecto a la prueba 1 son:

Tabla 12

# Prueba	DQO	Sólidos sediment	Sólidos en suspensión	Sólidos disueltos	Aceites y grasas	pH
13	6.68%	97.50%	97.63%	3.94%	98.11%	6.91
14	8.05%	98.75%	97.98%	25.77%	98.47%	7.08

Los porcentajes de remociones de la prueba 14 con respecto a la prueba 13 son:

Tabla 13

# Prueba	DQO	Sólidos sediment	Sólidos en suspensión	Sólidos disueltos	Aceites y grasas	pH
14	1.47%	50.00%	14.82%	22.73%	19.44%	7.08

Los porcentajes de remociones de la prueba 15 con respecto a la prueba 1 son:

Tabla 14

# Prueba	DQO	Sólidos sediment	Sólidos en suspensión	Sólidos disueltos	Aceites y grasas
15	18.45%	97.50%	94.39%	4.51%	94.84%

Los porcentajes de remociones de las pruebas 16, 17 y 18 con respecto a la prueba 1 son:

Tabla 15

# Prueba	DQO	Sólidos sediment	Sólidos en suspensión	Sólidos disueltos	Aceites y grasas
16	67.54%	99.50%	7.89%	2.68%	7.95%
17	81.32%	99.75%	97.72%	45.77%	98.21%
18	84.44%	99.88%	98.16%	49.44%	98.63%

Los porcentajes de remociones de la prueba 17 con respecto a la prueba 16 son:

Tabla 16

# Prueba	DQO	Sólidos	Sólidos en	Sólidos	Aceites y
----------	-----	---------	------------	---------	-----------

		sediment	suspensión	disueltos	grasas
17	42.47%	50.00%	97.52%	44.28%	98.06%

Los porcentajes de remociones de la prueba 18 con respecto a la prueba 17 son:

Tabla 17

# Prueba	DQO	Sólidos sediment	Sólidos en suspensión	Sólidos disueltos	Aceites y grasas
18	16.66%	50.00%	19.23%	6.75%	23.53%



## V. METODOLOGIA

### A. Diseño del sistema de tratamiento

#### 1. Generalidades

Antes del estudio del diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales, la industria aceitera donde se realizó dicho estudio, ya contaba con la separación de los drenajes de las aguas pluviales, aguas residuales domésticas y aguas residuales industriales.

Para los drenajes de aguas residuales domésticas, cuenta con pozos de absorción y fosas sépticas.

Para los drenajes de aguas residuales industriales, cuenta con cuatro trampas individuales de separación de grasa por diferenciación de densidad, tres trampas generales de separación de grasa y cuatro depósitos de agua tratada. Las cortinas de estas trampas, pueden ser fijas, de concreto o removibles de gransa. La forma de estas trampas se puede apreciar en la figura 3 de los anexos.

#### 2. Parámetros de diseño

La industria aceitera donde se realizó el estudio, ha llevado un control estadístico del caudal del agua residual durante ocho meses.

Durante este periodo de tiempo, el caudal mínimo detectado fue de 20.92 gpm (114.02 m<sup>3</sup>/ día). El máximo fue de 42.64 gpm (232.41 m<sup>3</sup>/ día). El caudal promedio calculado fue de 31.86 gpm (173.65 m<sup>3</sup>/ día).

Tomando el caudal promedio, se diseñó la planta de tratamiento de aguas residuales industriales para una capacidad de dos veces el caudal, es decir para un caudal de 63.72 gpm (347.30 m<sup>3</sup>/ día), que proporciona un margen de 1.49 veces el caudal máximo detectado.

La industria aceitera donde se realizó el estudio, contaba con tres tanques que dejó de utilizar en cierto proceso. Las dimensiones de estos tanques, fueron utilizadas para el diseño.

### 3. Descripción del equipo y flujo de tratamiento

Los tres tanques mencionados en el punto V.A.2. fueron distribuidos de la siguiente manera:

<u>Cantidad</u>	<u>Función del tanque</u>
02	Sedimentación
01	Flotación

Estos tanques fueron construidos con láminas de acero al carbón de 1/8"x 4'x 8', y sus dimensiones se presentan en las secciones de diseño de cada tanque.

La secuencia del proceso de tratamiento es:

Sedimentación → Flotación

De la última trampa de grasa, se bombea el agua residual hacia los tanques sedimentadores, con una bomba de las siguientes características:

- Tipo: centrífuga; gpm: 100; rpm: 1725; hp: 5; tdh: 15'; diámetro de succión: 2"; diámetro de descarga: 2".

En los tanques sedimentadores, el agua residual debe ser mezclada primero con cal  $\text{Ca(OH)}_2$  en una dosificación de  $125 \text{ g/m}^3$ , y luego con sulfato de aluminio  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  en una dosificación aproximada del triple de la de cal, hasta neutralizar. Para una buena mezcla de los aditivos químicos, se utiliza un agitador de paleta localizado en el centro del tanque, el cual debe girar a 10 rpm ya que una agitación brusca rompería el efecto de coagulación-floculación.

Para la agitación, se utiliza un motorreductor con las siguientes características:

- Hp: 5; rpm entrada: 1,725; rpm salida: 10.

Para el control de pH, se utiliza un potenciómetro industrial fijado en la pared del tanque.

Una vez alcanzada la neutralización del agua residual, se deja en reposo.

Luego de transcurrido el tiempo de sedimentación (ver secciones V.A.4. y V.A.5.), se traslada el 75% superior del volumen hacia el tanque flotador, por medio de una bomba con las siguientes características:

- Tipo: neumática de doble diafragma; gpm: 100; tdh: 80'; diámetro de succión: 2"; diámetro de descarga: 2".

El 25% del volumen de los tanques sedimentadores, se debe trasladar con la misma bomba de diafragmas hacia el tanque de lodos, para ser tratados con el sistema de deshidratación de lodos.

En el tanque flotador, se mezcla el agua residual con el "agua blanca" proveniente del tanque de aireación.

El agua que sale del tanque flotador, se envía por rebalse hacia los depósitos de agua tratada, para ser bombeada hacia el tanque de aireación para mantener nivel alto, hacia los canales de descarga; o hacia áreas verdes para riego, con una bomba con las siguientes características.

- Tipo: centrífuga; gpm: 100; rpm: 1725; hp: 5; tdh: 15'; diámetro de succión: 2"; diámetro de descarga: 2".

Para el efecto de deshidratación de lodos, la industria aceitera donde se realizó el estudio, contaba con un filtro prensa de placas y marcos que dejó de utilizar en cierto proceso. Las características de este filtro son:

- Tipo: prensa de placas y marcos; cantidad de juegos de marcos y placas: 32; área de filtración  $499' ^2$ ; volumen de torta:  $21' ^3$ .

Los lodos del tanque de lodos, se bombean hacia el filtro prensa con una bomba con las siguientes características:

- Tipo: neumática de doble diafragma; gpm: 100; tdh: 80'; diámetro de succión:

2"; diámetro de descarga: 2".

El diagrama de flujo se presenta en la figura 4 de los anexos.

#### 4. Diseño del tanque de sedimentación I

Dimensiones:

Diámetro del cilindro: 10' = 3.05m

Altura del cilindro: 8' = 2.44m

Diámetro del cono: 10' = 3.05m

Altura del cono: 10" = 0.254m

Volumen del cilindro:

$$(\pi) \cdot (r^2) \cdot (h) = (3.1416) \cdot (1.52\text{m}^2) \cdot (2.44\text{m}) = 17.71 \text{ m}^3$$

Volumen del cono:

$$(1/3) \cdot (\pi) \cdot (r^2) \cdot (h) = (1/3) \cdot (3.1416) \cdot (1.52^2\text{m}^2) \cdot (0.254\text{m}) = 0.6145 \text{ m}^3$$

Volumen total:

$$V_{\text{tot}} = V_{\text{cilindro}} + V_{\text{cono}}$$

$$V_{\text{tot}} = (17.71 + 0.6145) \text{ m}^3 = 18.33 \text{ m}^3 = 4,842.80 \text{ gln}$$

Dosificaciones:

Cal  $\text{Ca}(\text{OH})_2$

$$(125 \text{ g/ m}^3) \cdot (18.33 \text{ m}^3) \cdot (1 \text{ kg/ 1,000 g}) = 2.29 \text{ kg}$$

Sulfato de aluminio  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  (aproximado)

$$(2.29 \text{ kg}) \cdot (3) = 6.87 \text{ kg}$$

Tiempo de llenado:

$$(4,842.80 \text{ gln}) \cdot (1 \text{ min/ 100 gln}) = 48.43 \text{ min}$$

Tiempo de dosificación de químicos:

Promedio de toma de tiempos al mejor operador: 30 min

Tiempo de sedimentación:

$$(269.40\text{cm}) \cdot (1 \text{ min/ 1.7 cm}) = 158.47 \text{ min}$$

Corrección= 203.87 min (ver sección V.A.10.)

Tiempo de descarga:

$$(4,842.80 \text{ gln}) \cdot (1 \text{ min} / 100 \text{ gln}) = 48.43 \text{ min}$$

Los detalles de este tanque se pueden observar en la figura 5 de los anexos.

### 5. Diseño del tanque de sedimentación II

Dimensiones:

Diámetro del cilindro:  $8' = 2.44\text{m}$

Altura del cilindro:  $8' = 2.44\text{m}$

Este tanque no tiene cono, por lo que se le colocó una poseta de  $4'' \times 6'' \times 12''$   
(h,a,l)

Volumen del cilindro:

$$V = (\pi) \cdot (r^2) \cdot (h) = (3.1416) \cdot (1.22\text{m}^2) \cdot (2.44\text{m}) = 11.41 \text{ m}^3$$

Volumen de la poseta:

$$V = (h) \cdot (a) \cdot (l) = (10.16) \cdot (15.24) \cdot (30.48) \text{ cm} = 4.72 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Volumen total:

$$V_{\text{tot}} = V_{\text{cilindro}} + V_{\text{poseta}}$$

$$V_{\text{tot}} = 11.41 + (4.72 \times 10^{-3}) = 11.42 \text{ m}^3 = 3,017.17 \text{ gln}$$

Dosificaciones:

Cal  $\text{Ca}(\text{OH})_2$

$$(125 \text{ g} / \text{m}^3) \cdot (11.42 \text{ m}^3) \cdot (1 \text{ kg} / 1,000 \text{ g}) = 1.43 \text{ kg}$$

Sulfato de aluminio  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  (aproximado)

$$(1.43 \text{ Kg}) \cdot (3) = 4.29 \text{ kg}$$

Tiempo de llenado:

$$(3,017.17) \cdot (1 \text{ min} / 100 \text{ gln}) = 30.17 \text{ min}$$

Tiempo de dosificación de químicos:

Promedio de toma de tiempos al mejor operador: 30 min

Tiempo de sedimentación:

$$(244 \text{ cm}) * (1 \text{ min} / 1.7 \text{ cm}) = 143.53 \text{ min}$$

Tiempo de descarga:

$$(3,017.17) * (1 \text{ min} / 100 \text{ gln}) = 30.17 \text{ min}$$

Los detalles de este tanque se pueden observar en la figura 6 de los anexos.

## **6. Diseño del tanque de aireación**

Debido a que con el agua de este tanque se forma el "agua blanca" necesaria para la flotación, el volumen de este tanque debe ser ligeramente mayor que el volumen del tanque de flotación (ver sección V.A.7.), por lo tanto:

Volumen del tanque:

$$V = (1.93 \text{ m}^3) * (1.20) = 2.32 \text{ m}^3 = 612.95 \text{ gln}$$

Dimensiones del tanque:

$$V = (\pi) * (r^2) * (h)$$

$$2.32 \text{ m}^3 = (3.1416) * (0.78 \text{ m}^2) * (h)$$

$$h = (2.32 \text{ m}^3) / ((3.1416) * (0.78 \text{ m}^2))$$

$$h = 1.22 \text{ m}$$

$$\text{Diámetro: } 1.56 \text{ m} = 5.12'$$

$$\text{Altura: } 1.22 \text{ m} = 4'$$

Para la formación del "agua blanca", se utiliza una bomba con las siguientes características:

Tipo: centrífuga; gpm: 300; rpm: 3,400; hp: 30; tdh: 150'; diámetro succión: 4"; diámetro descarga: 3"

Para la aireación del agua, se utiliza una "T" de mezcla con las siguientes características:

Diámetro de entrada: 2"

Diámetro de salida: 2"

Diámetro de vacío: 2"

Reducción: de 2" a 1" (McMaster-Carr, 1995).

El flujo de agua a través de la "T" de mezcla tiene dos funciones: (1) formar vacío para succionar aire de la atmósfera; y (2) presurización del agua en la tubería anterior a la "T" de mezcla.

Con este sistema se logra presurizar el agua, en un rango de presión de 70-80 psig. En este punto es donde se forman las diminutas burbujas de aire del "agua blanca", por lo que se debe colocar una "T" de 2" anterior a la "T" de mezcla para poder desviar esta "agua blanca" hacia el tanque flotador.

Después de la "T" de mezcla, sale una mezcla de agua-aire. Esta mezcla debe ser succionada por la bomba. Esta descarga no debe estar muy cerca de la succión de la bomba, ya que le entraría aire en exceso provocando cavitación. Por el contrario, la descarga no debe estar muy lejana de la succión, ya que no le entraría suficiente aire a la bomba para poder formar las diminutas burbujas de aire.

Los detalles de este tanque se pueden observar en la figura 7 de los anexos.

## 7. Diseño del tanque de flotación

Dimensiones:

Diámetro del cilindro: 4' = 1.22m

Altura del cilindro: 5.42' = 1.65m

Altura del cajón de rebalse: 4.12' = 1.26m

Ancho del cajón de rebalse: 0.5' = 0.15m

Largo del cajón de rebalse: 2' = 0.61m

Altura del cajón de descarga: 1.3' = 0.40m

Ancho del cajón de descarga: 0.5' = 0.15m

Largo del cajón de descarga: 2' = 0.61m

Volumen:

$$V = (\pi) \cdot (r^2) \cdot (h) = (3.1416) \cdot (0.61 \text{ m}^2) \cdot (1.65 \text{ m}) = 1.93 \text{ m}^3 = 509.91 \text{ gln}$$

Tiempo de residencia:

$$(509.91 \text{ gln}) \cdot (1 \text{ min} / 100 \text{ gln}) = 5.10 \text{ min}$$

Tanto la alimentación del "agua blanca" como la alimentación del agua de los tanques sedimentadores, debe ser en la parte inferior del tanque. Estas tuberías, deben colocarse tangencialmente de modo que el agua choque suavemente con la lámina del cilindro. De esta forma, tendrá un movimiento en espiral dentro del tanque.

Por lo mencionado anteriormente, este tanque no necesita un sistema de agitación y raspado dinámico de lodos. Para la separación de los lodos, se utiliza una lámina rascadora fija, de longitud igual al radio del tanque (61 cm) la cual evacua los lodos hacia el tanque de lodos.

La descarga de agua, se debe colocar a la mitad del tanque con un codo de 90 grados en dirección opuesta al flujo.

El control del nivel es muy importante para la separación de los lodos con la lámina raspadora. Para este fin, se utiliza un sifón que conduce la descarga del agua hacia un cajón que contiene una compuerta graduable.

Los detalles de este tanque, se pueden observar en la figura 8 de los anexos.

### **8. Diseño del tanque de lodos**

Volumen de lodos proveniente de los tanques sedimentadores:

$$(63.72 \text{ gpm}) \cdot (0.25) = 15.93 \text{ gpm}$$

Del tanque flotador se extrae lo siguiente:

- Sólidos sedimentables: 0.1 mL/L
- Sólidos en suspensión: 1.024 mg/L

- Sólidos disueltos: 306 mg/L
- Aceites y grasas: 17.15 mg/L

$$(324.17 \text{ mg/L}) \cdot (1 \text{ g} / 1,000 \text{ mg}) \cdot (1 \text{ Kg} / 1,000 \text{ g}) \cdot (1 \text{ L} / 1 \text{ Kg}) \cdot (1 \text{ gln} / 3.785 \text{ L}) \cdot (3.785 \text{ L} / 1 \text{ gln}) \cdot (63.72 \text{ gln} / \text{min}) = 0.0207 \text{ gpm}$$

$$(0.1 \text{ mL/L}) \cdot (1 \text{ L} / 1,000 \text{ mL}) \cdot (1 \text{ gln} / 3.785 \text{ L}) \cdot (3.785 \text{ L} / 1 \text{ gln}) \cdot (63.72 \text{ gln} / \text{min}) = 0.0064 \text{ gpm}$$

Volumen de lodos proveniente del tanque flotador

$$(0.0207 + 0.0064) \text{ gpm} = 0.0271 \text{ gpm}$$

Volumen total de lodos:

$$(15.93 + 0.0271) \text{ gpm} = 15.96 \text{ gpm}$$

El tanque de lodos es un "buffer tank" entre los tanques sedimentadores, flotador y el sistema de deshidratación de lodos.

Tiempo de residencia:

30 min

Volumen del tanque:

$$(15.96 \text{ gln} / \text{min}) \cdot (30 \text{ min}) = 478.80 \text{ glns} = 1.81 \text{ m}^3$$

Dimensiones del tanque:

$$V = (\pi) \cdot (r^2) \cdot (h)$$

$$1.81 \text{ m}^3 = (3.1416) \cdot (0.6 \text{ m}^2) \cdot (h)$$

$$h = (1.81 \text{ m}^3) / ((3.1416) \cdot (0.6 \text{ m}^2))$$

$$h = 1.6 \text{ m}$$

$$\text{Diámetro: } 1.2 \text{ m} = 3.94'$$

$$\text{Altura: } 1.6 \text{ m} = 5.25'$$

Los detalles de este tanque se pueden observar en la figura 9 de los anexos.

## 9. Diseño del sistema de deshidratación de lodos

En la sección V.A.8. se determinó la cantidad total de lodos: 15.96 gpm.

$$(15.96 / 63.72) * (100) = 25.05\%$$

Los lodos representan el 25.05% del agua residual.

En la sección V.A.3. se presentan las características del filtro prensa para la deshidratación de los lodos.

$$(15.96 \text{ gln/min}) * (3.785 \text{ L} / 1 \text{ gln}) * (1 \text{ m}^3 / 1,000 \text{ L}) * (3.28^3 \text{ '}^3 / 1 \text{ m}^3) * (60 \text{ min} / 1 \text{ hr}) * (12 \text{ hr} / \text{turno}) = 1,534.80 \text{ '}^3 / \text{turno}$$

El volumen de lodos que se almacenarán en los marcos del filtro prensa para un porcentaje de deshidratación de 3.87% (ver sección IV.B) es:

$$(1,534.80 \text{ '}^3 / \text{turno}) * (0.0387) = 59.4 \text{ '}^3 / \text{turno}$$

$$(59.4 \text{ '}^3 / 21 \text{ '}^3) = 2.83$$

Al filtro se le debe hacer limpieza 2.83 veces cada turno de 12 horas, es decir cada 4.24 horas.

## 10. Balance del proceso

Para el balance del proceso de tratamiento, se depende de los tiempos más largos. Los tiempos más largos los tiene el tanque de sedimentación I, y es el que fija el tiempo total del proceso.

Debido a que se cuenta con una bomba centrífuga para el llenado y con una bomba neumática de doble diafragma para la descarga de los dos sedimentadores, estas actividades no se pueden traslapar.

Las actividades de llenado, dosificación de aditivos químicos, reposo y descarga del sedimentador II suman 233.87 min.

Las actividades de dosificación de aditivos químicos y reposo del sedimentador I suman 188.47 min.

Por lo tanto, las actividades del sedimentador II, mencionadas anteriormente, se pueden llevar a cabo durante la duración de las actividades de dosificación de aditivos químicos y reposo del sedimentador I. Entre estos dos

tiempos existe una diferencia de 45.40 min, por lo que se le debe agregar este tiempo al período de sedimentación del sedimentador I, siendo un tiempo de sedimentación de 203.87 min para este tanque.

La cantidad de bachs al día son: 3.01 para el sedimentador I y para el sedimentador II, siendo un total de 6.02 bachs/ día

En la figura 10 de los anexos se presenta el Diagrama de Gantt.

## **B. Especificaciones**

### **1. Estructuras metálicas de soporte y obra civil**

A modo de economizar espacio, los cinco tanques se colocaron encima de las dos últimas trampas de grasa.

Para sostener los tanques, se utilizaron tubos de acero al carbón de 6" de diámetro, los cuales van extendidos desde los extremos de las trampas, para lograr el soporte necesario.

Es necesario proteger los tanques de la lluvia, ya que ésta arruinaría los procesos de sedimentación y flotación.

Por lo mencionado anteriormente se construyó una galera de dos aguas. Las columnas, vigas, viguetas, y tijeras se construyeron con costaneras "U" acuachadas de acero al carbón de 1/16"x 2"x 4"x 20', las cuales son soportadas por columnas de concreto cimentadas sobre zapatas.

Ver figura 11 de los anexos.

## **C. Costos**

### **1. Costos de construcción**

Tabla 18

Descripción	Costo (Q)
Tanque de sedimentación I	39,621.46
Tanque de sedimentación II	22,193.95
Tanque de aireación	30,531.33
Tanque de flotación	5,215.36
Tanque de lodos	8,896.02
Filtro prensa de placas y marcos usado, para la deshidratación de lodos (aproximado)	60,000.00
Galera	11,891.00
Sub-total	178,349.12
Montaje	72,707.04
<b>Total</b>	<b>251,056.16</b>

Ver cálculos en los anexos.

## 2. Costos de Montaje

Para el montaje de la planta de tratamiento, se necesitan los servicios de cuatro soldadores, dos electricistas y un mecánico, con sus respectivos ayudantes, durante un período de cuatro meses.

Sueldos y salarios de soldadores:

Sueldo = Q 1,400.00/ soldador

Cuota patronal = Q 140.00

Indeminización = Q 116.67

Vacaciones = Q 116.67

Sueldos y salarios de 4 soldadores = (Q1,773.34)\*(4) = Q 7,093.36

Sueldos y salarios en 4 meses = (Q 7,093.36)\*(4) = Q 28,373.44

Sueldos y salarios de electricistas:

Sueldo = Q 1,400.00/ electricista

Cuota patronal = Q 140.00

Indemnización = Q 116.67

Vacaciones = Q 116.67

Sueldos y salarios de 2 electricistas =  $(Q1,773.34) \times (2) = Q 3,546.68$

Sueldos y salarios en 4 meses =  $(Q 3,546.68) \times (4) = Q 14,186.72$

Sueldos y salarios de mecánico:

Sueldo = Q 1,400.00/ mecánico

Cuota patronal = Q 140.00

Indemnización = Q 116.67

Vacaciones = Q 116.67

Sueldos y salarios de 1 mecánico =  $(Q1,773.34) \times (1) = Q 1,773.34$

Sueldos y salarios en 4 meses =  $(Q 1,773.34) \times (4) = Q 7,093.36$

Sueldos y salarios de ayudantes:

Sueldo = Q 650.00/ ayudante

Cuota patronal = Q 65.00

Indemnización = Q 54.17

Vacaciones = Q 54.17

Sueldos y salarios de 7 ayudantes =  $(Q 823.34) \times (7) = Q 5,763.38$

Sueldos y salarios en 4 meses =  $(Q 5,763.34) \times (4) = Q 23,053.52$

Total Costos de montaje = Q 72,707.04

### 3. Costos de operación y mantenimiento mensual

Para la operación de la planta de tratamiento, se necesitan los servicios de tres operadores y tres ayudantes, uno por turno de 12 horas.

Sueldos y salarios de operadores:

Sueldo= Q 950.00/ operador

Cuota patronal= Q 95.00

Indeminización= Q 79.17

Vacaciones= Q 79.17

Sueldos y salarios de 3 operadores=  $(Q\ 1,203.34) \times (3) = Q\ 3,610.02$

Sueldos y salarios de ayudantes:

Sueldo= Q 550.00/ ayudante

Cuota patronal= Q 55.00

Indeminización= Q 45.83

Vacaciones= Q 45.83

Sueldos y salarios de 3 ayudantes=  $(Q\ 696.66) \times (3) = Q\ 2,089.98$

Total sueldos y salarios= Q 5,700.00

Mantenimiento:

Consumo de energía eléctrica de los cinco motores: 17.45 Kw/ hr

$(17.45\ Kw/ hr) \times (Q\ 0.57/ (Kw/hr)) \times (24\ hr/ día) \times (365\ días/ año) \times$

$(1\ año/ 12\ meses) = Q\ 7,260.95$

Consumo de cal  $Ca(OH)_2$ : 14.56 qq

$(Q\ 34/ qq) \times (14.56\ qq) = Q\ 495.04$

Consumo aproximado de sulfato de aluminio  $Al_2(SO_4)_3$ : 43.68 qq

$(Q\ 80/ qq) \times (43.68\ qq) = Q\ 3,494.40$

Repuestos (aproximado)= Q 2,500.00

Total mantenimiento= Q 13,750.39

#### **D. Comparación monetaria de la planta diseñada, contra plantas de igual capacidad que se ofrecen en el mercado**

El costo de construcción, equipo y montaje de la planta de tratamiento diseñada asciende a Q 251,056.16.

El costo de una planta nueva en el mercado, se encuentra alrededor de Q3,000,000.00, por lo que con la planta diseñada, se tiene un ahorro de Q2,748,943.84, que representa el 91.63%.

## VI. DISCUSIONES

La medición de los datos estadísticos de los caudales del agua residual, se llevó a cabo en un período de tiempo de ocho meses. En estos ocho meses, se encuentran los de invierno, por lo que estos datos sí son confiables para proyectar el mínimo y el máximo.

La planta de tratamiento se diseñó al doble de la capacidad, para tener una holgura que pueda absorber las demandas de la industria cuando efectúe sus ampliaciones futuras.

Para lograr la sedimentación, es necesaria la dosificación de  $125 \text{ g/m}^3$  de cal  $\text{Ca(OH)}_2$  y luego sulfato de aluminio  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  en una relación aproximada de 1:3 respectivamente. La secuencia de dosificación, debe ser la mencionada ya que al agregar cal el pH sube a un valor alcalino, con lo que se obtiene una mejor precipitación que en un medio ácido. Adicionalmente, es necesaria la dosificación de un agente químico para bajar el pH hasta un valor lo más cercano posible a 7 para cumplir con los requerimientos. Como posibles agentes químicos en esta operación, se encuentran el ácido sulfúrico  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y el sulfato de aluminio. El sulfato de aluminio presenta mejores resultados ya que además de neutralizar el agua residual, actúa como coagulante-floculante mejorando la sedimentación. Encontrar la dosificación óptima de los aditivos químicos es importante, ya que al incrementar innecesariamente las dosis, también incrementarán los valores de los análisis fisicoquímicos, especialmente la demanda química de oxígeno (DQO) y los sólidos disueltos.

Para la agitación en los tanques de sedimentación, se escogió el agitador de paleta ubicado en el centro del tanque ya que es el que logra un buen mezclado sin dañar los flóculos formados. El agitador de hélice colocado en el centro del tanque, ocasiona remolinos no deseados, al colocarlo a  $\frac{1}{4}$  del diámetro se eliminan los remolinos pero los alabes rompen los flóculos formados.

Se utilizó el 50% de mezcla del agua residual con el "agua blanca" ya que existe gran diferencia en los resultados de las pruebas 7 y 8, y poca diferencia en los resultados de las pruebas 8 y 9; es decir, mientras se aumenta el porcentaje de "agua blanca" por encima del 50%, las variaciones son bajas.

Para la flotación, se utilizan diminutas burbujas de aire que se adhieren a las partículas contaminantes para flotarlas a la superficie. Para la formación de estas diminutas burbujas de aire, se escogió el sistema de una bomba con una "T" de mezcla por su simplicidad y economía. Este sistema de bombeo, no necesita de ningún equipo para la dosificación de aire ya que el aire se obtiene de la atmósfera por el vacío que produce la "T" de mezcla, la cual también hace la función de presurización del agua (70-80 psig). También se tiene la ventaja de que el flujo de agua presurizada es continuo, y a la vez representa una ventaja económica con un ahorro de inversión aproximado de 37.50%.

Con la sedimentación y flotación con aire disuelto, todos los valores de los análisis fisicoquímicos efectuados, reúnen los requisitos de los parámetros propuestos por CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente) y AMSA (Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y Lago de Amatitlán) para la etapa I (3 años). Para las etapas II (6 años) y III (9 años) también se satisfacen todos los parámetros, a excepción de la demanda química de oxígeno (DQO) que se satisface en un 68.55% (etapa I) y en un 45.70% (etapa II).

Por lo mencionado anteriormente, la filtración no es necesaria para el tratamiento del agua, por lo que el filtro prensa se destinó a la deshidratación de los lodos.

Con la inversión de Q251,056.16 en la planta de tratamiento diseñada, se obtiene un 91.63% de ahorro en comparación con plantas de igual capacidad que se ofrecen en el mercado. Esta inversión es necesaria, ya que se logra alcanzar los parámetros propuestos por CONAMA y AMSA mencionados anteriormente.

## VII. CONCLUSIONES

- A. Las trampas de grasa por desbaste y separación por diferenciación de densidades, son efectivas y de gran importancia como un pretratamiento de aguas residuales. Las cortinas de éstas pueden ser fijas, de concreto, o removibles de granza.
- B. Las operaciones físicas unitarias que mejor resultado práctico y económico ofrecen en el tratamiento de aguas residuales de industrias de aceites y grasas vegetales son: sedimentación y flotación con aire disuelto.
- C. En la sedimentación, la dosificación óptima de cal  $\text{Ca(OH)}_2$  es de  $125 \text{ g/ m}^3$  y de sulfato de aluminio  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  aproximadamente el triple de la de cal hasta neutralizar. La secuencia de dosificación, debe ser primero la de cal y luego la de sulfato de aluminio.
- D. Con una bomba y una "T" de mezcla, se puede fabricar un sistema práctico y económico para la presurización del agua y lograr formar las diminutas burbujas de aire necesarias para la flotación.
- E. Para los análisis fisicoquímicos efectuados, la planta de tratamiento diseñada, logra reunir todos los parámetros propuestos por CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente) y AMSA (Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y Lago de Amatitlán) para la etapa I (3 años). Para las etapas II (6 años) y III (9 años) logra reunir todos los parámetros propuestos, a excepción de la demanda química de oxígeno (DQO) que se satisface en un 68.55% (etapa I) y en un 45.70% (etapa II).
- F. Con la planta de tratamiento diseñada se obtiene un 91.63% de ahorro en comparación con plantas de igual capacidad que se ofrecen en el mercado.

## VIII. RECOMENDACIONES

- A. Analizar el agua tratada para verificar si reúne los requisitos necesarios para ser utilizada en intercambiadores de calor y calderas para generación de vapor.
- B. Con la recomendación A, cuantificar el porcentaje de recirculación del agua y con éste, los beneficios monetarios que obtendría la industria.

## IX. BIBLIOGRAFIA

- Adams, D. 1991. **Water and wastewater axamination manual**. Second Printing. Lewis Publishers. Michigan, U.S.A. 247 p.
- ASTM (American Society for Testing and Materials). 1975. **Water quality parameters**. Philadelphia, U.S.A. 580 p.
- Corbit, R. 1990. **Standard Handbook of enviromental engineering**. McGraw Hill. New York, U.S.A. 1259p.
- CTRFA/PSA (Cooperación Técnica República Federal de Alemania / Programa de Salud Ambiental). 1991. **Manual de disposición de aguas residuales; origen, descarga, tratamiento, y análisis de aguas residuales**. 2 tomos. 325 y 412 p. New York, U.S.A.
- Degrémont, F. 1979. **Water treatment handbook**. Fifth edition. Halsted. New York, U.S.A. 1186p.
- Fair, G; Geyer, J; y Okun, D. 1976. **Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales**. 1a edición. Editotial Limusa. México, D.F. Volumen II. 764p
- Ford, D. & Elton, R. **Chemical Engineering deskbook issue, Removal of oil and grease from industrial wastewaters**. October 17, 1977.
- Gunstone, F. 1987. **Palm Oil**. John Wiley & Sons. New York, U.S.A. 100 p.
- Hendrix, M. & Kellens, M. 1993. **De Smet: Nuevos desarrollos en fraccionamiento del aceite de palma**. AOCS fifth latin american congres. Margarita Island, Venezuela. 21 p.
- Kellens, M. 1996. **De Smet: Development in fat modification technology: interesterification of oils and fats**. Workshop on oils interesterification. Texas A&M University, College Station, Texas, U.S.A. 32 p.
- Mattock, G. 1978. **New processes of wastewater treatment and recovery**.

## ANEXO 1

### Costo de construcción del tanque de sedimentación I

Láminas de acero al carbón de 1/8 "x 4'x 8':

Area del cilindro:

$$(2) * (\pi) * (r) * (h) = (2) * (3.1416) * (5') * (8') = 251.33'^2$$

Area del cono:

$$g = (5'^2 + 0.83'^2)^{1/2} = 5.07'$$

$$(\pi) * (r) * (g) = (3.1416) * (5') * (5.07') = 79.64'^2$$

Area del agitador:

$$(b) * (h) = (5') * (4') = 20'^2$$

$$\text{Area total} = 251.33' + 79.64' + 20' = 350.97'^2$$

$$\text{Cantidad de láminas} = 350.97' / 32' = 10.97 = \text{a. 11 láminas}$$

$$\text{Costo} = (\text{Q } 414.00 / \text{lámina}) * (11 \text{ láminas}) = \text{Q } 4,554.00$$

Tubería de acero al carbón, cédula 40 de 2"x 20'

$$\text{Longitud de tubería de llenado} = 26'$$

$$\text{Longitud de tubería de descarga} = 25'$$

$$\text{Longitud del eje del agitador} = 8.83'$$

$$\text{Longitud de bases del motorreductor} = 20'$$

$$\text{Longitud total} = 79.83'$$

$$\text{Cantidad de tubos} = (79.83' / 20') = 3.99 = \text{a. 4 tubos}$$

$$\text{Costo} = (\text{Q } 334.00 / \text{tubo}) * (4 \text{ tubos}) = \text{Q } 1,336.00$$

Codos soldables de acero al carbón de 90 grados de 2":

$$\text{En tubería de llenado} = 3$$

$$\text{En tubería de descarga} = 3$$

$$\text{Cantidad de codos} = 6$$

$$\text{Costo} = (\text{Q } 32.34 / \text{codo}) * (6 \text{ codos}) = \text{Q } 194.04$$

Ellis Horwood Ltd. New York, U.S.A. 415 p.

- McCaull, J./ Crossland, J. 1974. **Water pollution**. Hascourt Brace Jovanovich, Inc. New York, U.S.A. 206 p.
- McMaster-Carr Suply Company. 1995. Catlog No. 101. Printed in U.S.A. 2455 pp.
- Metcalf & Eddy. 1996. **Ingeniería de aguas residuales; tratamiento, vertido y reutilización**. 3a edición. McGraw Hill. México, D.F. 3 tomos. 1,459 p.
- Miler, T. Jr. 1994. **Ecología y medio ambiente**. Grupo Editorial Iberoamérica. México, D.F. 867 pp.
- PACSEES (Pan-American Center of Sanity Engineering and Enviromental Sciences). 1976. **Evaluation of lower cost methods of water treatment in Latin America**. Lima, Peru. 297 p.
- Powell, S. 1970. **Acondicionamiento de aguas para la industria**. Editorial Limusa-Willey. Mexico, D.F. 631 pp.
- Samperio, J. **Glosario de términos para la industria aceitera**. Asociación Americana de Soya.
- WPCF/ASCE (Water Pollution Control Federation / American Society of Civil Engineers). 1991. **Wastewater treatment plant desing**. Lancaster Press Inc. New York, U.S.A.

## ANEXO 2

### Costo de construcción del tanque de sedimentación II

Láminas de acero al carbón de 1/8 "x 4'x 8':

Area del cilindro:

$$(2) * (\pi) * (r) * (h) = (2) * (3.1416) * (4') * (8') = 201.06' ^2$$

Area del fondo:

$$(\pi) * (r^2) = (3.1416) * (4' ^2) = 50.27' ^2$$

Area del agitador:

$$(b) * (h) = (4') * (4') = 16' ^2$$

$$\text{Area total} = 201.06' + 50.27' + 16' = 267.33' ^2$$

$$\text{Cantidad de láminas} = 267.33' / 32' = 8.35 = \text{a. } 9 \text{ láminas}$$

$$\text{Costo} = (\text{Q } 414.00 / \text{lámina}) * (9 \text{ láminas}) = \text{Q } 3,726.00$$

Tubería de acero al carbón, cédula 40 de 2"x 20'

Longitud de tubería de llenado= 26'

Longitud de tubería de descarga= 25'

Longitud del eje del agitador= 8'

Longitud de bases del motorreductor= 16'

Longitud total= 75'

$$\text{Cantidad de tubos} = (75' / 20') = 3.75 = \text{a. } 4 \text{ tubos}$$

$$\text{Costo} = (\text{Q } 334.00 / \text{tubo}) * (4 \text{ tubos}) = \text{Q } 1,336.00$$

Codos soldables de acero al carbón de 90 grados de 2":

En tubería de llenado= 3

En tubería de descarga= 3

Cantidad de codos= 6

$$\text{Costo} = (\text{Q } 32.34 / \text{codo}) * (6 \text{ codos}) = \text{Q } 194.04$$

Válvulas de bola de 2":

Válvulas de bola de 2":

En tubería de llenado= 1

En tubería de descarga= 2

Cantidad de válvulas= 3

Costo= (Q 456.00/ válvula)\*(3 válvulas)= Q 1,368.00

Bomba de llenado:

Las especificaciones de esta bomba, se encuentran en la sección V.A.3.

Costo= Q 8,335.00

Bomba de descarga:

Las especificaciones de esta bomba, se encuentran en la sección V.A.3.

Costo= Q 6,555.00

Motorreductor:

Las especificaciones se encuentran en la sección V.A.3.

Costo= Q 5,473.00

Medidor de pH:

Costo= Q 8,430.00

Materiales eléctricos:

2 interruptores automáticos (Q 651.71 c/u)= Q 1,303.42

2 contactores (Q 482.25 c/u)= Q 964.50

2 relés bimetálicos (Q 346.50 c/u)= Q 693.00

2 pulsadores dobles de arranque y paro (Q 119.25 c/u)= Q 238.50

20 metros de cable TSJ, AWG 4x14 (Q 5.49/ m)= Q 109.80

20 metros de cable TSJ, AWG 3x16 (Q 3.36/ m)= Q 67.20

Total materiales eléctricos= Q 3,376.42

### ANEXO 3

#### Costo de construcción del tanque de aireación

Láminas de acero al carbón de 1/8 "x 4'x 8':

Area del cilindro:

$$(2) * (\pi) * (r) * (h) = (2) * (3.1416) * (2.56') * (4') = 64.36'^2$$

Area del fondo:

$$(\pi) * (r^2) = (3.1416) * (2.56'^2) = 20.59'^2$$

$$\text{Area total} = 64.36' + 20.59' = 84.95'^2$$

$$\text{Cantidad de láminas} = 84.95' / 32' = 2.65 = \text{a. 3 láminas}$$

$$\text{Costo} = (\text{Q } 414.00 / \text{lámina}) * (3 \text{ láminas}) = \text{Q } 1,242.00$$

Tubería de acero al carbón, cédula 40 de 2"x 20'

$$\text{Longitud de tubería de llenado} = 26'$$

$$\text{Longitud de tubería de descarga} = 22'$$

$$\text{Longitud de tubería de recirculación} = 11'$$

$$\text{Longitud total} = 59'$$

$$\text{Cantidad de tubos} = (59' / 20') = 2.95 = \text{a. 3 tubos}$$

$$\text{Costo} = (\text{Q } 334.00 / \text{tubo}) * (3 \text{ tubos}) = \text{Q } 1,002.00$$

Tubería de acero al carbón, cédula 40 de 4"x 20'

$$\text{Longitud de tubería de succión de bomba} = 3.5'$$

$$\text{Cantidad de tubos} = (3.5' / 20') = 0.18 = \text{a. 1 tubos}$$

$$\text{Costo} = (\text{Q } 1,026.00 / \text{tubo}) * (1 \text{ tubo}) = \text{Q } 1,026.00$$

"T" de mezcla de 2":

$$\text{Costo: Q } 669.30$$

"T" soldable de acero al carbón de 2":

$$\text{Costo: Q } 94.00$$

Manómetro de 0 a 100 psi:

En tubería de llenado= 1

En tubería de descarga= 2

Cantidad de válvulas= 3

Costo= (Q 456.00/ válvula)\*(3 válvulas)= Q 1,368.00

Bomba de llenado:

Las especificaciones de esta bomba, se encuentran en la sección V.A.3.

Debido a que es una bomba para el llenado de los dos sedimentadores, este costo está cargado en el sedimentador I.

Bomba de descarga:

Las especificaciones de esta bomba, se encuentran en la sección V.A.3.

Debido a que es una bomba para la descarga de los dos sedimentadores, este costo está cargado en el sedimentador I.

Motorreductor:

Las especificaciones se encuentran en la sección V.A.3.

Costo= Q 5,473.00

Medidor de pH

Costo= Q 8,430.00

Materiales eléctricos:

1 interruptor automático= Q 651.71

1 contactor= Q 482.25

1 relé bimetálico= Q 346.50

1 pulsador doble de arranque y paro= Q 119.25

20 metros de cable TSJ, AWG 3x16 (Q 3.36/ m)= Q 67.20

Total materiales eléctricos= Q 1,666.91

## ANEXO 4

### Costo de construcción del tanque de flotación

Láminas de acero al carbón de 1/8 "x 4'x 8':

Area del cilindro:

$$(2) * (\pi) * (r) * (h) = (2) * (3.1416) * (2') * (5.42') = 68.11'^2$$

Area del fondo:

$$(\pi) * (r^2) = (3.1416) * (2'^2) = 12.57'^2$$

Area de cajón de rebalse:

$$(4.12') * (0.5') * (2) + (2') * (0.5') + (2') * (4.12') = 13.36'^2$$

Area del cajón de descarga:

$$(1.3') * (0.5') * (2) + (2') * (0.5') + (2') * (1.3') = 4.9'^2$$

Area de paleta rascadora:

$$(b) * (h) = (2') * (0.5') = 1'^2$$

$$\text{Area total} = 68.11' + 12.57' + 13.36' + 4.9' + 1' = 99.94'^2$$

$$\text{Cantidad de láminas} = 99.94' / 32' = 3.12 = \text{a. 4 láminas}$$

$$\text{Costo} = (\text{Q } 414.00 / \text{lámina}) * (4 \text{ láminas}) = \text{Q } 1,656.00$$

Tubería de acero al carbón, cédula 40 de 2"x 20'

Longitud de tubería de llenado= 23'

$$\text{Cantidad de tubos} = (23' / 20') = 1.15 = \text{a. 2 tubos}$$

$$\text{Costo} = (\text{Q } 334.00 / \text{tubo}) * (2 \text{ tubos}) = \text{Q } 668.00$$

Tubería de acero al carbón, cédula 40 de 3"x 20'

Longitud de tubería de descarga= 22'

$$\text{Cantidad de tubos} = (22' / 20') = 1.10 = \text{a. 2 tubos}$$

$$\text{Costo} = (\text{Q } 760.00 / \text{tubo}) * (2 \text{ tubos}) = \text{Q } 1,520.00$$

Codos soldables de acero al carbón de 90 grados de 2":

En tubería de llenado= 4

Costo= Q 285.00

Codos soldables de acero al carbón de 90 grados de 2":

En tubería de llenado= 3

En tubería de descarga= 3

En tubería de recirculación= 2

Cantidad de codos= 8

Costo= (Q 32.34/ codo)\*(8 codos)= Q 258.72

Válvulas de bola de 2":

En tubería de llenado= 1

En tubería de descarga= 2

Cantidad de válvulas= 3

Costo= (Q 456.00/ válvula)\*(3 válvulas)= Q 1,368.00

Bomba de llenado:

Las especificaciones de esta bomba, se encuentran en la sección V.A.3.

Costo= Q 8,335.00

Bomba de recirculación y descarga:

Las especificaciones de esta bomba, se encuentran en la sección V.A.6.

Costo= Q 14,285.00

Materiales eléctricos:

1 interruptor automático= Q 651.71

1 contactor= Q 482.25

1 relé bimetálico= Q 346.50

1 pulsador doble de arranque y paro= Q 119.25

20 metros de cable TSJ, AWG 4x16 (Q 12.84/ m)= Q 256.80

20 metros de cable TSJ, AWG 4x14 (Q 5.49/ m)= Q 109.80

Total materiales eléctricos= Q 1,966.31

## ANEXO 5

### Costo de construcción del tanque de lodos

Láminas de acero al carbón de 1/8 "x 4'x 8':

Area del cilindro:

$$(2) * (\pi) * (r) * (h) = (2) * (3.1416) * (1.97') * (5.25') = 64.98'^2$$

Area del fondo:

$$(\pi) * (r^2) = (3.1416) * (1.97'^2) = 12.19'^2$$

$$\text{Area total} = 64.98' + 12.19' = 77.17'^2$$

$$\text{Cantidad de láminas} = 77.17' / 32' = 2.41 = \text{a. 3 láminas}$$

$$\text{Costo} = (\text{Q } 414.00 / \text{lámina}) * (3 \text{ láminas}) = \text{Q } 1,242.00$$

Tubería de acero al carbón, cédula 40 de 2"x 20':

Longitud de tubería = 44'

$$\text{Cantidad de tubos} = (44' / 20') = 2.2 = \text{a. 3 tubos}$$

$$\text{Costo} = (\text{Q } 334.00 / \text{tubo}) * (3 \text{ tubos}) = \text{Q } 1,002.00$$

Codos soldables de acero al carbón de 90 grados de 2":

Cantidad de codos = 3

$$\text{Costo} = (\text{Q } 32.34 / \text{codo}) * (3 \text{ codos}) = \text{Q } 97.02$$

Bomba de descarga:

Las especificaciones se encuentran en la sección V.A.3.

$$\text{Costo} = \text{Q } 6,555.00$$

$$\text{Costo} = (\text{Q } 32.34 / \text{codo}) * (4 \text{ codos}) = \text{Q } 129.36$$

Codos soldables de acero al carbón de 90 grados de 3":

En tubería de descarga= 5

$$\text{Costo} = (\text{Q } 66.00 / \text{codo}) * (5 \text{ codos}) = \text{Q } 330.00$$

Válvulas de bola de 2":

En tubería de llenado= 2

$$\text{Costo} = (\text{Q } 456.00 / \text{válvula}) * (2 \text{ válvulas}) = \text{Q } 912.00$$

Bomba de llenado:

Las especificaciones de esta bomba, se encuentran en la sección V.A.3.

Debido a que es la misma bomba de la descarga de los dos sedimentadores, este costo está cargado en el sedimentador I.

## ANEXO 6



### Costo de construcción de la galera

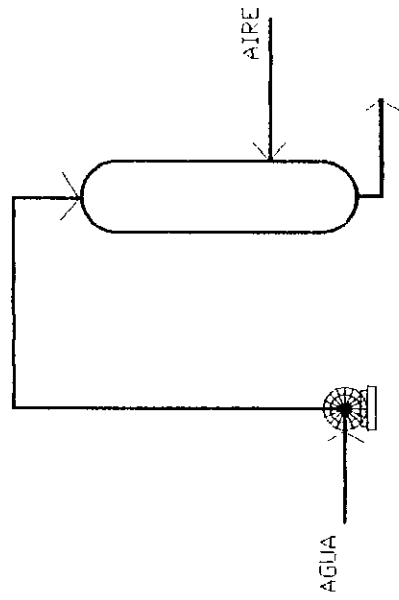
#### Materiales necesarios:

- 8 láminas de fibra plástica de 10' = Q 480.00
- 90 láminas galvanizadas de 10' calibre 25 = Q 4,050.00
- 90 costaneras "U" de 1/16"x 2"x 4"x 20' = Q 6,480.00
- 10 quintales de cemento = Q 250.00
- 1 m<sup>3</sup> de arena de río = Q 65.00
- ½ m<sup>3</sup> de piedrín de ½" = Q 60.00
- 2 tubos PVC de 4" = Q 280.00
- 6 codos PVC de 4" = Q 226.00
- Total materiales = Q 11,891.00

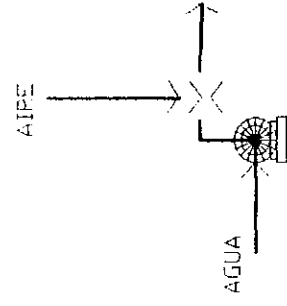
## ANEXO 7

FIGURA 1: Principales dispositivos empleados para la compresión y la saturación de aire del agua presurizada.

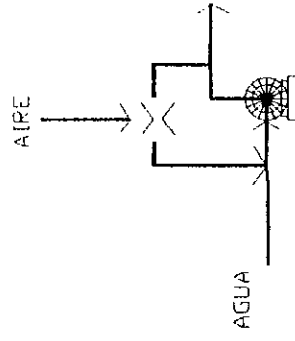
 Bomba centrífuga  
 "T" de mezcla



1



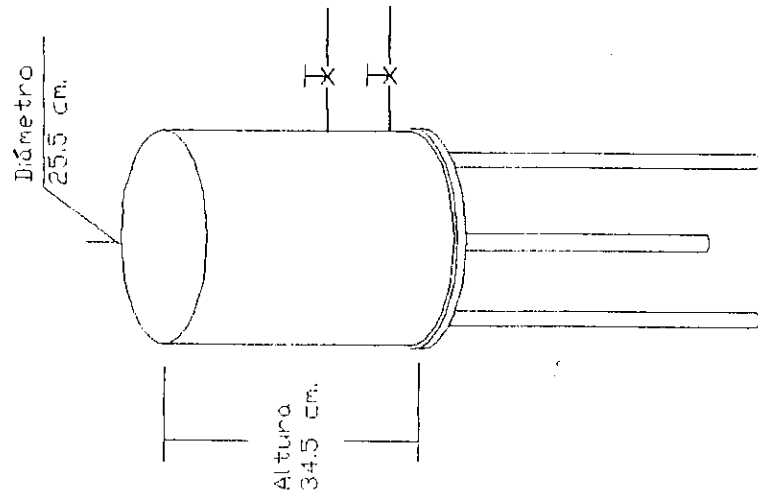
2



3

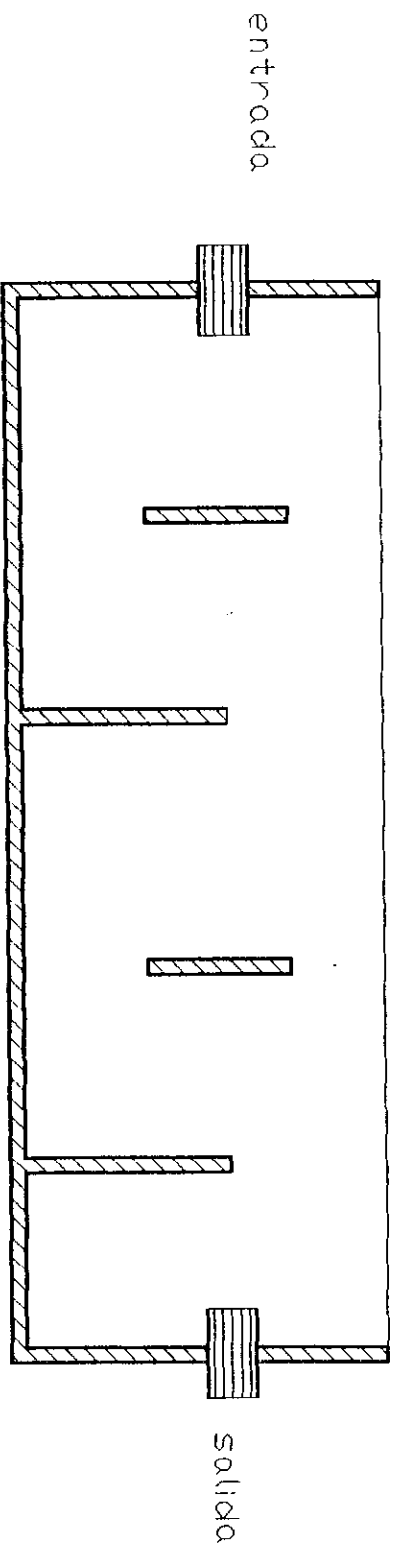
# ANEXO 8

## FIGURA 2: Tanque piloto



ANEXO 9

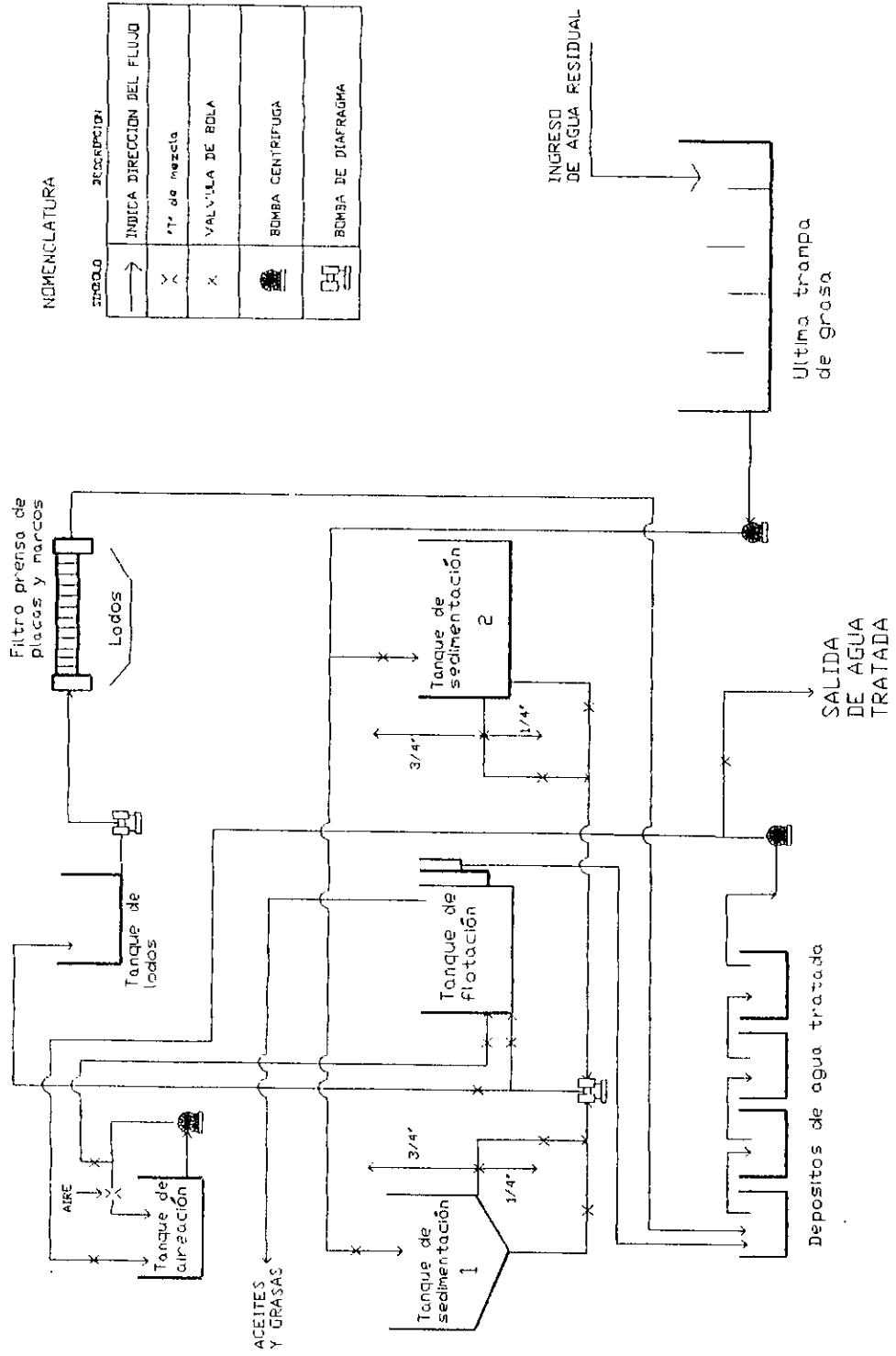
FIGURA 3: Trampa de grasa



SECCION LONGITUDINAL

# ANEXO 10

FIGURA 4: Diagrama de flujo del proceso de tratamiento

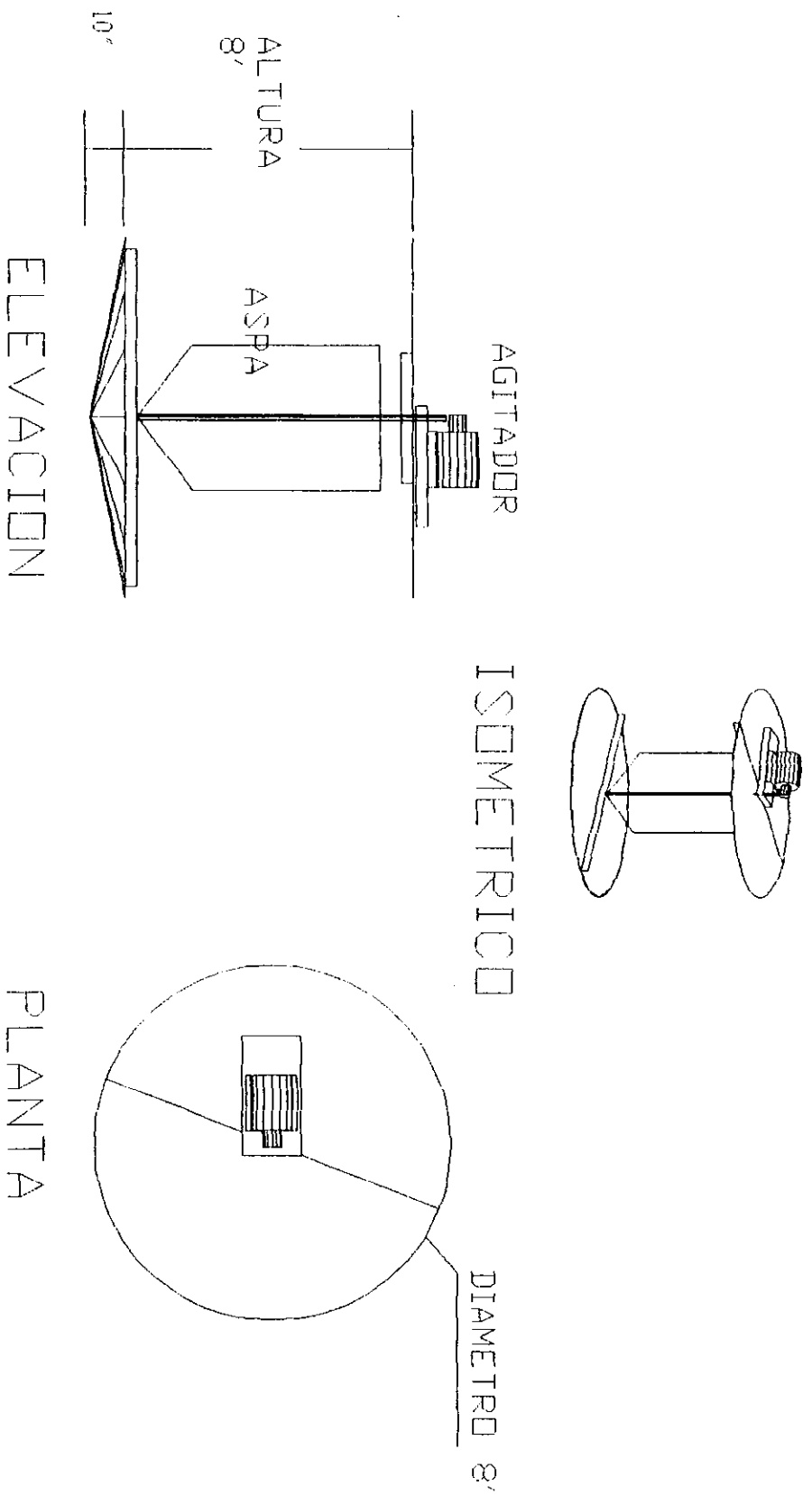


## NOMENCLATURA

ESTILO	RECEPCIÓN
→	INDICA DIRECCIÓN DEL FLUJO
<	1" de mezcla
x	VALVULA DE BOLA
	BOMBA CENTRIFUGA
	BOMBA DE DIAFRAGMA

ANEXO 11

FIGURA 5: Tanque de sedimentación 1



ANEXO 12

FIGURA 7: Tanque de sedimentación 2

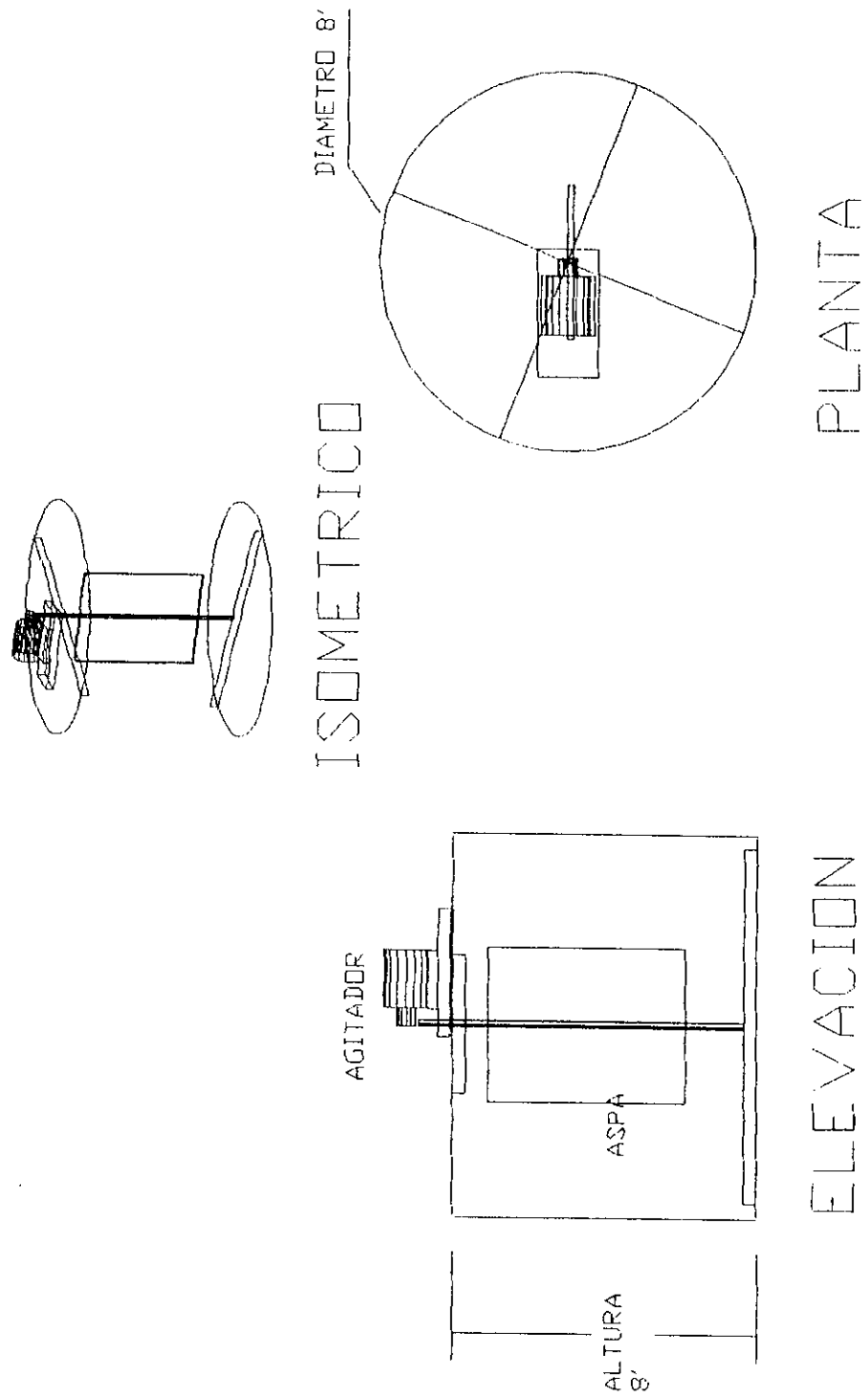
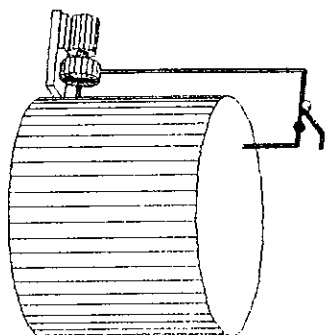
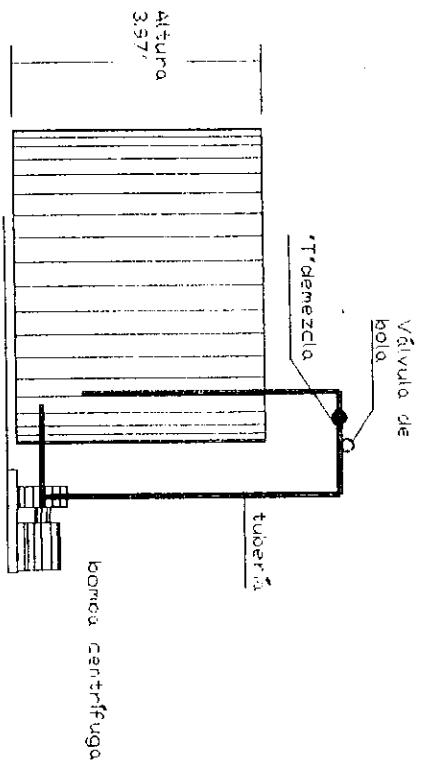


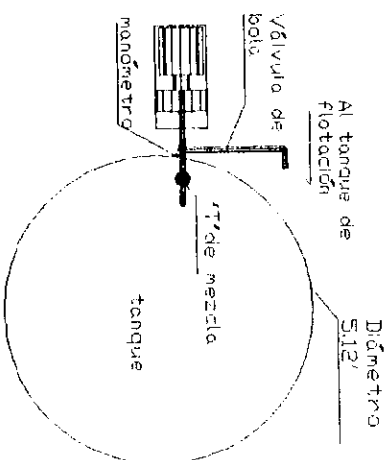
FIGURA 7: Tanque de aireación



ISOMETRICO



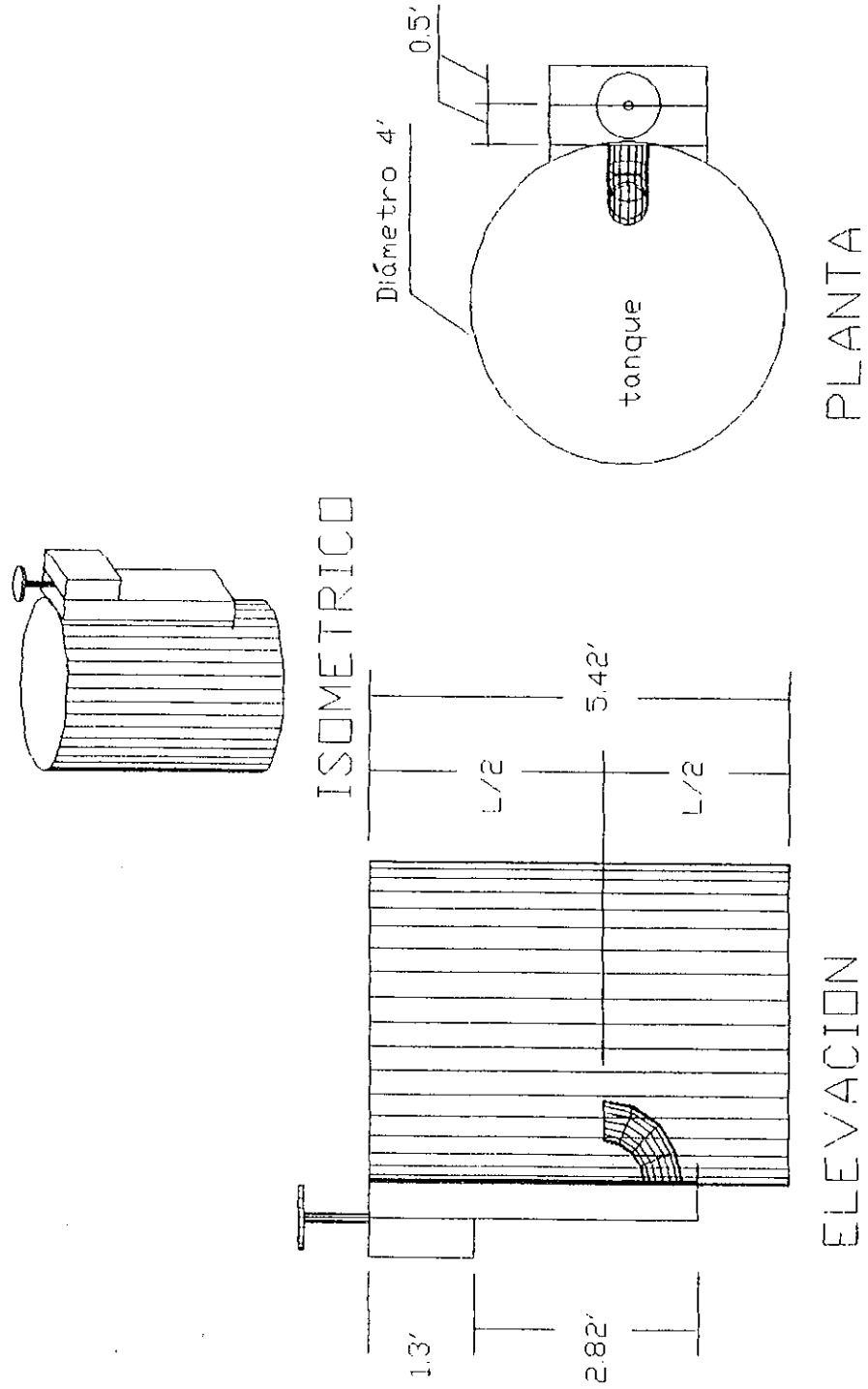
ELEVACION



PLANTA

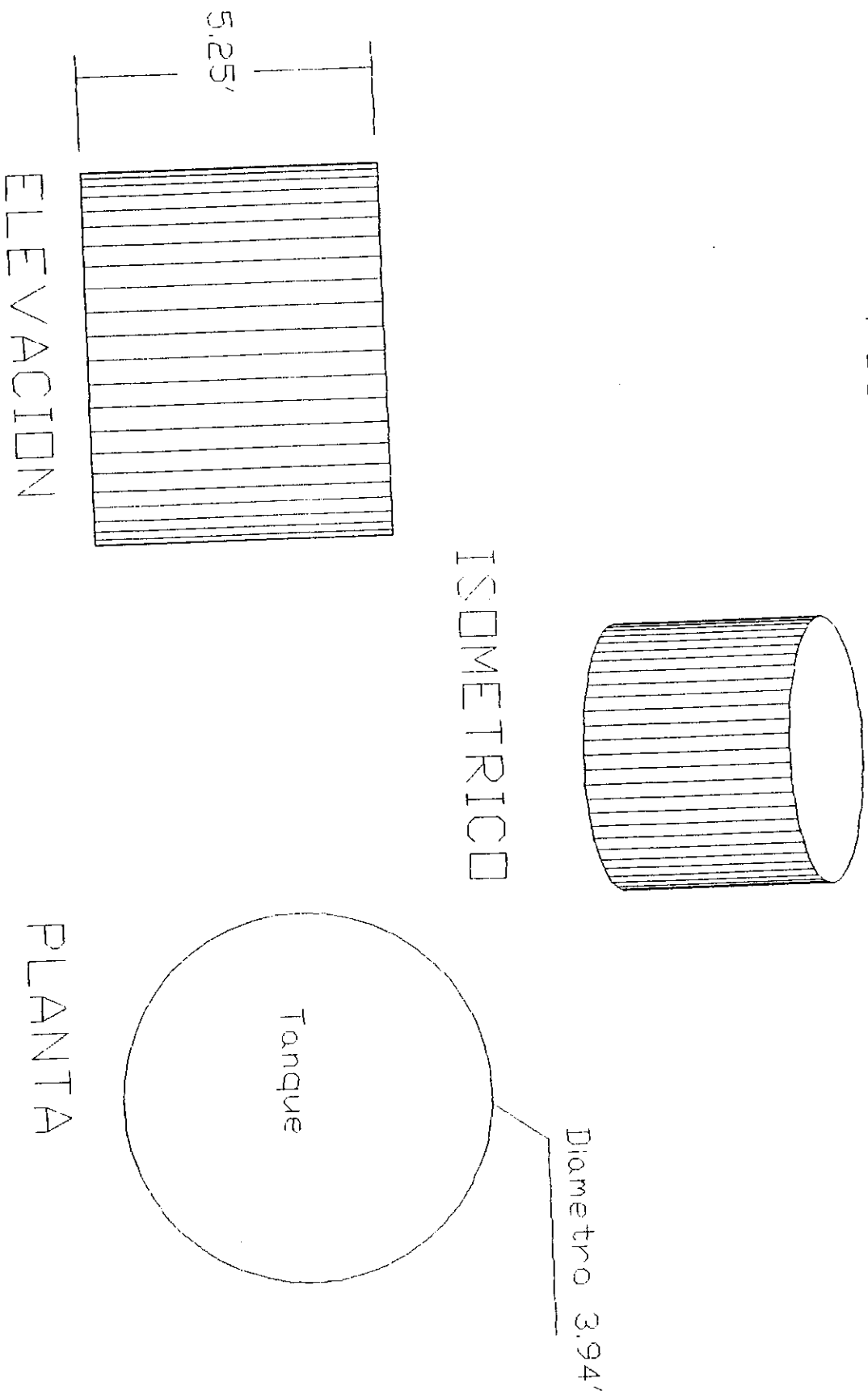
ANEXO 14

FIGURA 8: Tanque de flotación



ANEXO 15

FIGURA 9: Tanque de lodos



## ANEXO 16

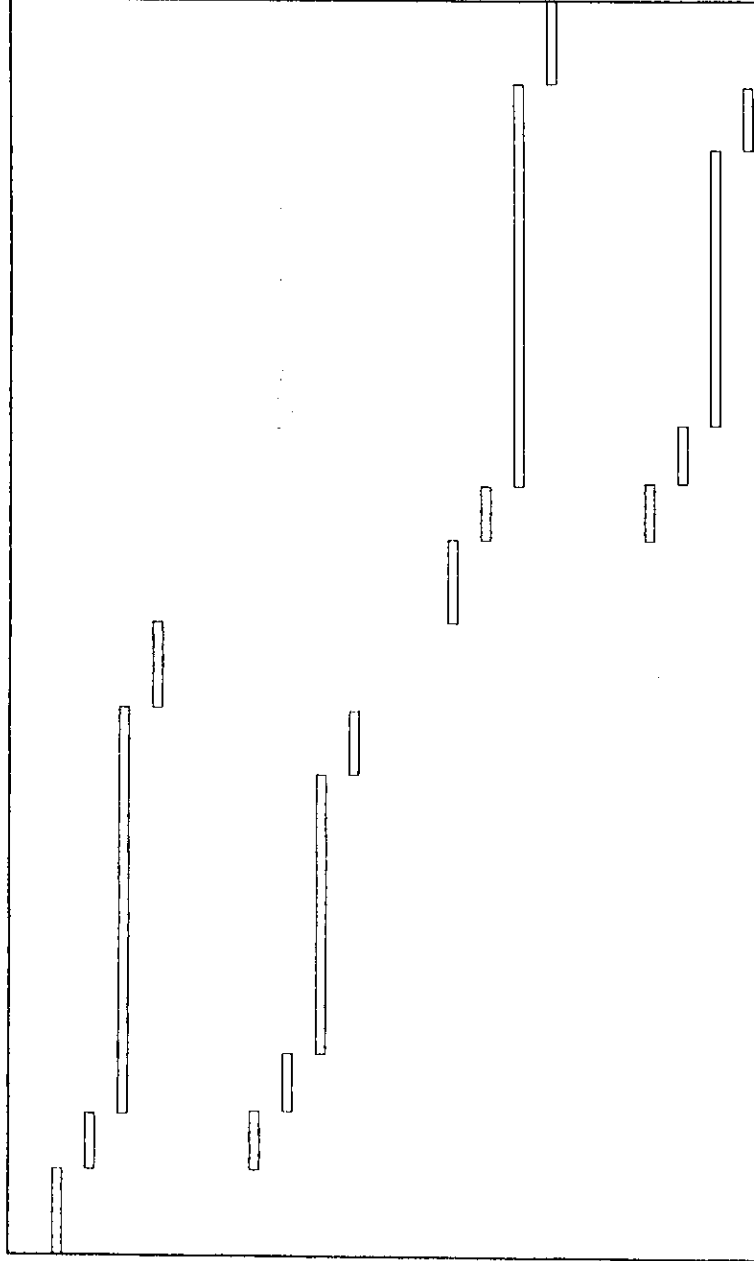
Figura 10: Diagrama de Gantt del balance del proceso

Bach #	Actividad	Duración
1	Llenado SI	48.43m
1	Aditivos SI	30.00m
1	Reposo SI	203.87m
1	Descarga SI	48.43m

Bach #	Actividad	Duración
2	Llenado SII	30.17m
2	Aditivos SII	30.00m
2	Reposo SII	143.53m
2	Descarga SII	30.17m

Bach #	Actividad	Duración
3	Llenado SI	48.43m
3	Aditivos SI	30.00m
3	Reposo SI	203.87m
3	Descarga SI	48.43m

Bach #	Actividad	Duración
4	Llenado SII	30.17m
4	Aditivos SII	30.00m
4	Reposo SII	143.53m
4	Descarga SII	30.17m



Simbología:

SI = Tanque de sedimentación I

SII = Tanque de sedimentación II

FIGURA 11: Vistas auxiliares de la planta de tratamiento

