

## Estudio técnico para mejoramiento del proceso de tratamiento de aguas oleosas descargadas al Río Teaone por la Central Termoesmeraldas II

Technical study to improve the treatment process for oily water discharged into the Teaone River by the Termoesmeraldas II Power Plant

**Karina Elizabeth Torres-Mendoza**

karina.torres.mendoza@utelvt.edu.ec  
<https://orcid.org/0000-0002-7673-3409>  
Universidad Técnica Luis Vargas Torres de  
Esmeraldas-Ecuador

**David Ricardo Macas-Mendoza**

david.macas.mendoza@utelvt.edu.ec  
<https://orcid.org/0000-0003-2913-5956>  
Facultad de Ingenierías de la Universidad Técnica  
Luis Vargas Torres de Esmeraldas-Ecuador

**Rosalba Mercedes Lara-Tambaco**

rosalba.lara@utelvt.edu.ec  
<https://orcid.org/0000-0001-5899-4261>  
Universidad Técnica Luis Vargas Torres de  
Esmeraldas-Ecuador

**María Elena León-Araujo**

maraujo6212@utm.edu.ec  
<https://orcid.org/0000-0003-2029-7107>  
Instituto de Posgrado, Maestría en Ingeniería  
Química Mención Procesos Químicos en la  
Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo-Ecuador

### RESUMEN

En la actualidad la conservación de los recursos hídricos es fundamental para preservar el medio ambiente y la vida de los diferentes ecosistemas y de los seres humanos. Las empresas a nivel global depositan sus efluentes en los cursos de los cuerpos hídricos, por tal motivo, se realiza este estudio técnico para mejorar el proceso de tratamiento de aguas oleosas que son descargadas al Río Teaone por la Central Termoesmeraldas II. Mediante el análisis experimental se determinan los análisis físico-químicos y microbiológicos del agua aceitosa, utilizando instrumentos como: pH-metro, conductímetro, colorímetro y varios reactivos. Posteriormente se procede a analizar y tabular los resultados. Con el análisis del caudal, la turbidez, pH, y sólidos totales disueltos se determinó que no cumple con la legislación ambiental ecuatoriana para descargar a un curso de agua dulce. Por tanto, se analizó el filtrado y el tiempo de sedimentación, observando que por gravedad no se lograría separar el agua del aceite, pero adicionando policloruro de aluminio se logra la separación por sedimentación de los flocos. De tal manera que con la prueba de tratabilidad se determinó que adicionando 70 mg/L se forman flocos y se puede separar el agua del aceite, por tanto, se sugiere a la empresa aplicar este procedimiento que mejorará la condición de las aguas oleosas descargadas al Río Teaone.

**Palabras claves:** Aguas Oleosas, Análisis Físico-Químicos, Ecosistemas.

### ABSTRACT

At present, the conservation of water resources is essential to preserve the environment and the life of different ecosystems and human beings. Companies at a global level deposit their effluents in the courses of water bodies, for this reason, this technical study is carried out to improve the process of treatment of oily waters that are discharged into the Teaone River by the Termoesmeraldas II Power Plant. Through experimental analysis, the physical-chemical and microbiological analyzes of oily water are determined, using instruments such as: pH-meter, conductivity meter, colorimeter and various reagents. Subsequently, the results are analyzed and tabulated. With the analysis of the flow, turbidity, pH, and total dissolved solids, it was determined that it does not comply with Ecuadorian environmental legislation to discharge into a freshwater course. Therefore, the filtrate and the sedimentation time were analyzed, noting that by gravity it would not be possible to separate the water from the oil, but by adding aluminum polychloride the separation by sedimentation of the flocs is achieved. In such a way that with the treatability test it was determined that by adding 70 mg/L flocs are formed and the water can be separated from the oil, therefore, it is suggested to the company to apply this procedure that will improve the condition of the oily waters discharged to the Teaone River.

**Keywords:** Oily Waters, Physical-Chemical Analysis, Ecosystems.

### INTRODUCCIÓN

Una central térmica es una instalación industrial empleada en la generación de energía eléctrica a partir de la energía liberada en forma de calor, normalmente mediante la combustión de combustibles fósiles como petróleo, gas natural o carbón. Este calor es empleado en el ciclo termodinámico convencional para mover un alternador y producir energía eléctrica. La Central Térmica Esmeraldas II genera energía a través de motores de combustión interna que aportan al sistema nacional interconectado del Ecuador 96 MW, para el desarrollo social y económico del país. A grandes rasgos, para generar electricidad con combustibles fósiles, éstos han de quemarse en presencia del oxígeno contenido en el aire. Este proceso de combustión permite liberar la energía contenida en el combustible en forma de calor, lo que origina gases muy calientes. La energía liberada se puede usar de dos maneras. En los motores de combustión interna, los gases calientes producidos por la combustión se comprimen y luego se usan directamente para accionar el generador eléctrico y los equipos auxiliares. El desarrollo de este proceso genera varios residuos contaminantes, tales como; aguas residuales oleosas, aguas residuales, emanación de gases tóxicos, producto de la combustión, entre otros.

El aceite lubricante y su calidad son de fundamental importancia en este tipo de centrales, ya que de su correcto manejo dependerá la vida útil-operativa y mecánica de las unidades electrógenas, por lo que es purificado constantemente.

Para la purificación del aceite lubricante antes de que ingrese a los motores se utiliza el proceso físico de "discos

centrífugos" que aprovecha la diferencias de densidades del aceite frente al agua con el fin de retirar las impurezas presentes en el aceite tales como; agua, hollín, material contaminante, lo que produce un residuo de aguas oleosas, a esto se debe sumar los residuos generados por procesos de purificación de los hidrocarburos, las mismas que deben ser tratadas, previo a su disposición final de acuerdo con la ley Ecuatoriana, la normativa aplicable es la de calidad ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua elaborada por el Ministerio del Ambiente.

Es por ello que las centrales térmicas deben contar con plantas de tratamientos de aguas oleosas, las cuales permitan controlar los parámetros correspondientes para garantizar su neutralización y minimizar el impacto ambiental generado por este tipo de industrias al realizar las descargadas en un cuerpo de agua dulce.

La Central Térmica Esmeraldas II, cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales aceitosas, pero por diversos factores tales como: inconsistencias en la ingeniería de diseño, capacidad limitada frente al proceso actual, saturación de los dispositivos filtrantes, falta de información técnica operacional por parte del fabricante, no se encuentra operativa.

A través de esta investigación se aportará con un "Estudio técnico para mejorar el proceso de tratamiento de aguas oleosas" para que se pueda devolver al río el agua y garantizar a la comunidad esmeraldeña que se encuentran dentro de los parámetros exigidos en la legislación ambiental ecuatoriana.

Para alcanzar este objetivo se debe analizar qué tipo de agua residual se tiene para posteriormente determinar el proceso de separación de agua y aceite por medio del proceso de coagulación floculación, determinación de las cantidades a usar y proponer el tratamiento para disposición final a estas aguas.

Dado que los ríos Esmeraldas y Teaone son las principales fuentes de agua dulce de la ciudad de Esmeraldas, es de vital importancia controlar de manera estricta todo tipo de descargas que se realicen en ellos y considerando que la Central Térmica Esmeraldas II cuenta con una planta de aguas oleosas concebida en su diseño original, luego de un proceso físico, realizaría descargas al río Teaone, se convierte en una necesidad indispensable la búsqueda de mecanismos que garanticen que dichas descargas cumplan con las características establecidas en la ley.

El funcionamiento deficiente de una planta de tratamiento de aguas oleosas trae consigo varios problemas, como son: ambientales, sociales y económicos; razón por la cual estas aguas se entregan a un gestor ambiental.

Si estas aguas en las condiciones actuales se depositarán en el río Teaone causarían daño a los ecosistemas aledaños que podrían incidir en las personas que se relacionan de manera directa e indirecta con estos recursos hídricos y sanciones que recibiría la empresa por incumplir con las normativas ambientales vigentes.

La importancia de este tema radica en que al optimizar el proceso de tratamiento de aguas oleosas se puede reducir los costos operativos, aumentar la eficiencia operativa e introducir procesos amigables con el entorno evitando la contaminación ambiental.

Además, es importante contar con una referencia técnica para las demás centrales del país que utilizan grupos electrógenos, basados en motores de combustión interna, lo que permitirá evaluar que tan eficiente es la planta de tratamiento de aguas oleosas de cada central.

Con el afán de mantener adecuados niveles de reserva en el mercado eléctrico nacional, en mayo del 2012 inicia la construcción de la Central Térmica Esmeraldas II, que se encuentra ubicada en la ciudad de Esmeraldas, parroquia Vuelta Larga, en el Km 7 1/2 de la vía Atacames, cuenta con una extensión aproximada de 205.617 m<sup>2</sup>, con una distribución de energía dispuesta en dos subestaciones: una de 69 Kv para servir a la ciudad de Esmeraldas y otra de 138 Kv para el Sistema Nacional Interconectado ([www.celec.gob.ec](http://www.celec.gob.ec)).

Esta central, que entró en operación comercial el 01 de agosto del 2014, genera 96 MW cuenta con: 12 motores de combustión interna de 8.35 MW cada uno, consume fuel oil N°6, cada unidad con su respectivo generador, 12 calderas de recuperación de gases, siete tanques para el almacenamiento de aceite, combustibles y aguas, plantas para el tratamiento de aguas residuales y aguas oleosas.

Existen numerosos tipos de aguas residuales, las aguas de abastecimiento, efluentes industriales consistentes en suspensiones coloidales, aguas residuales contaminadas con macromoléculas orgánicas disueltas o las emulsiones de aceite en agua susceptibles de ser tratadas mediante procesos: físicos, químicos, bioquímico, físico-químico, enzimático (Ruiz Carmona, 2018).

## **Bases Teórico-Científicas**

### **Aguas Contaminada**

Se define a la contaminación del agua como la acción y efecto de introducir materias, o formas de energía o inducir condiciones en el agua que de modo directo o indirecto impliquen una alteración perjudicial de su calidad en relación con los usos posteriores o con su función ecológica.

### **Aguas Residuales**

La FAO (Food and Agriculture Organization) define aguas residuales como: Agua que no tiene valor inmediato para el fin para el que se utilizó, ni para el propósito para el que se produjo debido a su calidad, cantidad o al momento en que se dispone de ella. No obstante, las aguas residuales de un usuario pueden servir de suministro para otro usuario en otro lugar.

### **Estudio Técnico**

Es la reunión y análisis de la información que permita:

- Verificar la posibilidad técnica de fabricar el producto.
- Determinar el efecto que tienen las variables del proyecto en su rentabilidad.

### **Fuentes de contaminación de los recursos hídricos**

Los recursos hídricos en general pueden ser contaminados por la disposición de los residuos sólidos, líquidos o gaseosos provenientes de residuos domésticos o industriales, por medio de fuentes puntuales y no puntuales. Esta investigación se centra en los residuos aceitosos de la empresa Central Esmeraldas II.

Las aguas se clasifican en:

**Aguas residuales o industriales:** Contienen casi todos los tipos de contaminantes (minerales, orgánicas, térmicos por las aguas de refrigeración. Estas aguas se vierten a ríos o mares tras una depuración parcial.

**Aguas Oleosas:** Las aguas con presencia de grasas y aceites básicamente procedente del proceso industrial se catalogan como contaminadas por aceites minerales sintéticos, son compuestos principalmente extraídos del petróleo y utilizados ampliamente en la industria como bases lubricantes.

Este es el nombre que toman las aguas residuales de la Central Esmeraldas II que son objeto de este estudio.

### **Tratamiento de las aguas residuales**

Se define el término tratamiento de agua al conjunto de operaciones unitarias de tipo físico, químico, físico-químico o biológico, bioquímico o enzimático, que se aplica de acuerdo con el fenómeno asociado a cada operación.

La finalidad es la reducción de la contaminación o las características no deseables de las aguas, por lo tanto, el objetivo del tratamiento de las aguas residuales es producir un efluente reutilizable en el ambiente.

### **Tratamiento físico en efluentes líquidos**

El tratamiento físico de las aguas oleosas hace referencia a un proceso mediante el cual se realiza un cambio de estado en la materia, el mismo que puede ser causado por la variación de la temperatura, o velocidad de rotación.

Los principales tratamientos físicos que se aplican sobre tratamientos de aguas oleosas son:

- Cambios de viscosidad por temperatura
- Aireación
- Filtración
- Centrifugación
- Decantación

Estas soluciones coloidales se presentan en industrias como la Central Esmeraldas II. Existen otros métodos físicos para el tratamiento de aguas aceitosas industriales y son:

- La evaporación: es un tratamiento común para volúmenes de bajos a moderados de agua aceitosa. Este método es efectivo, utiliza calor para evaporar el agua del fluido y concentrar el aceite. Se evita la descarga en la tubería.
- Otros métodos de tratamiento físico comunes son la separación con membrana. Hay dos tipos de tratamiento mediante separación con membrana, Ultrafiltración (UF) y Ósmosis Inversa (OI).
- La UF utiliza una membrana para separar el aceite y el material pesado de moléculas grandes del agua para suministrar un efluente de calidad aceptable a las tuberías de descarga. La UF se utiliza para volúmenes de agua residual de aproximadamente 50 a 15,000 galones por día.

- La UF es un proceso relativamente simple y consistente para el tratamiento de agua aceitosa en plantas que necesitan mejorar la calidad del efluente. Se utiliza un tratamiento secundario, utilizando Ósmosis Inversa.
- Los efluentes de ambos métodos normalmente no son reutilizados.

### **Tratamiento Químico**

El tratamiento químico usa varios químicos inorgánicos (por ej.: sulfato de aluminio o cloruro de hierro) o químicos orgánicos (por ej.: polímeros catiónicos o aniónicos) para desestabilizar o romper las emulsiones de aguas residuales.

El tratamiento químico puede utilizarse para volúmenes de aguas residuales desde 50 hasta un millón de galones por día, sin embargo, generalmente es mejor la relación costo beneficio para volúmenes más grandes. El tratamiento químico es efectivo para tratar y remover metales en aguas residuales aceitosas.

El tratamiento químico de las aguas oleosas generalmente se aplica como un proceso secundario para mejorar la calidad de agua a ser descargada, en este tratamiento se da lugar a la formación de diferentes reacciones químicas causadas por compuesto que alteran la estructura de las aguas oleosas.

Entre los tratamientos químicos más utilizados tenemos:

- Clarificación
- Aislamiento de grasas
- Saponificación
- Neutralización
- Oxigenación

### **Tratamiento Físico-Químico**

La conjugación de los tratamientos físicos y químicos, ampliamente difundidos como tratamientos físico-químicos optimiza los procesos y reducen significativamente los costos operativos de las plantas destinada al tratamiento de aguas oleosas

### **Tratamiento Biológico**

El alto contenido de orgánicos de la mayoría de los fluidos para trabajo de metales los hace buenos candidatos para la degradación por bacterias. Sin embargo, el alto contenido de aceite de estos fluidos elimina el uso de tratamiento biológico como método principal de tratamiento. Un proceso de tratamiento químico o biológico precede el uso del tratamiento biológico.

El tratamiento biológico es un excelente tratamiento secundario o terciario de la reducción de orgánicos en los fluidos.

Este tipo de tratamiento generalmente es utilizado por la gestión ambiental y aunque su costo es relativamente bajo, también requiere de un cuidado especial, ya que se ve alterado por variables ambientales.

El tratamiento biológico para las aguas oleosas implica de agentes orgánicos capaces de reducir las trazas de aceite presente en el agua.

Es muy conocido que el aceite y el agua no se mezclan, pero pueden existir como emulsión. Si se permite que repose la emulsión, se separará, porque el aceite es menos denso que el agua, aunque cierta cantidad de glóbulos permanecerán en el agua. Es preciso acotar que si la concentración de aceite es inferior al 50 % en agua será en fluido que quede en suspensión, y el aceite será el glóbulo.

Los métodos más utilizados para la separación de agua/aceite son:

- Centrifugadora
- Filtro de vacío en tambor rotatorio
- Flotación por aire disuelto
- Placa clarificadora en pendiente
- Tratamiento biológico
- Evaporadores
- Separación por gravedad, método usado en la central Esmeraldas II.

## Soluciones Coloidales

Autores como Ruiz, (2007), indica que las soluciones coloidales se caracterizan por estar constituidas por una dispersión de partículas sólidas o líquidas en agua y que son difíciles de eliminar utilizando procedimientos como pueden ser gravedad, filtración y otros.

El tamaño de las partículas oscila entre 0.01 a 5 micras y son bastante estables de tal forma que pueden permanecer en dicha condición por bastante tiempo. Esta estabilidad se logra mediante un fenómeno físico-químico de cargas eléctricas entre las partículas dispersas y se explica de acuerdo a la teoría de doble capa conocida como Teoría DLVO (Derjaquin, Oberbeek, Verwery, & Landau)

Prácticamente en la mayor parte de las industrias se pueden presentar este tipo diluciones sobre todo cuando existen compuestos del tipo emulsificantes, los que favorecen la formación de soluciones coloidales que en el caso de ser de partículas líquidas se conocen como emulsiones.

## Coagulación y floculación

Se llama coagulación/floculación al proceso por el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas con peso específico superior al del agua llamadas flocs. Dicho proceso se usa para:

- a) Remoción de turbiedad orgánica o inorgánica que no puede sedimentar rápidamente.
- b) Remoción de color verdadero y aparente.
- c) Eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación.
- d) Destrucción de algas y plancton en general.
- e) Eliminación de sustancias productoras de sabor y olor en algunos casos y de precipitados químicos suspendidos o compuestos orgánicos en otros.

El uso de cualquier otro proceso, como la sedimentación simple, para la remoción de partículas muy finas, resulta antieconómico, si no es imposible.

Hay que distinguir dos aspectos fundamentales en la coagulación/floculación del agua:

- a) La desestabilización de las partículas suspendidas, es decir la remoción de las fuerzas que las mantiene separadas.
- b) El transporte de ellas dentro del líquido para que hagan contacto, generalmente estableciendo puentes entre sí y formando una malla tridimensional de coágulos porosos.

## Coagulación

Comienza en el mismo instante en que se agregan los coagulantes al agua y dura solamente fracciones de segundo. Básicamente consiste en una serie de reacciones físicas y químicas entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma.

## Floculación

Es el fenómeno por el cual las partículas ya desestabilizadas chocan unas a otras para formar coágulos mayores. Tres mecanismos pueden actuar en el primer fenómeno: El de adsorción – desestabilización basada en las fuerzas electrostáticas de atracción y repulsión, el del puente químico que establece una relación de dependencia entre las fuerzas químicas y la superficie de los coloides, y el de sobre saturación de la concentración de coagulantes en el agua.

En el segundo aspecto debe distinguirse entre: floculación ortocinética y pericinetica, o con escala de turbulencia por encima o por debajo de la micro escala de Kolmogorov.

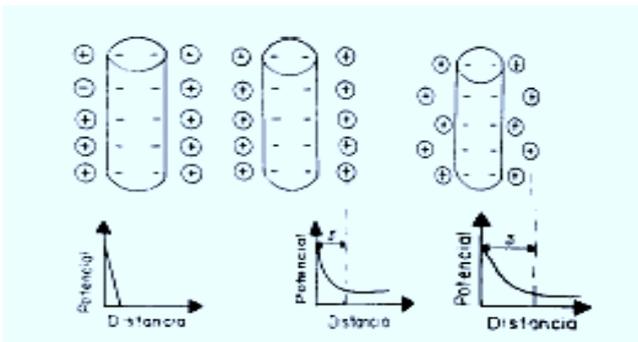
La primera es la inducida por la energía comunicada al líquido por fuerzas externas (paletas giratorias, por ej.). La segunda es la promovida, internamente dentro del líquido, por el movimiento de agitación que en las partículas tiene dentro de aquel (Movimiento browniano), que se realiza en un tiempo muy corto después de desestabilizada la partícula hasta que la partícula tiene un tamaño que se acerca a la micro escala de Kolmogorov. En las plantas de tratamiento de floculación es tanto pericinetica.

**Tabla 1.** Floculación/ Coagulación

<b>Desestabilización de partículas (coagulación)</b>	<b>Adsorción – neutralización</b>	
	Puente químico	
<b>Transporte de partículas (floculación)</b>	Sobresaturación	
	Ortocinético (>n)	Creado en el líquido por el gradiente de velocidad
	Pericínético (<n)	Por movimiento browniano
		Por sedimentación

Fuente: (Valencia, 2000).

**Figura 1.** Mecanismos de adsorción y neutralización.



Fuente: (Valencia, 2000)

Las fuerzas electrostáticas existentes en las partículas, rodean a estas de una doble capa eléctrica que interacciona con la fase acuosa. Para explicar este concepto, se han presentado, sucesivamente, tres teorías:

- La primera supone que acudirán a la superficie del coloide, tantos iones positivos del medio dispersante cuantos sean necesarios para dispersar su carga (ver figura 2.1.). Se formará una capa adherida alrededor de él, en la que caerá todo el potencial  $\psi$ . Esta teoría fue inicialmente propuesta Helmholtz en 1879 y analizada por Nernst diez años más tarde.
- Gouy 1910 y Chapman en 1913 demostraron que la teoría de Helmholtz-Nernst, no era adecuada pues la agitación térmica del líquido tiende a separarlos contra iones de la superficie del coloide y van a formar una capa difusa alrededor de ella en la que el potencial cae lentamente prolongándose hasta una distancia  $\delta$  dentro del líquido que la rodea (ver Figura 1.)
- En 1924, Stern mostró que era necesario aceptar la posibilidad de la coexistencia de las teorías de Helmholtz y las de Gouy, considerando la formación de una capa adherida y una capa difusa alrededor del coloide (ver Figura 1).

**Potenciales del coloide**

En un coloide se deben tener en cuenta, los siguientes potenciales:

1. El potencial  $\psi$  que existe en la superficie del coloide, o potencial Nernst.
2. El potencial  $\phi$  que existe en la superficie interior de la doble capa, donde empieza la parte difusa.
3. El potencial Z que existe en el plano de cizalla.

El plano de cizalla es el que separa del resto de la dispersión, la sección de la capa que se mueve con la partícula formando parte integral de ella; y está situado en algún punto, entre la superficie interior y la superficie exterior de la doble capa.

Como no se puede separar el coloide del contra iones que lo rodean, el único potencial que se puede determinar con más o menos precisión es el potencial Z o sea el potencial de la superficie del plano de cizalla.

**Potencial Zeta (Z)**

La teoría de la doble capa no está aun totalmente completa. La simplificación hecha por Helmholtz en 1879 da, sin

embargo, una mayor compresión del fenómeno.

Helmholtz asimila la doble capa a un condensador de dos cargas iguales y opuestas, separadas por el espesor. Si las cargas son iguales a  $q$  el potencial de dicho condensador es la potencial zeta,  $Z$ . De acuerdo con la electrostática este potencial varía con la constante dieléctrica  $D_c$  y bien expresado por la fórmula:

Ecuación: 1

$$Z = 4 \pi \frac{\delta}{D_c} q$$

Donde:

$$q\delta = \frac{Z D_c}{4\pi}$$

El producto  $q\delta$ , es decir la carga de la partícula por la distancia hasta la cual se le considera efectiva, es llamado el momento eléctrico del coloide, y ha sido determinado experimentalmente partiendo del valor de la constante eléctrica.

### Coagulación por neutralización de la carga

La neutralización de las cargas de coloides liofóbicos, puede hacerse según Mackrle:

- a) Por cambio de la concentración de los iones que determinan el potencial del coloide.
- b) Por la absorción de iones que posean una carga opuesta a la de los iones determinantes del potencial, y que sean capaces de remplazar a estos en la capa de Stern.

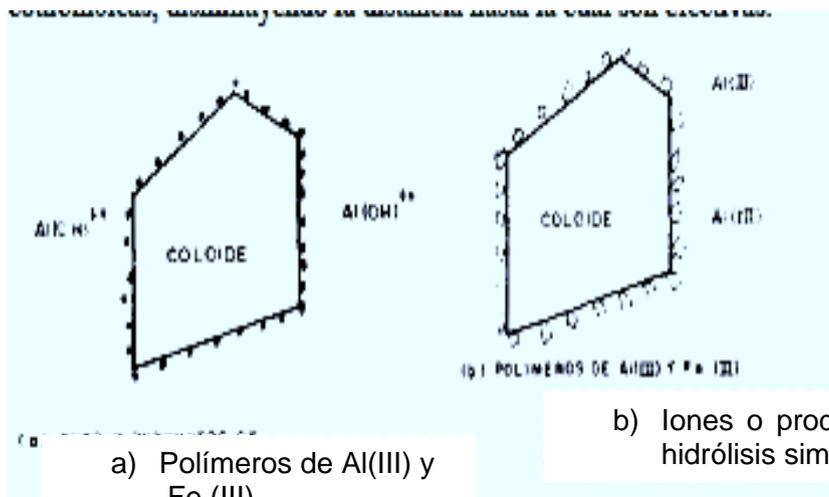
Los coloides pueden absorber (ver figura 2.0):

- a) Iones o productos de hidrólisis simples como el hidróxido de aluminio o el hidróxido de hierro con pesos moleculares entre 44 y 135 que se forman al inicio de la coagulación.
- b) Polímeros formados poco más tarde, al continuar las reacciones hidrolíticas del coagulante con la alcalinidad y con el agua misma. Estas moléculas alcanzan pesos entre 256 (hidróxido de aluminio) y 1430 (hidróxido de hierro).

### Coagulación por compresión de la doble capa

Incrementando la concentración del electrolito se incorporan contra iones en la capa difusa, con la cual esta se represa y se disminuye la magnitud de las fuerzas repulsivas, permitiendo la eliminación de la barrera de energía, por eso, la adición de una sal neutra no cambia el potencial del coloide, pero altera la forma de la curva de las fuerzas coulombicas, disminuyendo la distancia hasta la cual son efectivas.

Figura 2. Adsorción de contraiones en la partícula coloidal.



a) Polímeros de Al(III) y Fe(III)

b) Iones o producto de hidrólisis simple

Fuente: (Valencia, 2000)

La reducción del espesor de la doble capa, sin embargo, es más importante que la reducción del potencial Zeta, hasta el punto isoeléctrico ( $Z = 0$ ).

La adsorción de contra iones puede ser un fenómeno electrostático o químico. Si el fenómeno es puramente electrostático, y lo que se agrega son contra iones, en la capa difusa, los iones más pequeños podrán acercarse más a la superficie de la partícula y no se fijarán a puntos de absorción determinados, sino que flotarán libremente a su alrededor en

este caso:

- a) La coagulación se produce cuando el potencial Zeta se hace cero.
- b) El exceso de coagulantes agregados no puede producir estabilización de la suspensión, pues los coloides no pueden adsorber más contra iones de los que su carga primaria lo permite.
- c) Entre mayor sea la carga del contra ion más disminuirá la carga del coloide.

Esto se debe que mientras más fuerte sea la carga eléctrica del contra ion, más rápidamente neutraliza la partícula. Ahora bien, como los productos de la hidrólisis del Al (III) y el Fe (III) tienen cargas que van desde +5 hasta -1, la cantidad de coagulante que debe ser agregado a una suspensión dependerá más de la carga de los productos de hidrólisis que se formen que del número de partículas que de la suspensión.

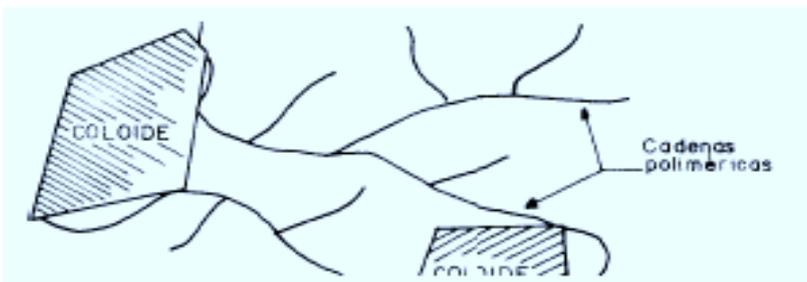
### Coagulación por puente químico

Si la adsorción de contraiones es debida a fuerzas químicas se establecerán enlaces de hidrógeno, covalentes, iónicos, etc. Entre las moléculas adsorbidas y las superficies de los coloides, en cuyo caso estas quedarán adheridas a puntos fijos de adsorción y su número podrá aumentar hasta cambiar la carga del coloide (de negativo a positivo) con lo que se producirá su estabilización. Por otra parte, entre más puntos de adsorción disponibles haya (más superficie que cubrir) más moléculas capaces de ser adsorbidas (coagulantes) hay que agregar y serán más fácilmente adsorbidos los polímeros grandes que los pequeños.

Esto explica porque no siempre la coagulación se realiza a  $Z = 0$  y puede incluso no producirse, si las dosis son muy altas: debido a que en lugar de adsorción electrostática se ha producido adsorción química.

Las moléculas poliméricas de alto peso molecular pueden ser adsorbidas químicamente en las partículas coloidales (ver figura 3).

**Figura 3.** Adsorción de polímero en una partícula de caolinita.



Fuente: (Valencia, 2000)

En este caso la coagulación no está mayormente influenciada por las fuerzas electrostáticas, sino por el fenómeno coloide en uno o más puntos fijos de adsorción, dejando el resto de la cadena libre, de forma que pueda flotar en el líquido y adherirse a otro coloide. Se forma así un puente molecular que une una partícula con otra. La repetición de este fenómeno entre diversas partículas es lo que permite la aglutinación de ellas en masas llamadas flocs.

**Tabla 2.** Clases de coagulación.

Clase	Modo	Tipo de Adsorción
<b>Adsorción-Desestabilización</b>	Neutralización de las cargas Compresión del doble lecho	Adsorción Electrostática Adsorción Química
<b>Puente Químico</b>	Unión de partículas por medio de cadenas poliméricas	Adsorción Química
<b>Incorporación</b>	Producción de precipitado químico	No hay

Fuente: (Valencia, 2000)

Cuando la coagulación es pobre o no se produzca cuando se pone un exceso de polímeros. Pues en este caso, todos los sitios de adsorción pueden quedar cubiertos, lo que estabiliza las partículas sin que tal cosa signifique reinversión del

potencial Z.

Por otra parte, dentro de determinadas condiciones, una suspensión desestabilizada puede estabilizarse de nuevo si es sometida a una agitación violenta, puesto que las partículas llegan a quedar totalmente cubiertas por el polímero, al doblarse las cadenas poliméricas sobre sí mismas y ocupar otros sitios en el mismo coloide al cual se han adherido.

### **Coagulación por incorporación (o de barrido)**

La coagulación por incorporación se produce cuando se agrega una concentración de coagulantes tan alta, que se excede el límite de solubilidad de ese compuesto en el agua. En ese momento se precipitan los hidróxidos que se forman por reacción de la alcalinidad y el agua misma con los coagulantes, con lo que induce la producción de una masa esponjosa (flocs de barrido) que atrapa en su caída a los coloides y partículas suspendidas las cuales se ven forzadas a decantar, incorporadas dentro del precipitado que desciende.

Este tipo de remoción de turbiedad, no es una verdadera coagulación, pero es la que más frecuentemente se produce, debido a que, en la práctica, las dosis que se usan están por encima del límite de solubilidad de los hidróxidos de aluminio o hierro en el agua, a los pH y temperaturas normales de trabajo.

La coagulación por incorporación no excluye, sin embargo, la posibilidad de que simultáneamente se produzca también, es parte o en etapa inicial, coagulación por puente químico, e incluso coagulación por adsorción-neutralización. La coagulación corriente, se realiza por medio de diferentes mecanismos que se sobreponen y complementan.

Para poder conocer qué tipo de coagulación se produce, suelen utilizarse los llamados diagramas de coagulación.

### **Coagulantes**

Los coagulantes los podemos clasificar en dos grupos: Los polielectrolitos o ayudantes de coagulación y los coagulantes metálicos. Ambos grupos básicamente actúan como polímeros además de la carga eléctrica que poseen. En los polímeros, las cadenas poliméricas están ya formadas cuando se los agrega al agua. En los segundos, la polimerización se inicia cuando se pone el coagulante en el agua, después de lo cual viene la etapa de adsorción por los coloides presentes en la fase acuosa.

Es, sin embargo, necesario observar que la velocidad de sedimentación de las partículas coaguladas no dependen en forma exclusiva de los coagulantes usados sino del peso de las partículas que se trata de sedimentar (Coronel , 2004).

### **Coagulantes y floculantes poliméricos (Polielectrolitos)**

Un polímero puede definirse como sustancia formada por una cantidad de unidades básicas, llamadas monómeros, unidades por enlaces covalentes que se repiten sucesivamente. Su grado de polimerización está dado por el número de monómeros que conforman su cadena polimérica (Coronel , 2004).

El tipo de polímeros que se formen depende de la naturaleza de los grupos funcionales que lo integran. Todos los monómeros capaces de formar polímeros deben tener por lo menos dos núcleos activos para que la macromolécula formada pueda conservar su configuración inicial. Cuando las cadenas poliméricas tienen múltiples grupos funcionales activos se denominan polielectrolitos. Los que se usan en plantas de tratamiento son compuestos de alto peso molecular (104 a 107) que se aplican en pequeñas concentraciones (0.01 a 1.0mg/L) lo que compensa parcialmente su alto precio (Coronel , 2004).

La razón para usar bajas dosis está es la cantidad tan enorme de segmentos que ellos poseen. La poliacrilamida, con un peso molecular de  $5.5 \times 10^6$ g/mol, produce 1013 segmentos por litro de agua con una dosis de 0.1mg/L.

De la investigación realizada sobre este tipo de sustancias, se desprenden las siguientes conclusiones prácticas, entre otras:

1. Los polielectrolitos usados en unión de coagulantes metálicos comunes, se producen un flocs que sedimenta rápidamente.
2. Con ciertas aguas, la dosificación de polielectrolitos en pequeñas cantidades reduce el gasto de coagulante.
3. Las algas son rápidamente coaguladas con polielectrolitos catiónicos.
4. Todos los polielectrolitos no son igualmente efectivos con todas las aguas.
5. Dosis excesivas de polielectrolitos producen dispersión en lugar de ayudar a la coagulación.
6. Deben los polielectrolitos añadirse en forma de solución diluida para asegurar una completa mezcla (Coronel , 2004).

### **Clasificación de los polielectrolitos**

Los polielectrolitos de importancia en el tratamiento de agua pueden clasificarse así:

**Tabla 3.** Clasificación de los polielectrolitos.

Según su origen	Según su carga	
Polímeros naturales	Iónicos	Catiónicos Aniónicos
Polímeros sintéticos	No iónicos	

Fuente: (Valencia, 2000)

### Polímeros naturales

Son los que se producen en las reacciones bioquímicas naturales de animales y plantas, tales como proteínas, carbohidratos y polisacáridos (almidón, glucósidos). Muchos de estos componentes tienen propiedades coagulantes o floculantes y son usados por los nativos en forma empírica para clarificar el agua, como pasa con la penca de la tuna o nopal o con las semillas del nirmalí.

Los que han dado mejor rendimiento y vale la pena considerarlos para su uso en plantas de tratamiento son: los compuestos algínicos, los derivados de la tuna o nopal y los almidones.

Los componentes algínicos (alginato de sodio, ácido algínico) son obtenidos de algas marinas (algas pardas), los cuales contienen polisacáridos ampliamente utilizados en la industria, especialmente en productos farmacéuticos, alimenticios, textiles. Por eso, su empleo como coagulante o floculante consumiría solamente una fracción de su producción total. Su eficiencia a este respecto, ha sido comprobada repetidas veces por varios investigadores.

Los derivados de la tuna o nopal son polvos blancos solubles en agua que se extraen con relativa facilidad. Han sido probados con agua turbia artificial y natural y han dado resultados comparables o mejores que los de los polímeros sintéticos. Su producción no ha sido hecha en escala industrial hasta el momento.

Los almidones presentan una amplia gama de posibilidades. Su problema consiste en producir a partir de ellos compuestos solubles en agua. Algunas marcas comerciales de polielectrolitos son simples derivados de almidones. Una de las ventajas de los polielectrolitos naturales es su baja toxicidad pues en muchos casos son empleados como alimentos o aditivos alimenticios.

### Polímeros sintéticos

Son compuestos orgánicos producidos por medio de la transformación química de derivados del carbón y del petróleo. Incluye la mayoría de los polímeros manufacturados por la industria y de mayor venta comercial. Muchos, aunque no todos, se encuentran en forma de polvo seco. Otros son líquidos con concentraciones del 10% al 60 % de polímeros activos.

Se considera que el 90% de ellos tienen como monómero básico la acrilamida:

La poliacrilamida es típicamente un polímero no iónico que puede manejarse en forma muy variada. Esto tiene la ventaja de que permite sintetizar una gran variedad de compuestos, con distintas propiedades y aplicaciones.

Uno de los más antiguos polielectrolitos sintéticos usados es la sílica activada, que se prepara haciendo reaccionar una solución diluida de silicato de sodio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  con cualquiera de los siguientes compuestos: ácido sulfúrico o silicato de sodio, solución de sulfato de aluminio, sulfato de amonio, cloro, bicarbonato de sodio, o bióxido de carbono. Estos compuestos se denominan agentes activadores y son los que promueven la polimerización del  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . La extensión de este proceso depende del porcentaje de neutralización del silicato de sodio y se incrementa con el tiempo. Si se deja que se complete, se forma un gel o pasta que puede taponar los conductos en el sistema de dosificación, lo que crea serios problemas operativos. Este es el motivo por el cual este polímero no se usa hoy en día.

En la actualidad existen más de 100 marcas comerciales de polielectrolitos sintéticos aprobados para su uso en agua potable. Pero hay muchos más cuya toxicidad es alta, debido a que se producen con monómeros que pueden causar serios daños a la salud y no deben por eso utilizarse nunca en plantas de tratamiento de agua.

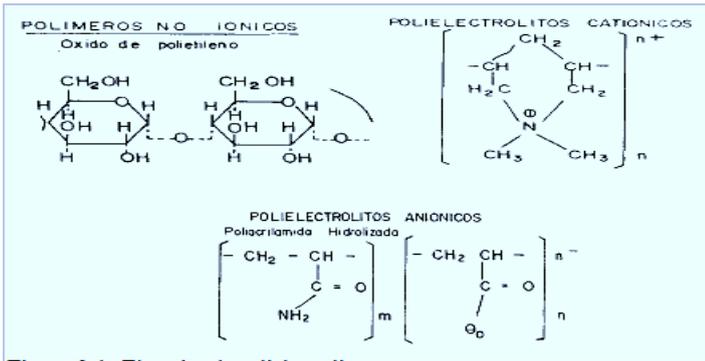
### Clasificación de los polímeros de acuerdo a su carga

Un polímero puede tener o no carga eléctrica. Los que no la tienen se llaman no iónicos, los que la tienen pueden ser catiónicos (carga positiva) o aniónicos (carga negativa) y, debido a la multiplicidad de grupos iónicos presentes en las cadenas poliméricas, reciben el nombre genérico de polielectrolitos.

Los derivados de la poliacrilamida son no iónicos y los de la poliacrilamida hidrolizada son aniónicos.

Los compuestos catiónicos son usualmente derivados de amonio cuaternario o de imina de polietileno, (ver Figura 4.) a continuación algunos ejemplos:

**Figura 4. Ejemplos de polielectrolitos**



Fuente: (Valencia, 2000)

**Regulaciones legales**

**Regulaciones por el MAE**

En el libro VI anexo 1, numeral 4.2.1.6 expresa que: Las aguas residuales que no cumplan previamente a su descarga, con los parámetros establecidos de descarga en esta Norma, deberán ser tratadas mediante tratamiento convencional, sea cual fuere su origen: público o privado. Por lo tanto, los sistemas de tratamiento deben ser modulares para evitar la falta absoluta de tratamiento de las aguas residuales en caso de paralización de una de las unidades, por falla o mantenimiento (Ministerio del Ambiente del Ecuador ).

**Tabla 4. Parámetros de monitoreo de las descargas industriales**

Actividad Industrial de Industrias Manufactureras	Parámetros de Monitoreo
<b>4010</b> Generación, Transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica	Caudal, DBO, DQO, SST, SAAM, Grasas y aceites, Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP), Cadmio (Cd), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Cinc (Zn), PCB

Fuente: ANEXO VI, TULSMA, TABLA.12, Reforma 28-02-2014

**Tabla 5. Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce**

Parámetros	Expresado como	Unidad	Limite Max. Permissible
<b>DBO<sub>5</sub></b>	Demanda bioquímica de oxígeno (5 días)	mg/l	100
<b>DQO</b>	Demanda química de oxígeno	mg/l	20,0
<b>SST</b>	Sólidos Suspendidos Totales	mg/l	130,0
<b>SAAM</b>			
<b>GRASAS Y ACEITES</b>	Sustancia Soluble en hexano	mg/l	30,0
<b>HIDROCARBUROS TOTALES DE PETRÓLEO(HTP)</b>	Hidrocarburos Totales de Petróleo	mg/l	20,0
<b>CADMIO</b>	(Cd)	mg/l	0,02
<b>NIQUEL</b>	(Ni)	mg/l	2,0
<b>PLOMO</b>	(Pb)	mg/l	0,2
<b>CINC</b>	(Zn)	mg/l	5,0

Fuente: ANEXO VI, TULSMA, TABLA.10, Reforma 28-02-2015

## **Regulaciones por Consejo Nacional de Electricidad**

El CONELEC (Consejo Nacional de Electricidad) en su Reglamento Ambiental para actividades Eléctricas, en el Art. 15 literal c, establece lo siguiente:

Art. 15 Límites permisibles y otros parámetros: Las personas naturales o jurídicas autorizadas por el CONELEC para realizar actividades de generación, transmisión o distribución de energía eléctrica están obligadas a tomar medidas técnicas y operativas, con el fin de que el contenido contaminante de las emisiones y descargas provenientes de sus actividades no superen los límites permisibles establecidos en las normas nacionales y seccionales de protección ambiental y de control de la contaminación, tales como:

Descargas al agua: Las descargas de residuos líquidos deberán cumplir con las normas contempladas en el Reglamento para la prevención y control de la contaminación ambiental en lo relativo al recurso agua, publicado en el Registro Oficial 204 del 5 de junio de 1989.

### **Ordenanza que reglamenta la recolección, transporte y disposición final de aceites usados en el cantón Esmeraldas.**

Aprobada por el I. Concejo Cantonal de Esmeraldas en sesiones ordinarias del miércoles 22 de octubre y martes 11 de noviembre del 2008.

En el capítulo 1, art. 4 se dispone:

d. Los aceites minerales, sintéticos, grasas lubricantes y solventes hidrocarburoados; generados en el establecimiento, deberán ser recolectados y dispuestos por separado y previo a un proceso de filtrado primario, en tanques de almacenamiento debidamente identificados, etiquetados, y protegidos de la lluvia.

e. Los generadores deberán entregar los residuos de aceites y grasas lubricantes y solventes hidrocarburoados contaminados al gestor ambiental. El generador deberá contar con las facilidades para la recolección y acceso al gestor ambiental, el cual realizará el retiro sin costo alguno.

f. Los generadores no podrán comercializar o disponer de los aceites y grasas lubricantes usados, solventes hidrocarburoados contaminados, ni mezclarlos con aceites térmicos o dieléctricos, diluirlos, y tampoco deberán quemarlos en mezclas con diesel o bunker a temperaturas inferiores a los 1200 grados centígrados (o Celsius o el equivalente en grados Fahrenheit).

Art.- 6.- Toda persona natural o jurídica, pública o privada que importe, comercialice aceites lubricantes minerales o sintéticos y grasas industriales, deberá dentro del plazo de 90 días calendarios, contados a partir de la vigencia de esta normativa, disponer en cada uno de sus establecimientos, tanques para el almacenamiento debidamente protegidos de la lluvia, identificados y señalados.

## **TÍTULO IV-CAPÍTULO I: DE LAS PROHIBICIONES**

Art. 12- Debido a las características tóxicas y peligrosas de los aceites, grasas y lubricantes usados y solventes hidrocarburoados contaminados, se prohíbe:

- a) Todo vertido de aceite usado en aguas superficiales, subterráneas, y en los sistemas de alcantarillado o evacuación de aguas residuales.
- b) Usarlos en actividades agropecuarias.
- c) Infiltrarlos en el suelo.
- d) Mezclarlos con los Policloruro de fenilos ni con otros residuos Tóxicos y peligrosos.
- e) La movilización simultáneamente con personas, animales medicamentos y alimentos destinados al consumo humano o animal, o con embalajes destinados para alguna de estas labores.
- f) La movilización y almacenamiento en tambores con capacidad menor a 55 galones, salvo que se realice en vehículos tanque destinados para el efecto.
- g) La movilización sin contar con los permisos correspondientes.
- h) La utilización de la unidad de transporte para movilizar cualquier otro tipo de sustancia o elemento diferente a aceites, grasas, lubricantes usados.
- i) La entrega a personas o movilizados que no cuenten con la autorización Municipal o el registro para su manejo, almacenamiento, procesamiento o disposición final.

- j) El almacenamiento en tanques fabricados en concreto, revestidos de concreto o de asbesto – cemento.
- k) La disposición de aceites, grasas y lubricantes usados o de materiales contaminados para ser recolectados por los servicios de recolección de residuos domésticos.
- l) A personas naturales o jurídicas actuar como receptores finales, sin la debida autorización de la Dirección de Gestión Ambiental.
- m) El cambio de aceite de motor o de transmisión en espacios públicos y en áreas privadas de uso comunal.
- n) La mezcla con cualquier otro tipo de residuo o sustancia sólida, líquida o gaseosa.

## METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron los siguientes métodos de investigación:

**Método analítico:** Sintético para la organización de la información,

**Método experimental:** para la determinar los análisis Físico-químicos y microbiológicos del agua aceitosa mediante la utilización de equipos como pH-metro, conductímetro, colorímetro y varios reactivos.

**El método estadístico:** se utilizó para la recopilación de información en tablas.

En la depuración de aguas residuales es necesario partir de un principio básico: A un cauce público nunca debería hacerse llegar un vertido que pueda ocasionar un desequilibrio, es decir, que sobrepase su capacidad de autodepuración. Esto debe entenderse, también, en el sentido de que no hay porqué depurar más de lo necesario o lo que es lo mismo, gastar sin motivo.

A la hora de planificar el aprovechamiento del agua residual es preciso realizar un estudio minucioso de la planta de tratamiento de aguas oleosas en la misma ya que cualquier elemento peligroso que no se tenga en cuenta puede perturbar seriamente los tratamientos propuestos. Para el tratamiento de las aguas del sistema de aguas oleosas se realiza el siguiente diagnóstico.

## Descripción del lugar

La Central Térmica Esmeraldas II se encuentra ubicada en la Provincia de Esmeraldas, Cantón Esmeraldas, Parroquia Vuelta Larga, bajo los siguientes linderos: Por el norte Carretera Esmeraldas-Atacames km 7 1/2, por el sur con el Río Teaone, por el este con la Central Térmica Esmeraldas I y por el oeste con las antiguas bodegas de INDEGA (COCA COLA). Estratégicamente localizada frente a la Refinería de Esmeraldas lo que le permite el abastecimiento de combustible directamente de los tanques de almacenamiento de Refinería.

**Figura 5.** Ubicación de la Central Termoesmeraldas II.



Esta empresa genera energía eléctrica por medio de doce motores con su respectivo generador, cada uno de 8,35 MW, tienen 8,40 m de longitud, 3,60 m de ancho y 5,0 m de alto, peso unitario de 134 toneladas ([www.celec.gob.ec](http://www.celec.gob.ec)).

## Condiciones de diseño de la planta de tratamiento de aguas oleosas.

Tiene integrado el proceso de separación forzada, engrosamiento, absorción, fusión y una estructura cilíndrica de acero. Forma un equipo con tanques de almacenamiento, bomba de lavado y caja de control. Posee una extensiva adaptabilidad para manejar todo tipo de condiciones de aguas residuales aceitosas. Para el proceso utiliza completamente las características de la separación por gravedad, totalmente viable para el tratamiento de aguas residuales aceitosas en una

planta.

Las aguas residuales aceitosas fluyen hacia el filtro de pre-líquido primero, luego fluyen hacia el tanque separador de agua para separar agua y aceite utilizando el relleno del tanque de separación. Cuando la velocidad del flujo de aceite es lenta porque la temperatura es baja, inicie el calentador eléctrico para calentar el aceite flotante. El lector del indicador de presión puede reaccionar ante la velocidad del flujo y debe ser eliminado al lavar el filtro de pre-líquido y el tanque separador de agua y aceite mediante la bomba de lavado. El lector de nivel de aceite se usa para monitorear la descarga de aceite.

Después del tratamiento, el agua puede ser directamente descartada o reutilizada apropiadamente y el aceite puede ser reciclado. Posee un gabinete eléctrico que provee al usuario el estado de las operaciones y recibe señales por control remoto.

### Componentes del equipo

El equipo está integrado por las siguientes partes: lector de nivel de aceite, calentador eléctrico, dispositivo de filtro de pre-líquido, separador de agua y aceite, tanque de almacenamiento de aceite, bomba de lavado, caja de control, etc.

### Instrucciones

**Revisar:** Antes de iniciar el dispositivo, debe revisar las condiciones de cada válvula, bomba y partes eléctricas según los requerimientos.

**Preparar para la ejecución:** Primero abra la válvula de entrada de agua, cierre la válvula de salida de agua y drene. Inicie la bomba de levantamiento de aguas residuales, luego cierra la válvula de descarga de aceite cuando el agua rebose hacia la válvula de descarga de aceite, continúe ejecutando cuando el agua fluya hacia la válvula de salida de agua y el equipo regrese al funcionamiento normal.

**Proceso de descarga de aceite:** Cuando el equipo esté funcionando, el separador de agua y aceite en condición total de flujo, después de que el equipo trabaja por una o dos divisiones, algo de aire es descartado cuando se abre la válvula de descarga de aceite, lo cual es normal.

**Observe el líquido:** Cuando fluya; si es aceite continúe y conecte la manguera al tanque de almacenamiento de aceite, luego cierre la válvula de descarga de aceite cuando el aceite haya sido completamente drenado; si el líquido de descarga es agua, la válvula de descarga de aceite debe ser cerrada inmediatamente.

**Parada:** Después de finalizado el trabajo, el equipo debe correr con agua limpia durante 15-20 minutos, este proceso de operación es igual al proceso de preparación y el dispositivo debe quedar en completo estado de flujo después de terminar.

**El proceso de lavado:** Para el normal procesamiento, la presión debe estar entre 0.01-0.09 MPa, si la lectura llega a 0.10 MPa es necesario lavar el filtro de pre-líquido. La válvula de entrada de agua debe estar cerrada durante el lavado y las válvulas de entrada y salida de agua para lavado deben estar abiertas. La bomba de lavado se detiene después de correr durante 10-15 minutos, se abre la válvula de entrada de agua y se cierra la válvula de descarga de agua de lavado. El equipo está en normal operación.

Si el efecto de lavado no es notorio, el tiempo de lavado debe extenderse hasta que el lector del indicador de presión regrese a la normalidad.

### Modo de control

Hay dos modos de control: local y remoto

**Modo local:** Este modo inicia y detiene la bomba de lavado y el calentador, cierra y abre las válvulas eléctricas de descarga de aceite manualmente. Automáticamente abre la válvula eléctrica de descarga de aceite cuando se activa la alarma de nivel alto de aceite. Automáticamente abre la válvula eléctrica de descarga de aceite cuando se activa la alarma de nivel bajo de aceite.

**Modo remoto:** Inicia y detiene la bomba de lavado, calentador y abre y cierra las válvulas eléctricas de descarga de aceite a distancia. Automáticamente abre la válvula eléctrica de descarga de aceite cuando se activa la alarma de nivel bajo de aceite.

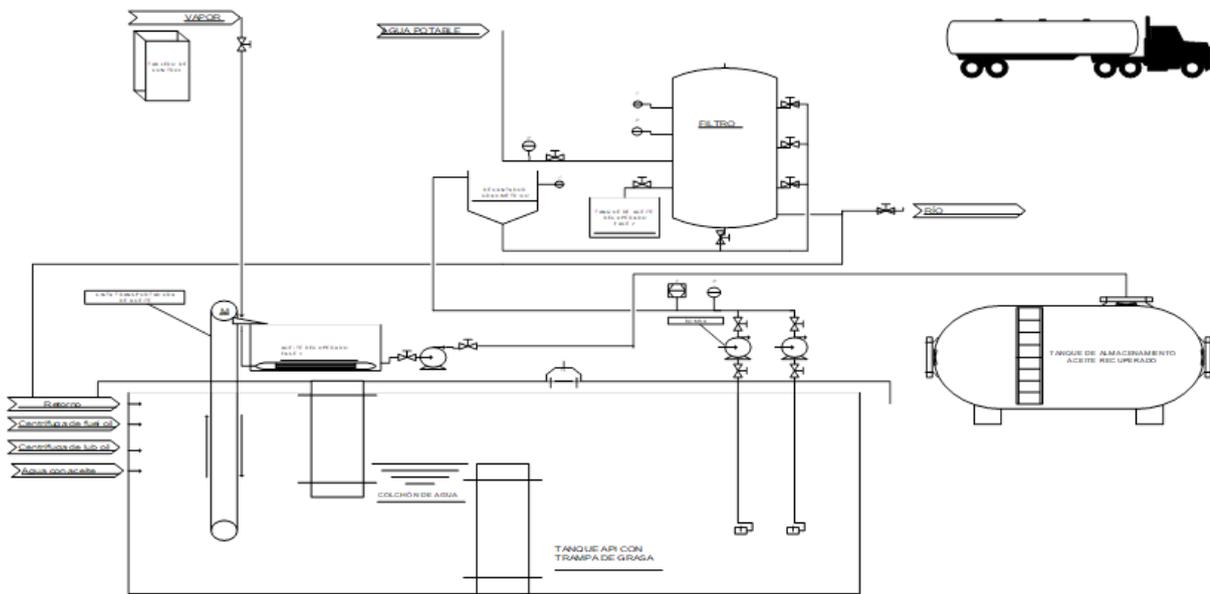
### Requisitos de instalación

El dispositivo puede ser puesto en funcionamiento, solo la conexión de la electricidad y la conexión de tubería debe ser realizada en el sitio.

### Notas

- El dispositivo debe ser iniciado en modo de flujo de agua, es decir, debe iniciar a correr con agua limpia por 30 minutos antes de iniciar o detener el dispositivo y agotarse gradualmente en el proceso.
- El nivel de aceite en el cuenco debe ser revisado en el proceso de lavado para evitar el flujo de agua dentro del separador de agua y aceite cuando la bomba de levantamiento de aguas residuales inicie.
- El equipo principal y el revestimiento anticorrosión de la pared exterior deben ser regularmente inspeccionados. Mantenimiento general anual.

**Figura 6.** Diagrama de la planta de aguas oleosas.



### Evaluación operativa (cualitativa) del tratamiento de aguas oleosa

La empresa Central Esmeraldas II, genera energía eléctrica en el proceso se genera además de la electricidad efluentes líquidos que es el objeto de investigación, en el recorrido a la planta se observa que el tratamiento que realiza la empresa para las aguas oleosas no se cumple de acuerdo a las normas de diseño de la misma, debido a las siguientes causas:

#### Funcionamiento de La Planta de Aguas Oleosas, (Como se está dando actualmente)

El sistema de aguas aceitosas recoge residuos que se recolectan en los siguientes puntos:

- De las purgas de los tanques de almacenamiento: tanques de HFO #6
- Aguas que cumplen función de colchón en las trincheras del cuarto de separadoras de combustible, de la casa de máquinas y trinchera central, las cuales se contaminan cuando se producen derrames de aceite lubricante.
- Lodos de las separadoras de combustible de (HFO #6 y diesel) y de las separadoras de aceite lubricante.
- Lavado y limpieza en el motor.
- Efluente de la línea de air cooler.
- Efluente de condensado.
- Lavado de los turbos cargadores de las unidades.

Debido a que el flujo de las aguas residuales oleosas se incrementa por la presencia de flujos de aguas residuales que no estuvieron contemplados en el diseño de esta planta como flujos de actividades emergentes del proceso lo que provoca que se eleve el caudal de diseño lo que cambia las condiciones de operación y por lo tanto se realice la separación agua-aceite de manera eficiente. Cuando este tanque llega a cierto nivel las bombas en forma automáticas envían todo este residuo al decantador por gravedad el mismo que tiene un volumen de 82 m<sup>3</sup>.

Este tanque es el más importante de la planta de aguas oleosas, el cual tiene una división interna y por diferencia de densidad el aceite queda en la parte superior y por rebose pasa al compartimento # 2.; esta operación actualmente no se realiza y el decantador es un tanque de almacenamiento de aguas aceitosa, cuando el decantador está lleno el residuo

aceitoso es entregado por la empresa a un gestor externo el mismo que envía un vacuum para retirar el residuo aceitosa. El tiempo de llenado depende de cuantas unidades estén operativas, cuando están 11 unidades operando las 24 horas en 72 horas se llena el tanque, pero generalmente no están todas las unidades en operación y por lo tanto se demora más tiempo en llenarse, se ha calculado 120 horas.

Para garantizar la vida útil de los motores de la Central Esmeraldas II, es necesario mantener las condiciones operativas dentro de los parámetros y especificaciones de diseño. Para esto se requiere de sistemas auxiliares (vapor, sistema de lubricación, sistema de combustible, aire de servicio) los mismos que generan residuos líquidos.

Esta planta cuenta con las siguientes especificaciones:

- Sus dimensiones son: 10.15 m de frente, 2.5 m de ancho y 3.25 m de altura, lo que nos da un volumen de 82 m<sup>3</sup>. En su interior tiene compartimentos, los diseñados para separar por diferencia de densidad el agua del aceite, haciendo así más fácil la separación.
- Cuenta con una banda desnatadora a la cual se va a adherir el aceite que se encuentra en la superficie y será recolectado en un tanque, para posteriormente ser entregado a una empresa gestora de residuos líquidos.
- Consta de dos bombas de succión, las cuales toman el agua desde la parte inferior del tanque para hacerla pasar por los filtros.
- Filtros hidrofóbicos - oleofílicos: estos filtros repelen el agua, es decir que dejará fluir el agua y solo retendrá el aceite o grasa que aún contenga el agua.
- Según el diseño de esta planta, luego que el agua pase por el filtro cumpliría con lo dispuesto en la normativa para poder ser descargada al río, pero los resultados que muestran los análisis realizados demuestran que no se está cumpliendo la norma ambiental ecuatoriana.
- Esta agua una vez realizada el proceso de separación del aceite debería descargarse en el río Teaone, sin embargo, los resultados de los análisis realizados a estas aguas indican que no son aptas para la descarga ya que no cumple con los parámetros del TULSMA Tabla N<sup>o</sup> 12, por lo que se debe evaluar el proceso de separación agua-aceite en la unidad de tratamiento.
- Estimación de la carga contaminante que llega hasta el Tanque de aguas oleosas.

**Tabla 6.** Carga contaminante.

Detalle	Purificadora combustible	Aguas oleosas enviadas desde el tanque gris
m <sup>3</sup> /h	0,17	0,56
m <sup>3</sup> /día	4,08	13,44
m <sup>3</sup> / semana	28,56	94,08
m <sup>3</sup> / mes	114,24	376,32

Fuente: Central Esmeraldas II

Para cumplir con el objetivo de esta investigación se realizarán los siguientes análisis a fin de determinar el método más apropiado para separar el agua del aceite y poder devolver el agua al río Teaone.

La operación unitaria de decantación de acuerdo al diseño de la planta en la actualidad es imposible realizarla, por lo tanto, el sistema de aguas aceitosas se encuentra fuera de servicio; teniéndose las siguientes causas:

- a) El filtro hidrofóbico se encuentra saturado de aceite por lo tanto no puede realizar la separación agua-aceite.
- b) Los análisis realizados indican que la gravedad específica del agua y aceite son muy cercanas por lo tanto el tiempo de decantación es muy lento y como no se tiene un tiempo fijo de llenado el tanque no se puede dejar en reposos las aguas aceitosas.
- c) La empresa al entregar el agua a un gestor no provoca contaminación ambiental.
- d) La empresa al entregar los residuales líquidos a un gestor ambiental tiene pérdidas económicas pues no reutiliza el aceite, ni el agua puede ser una parte reutilizada y otra entregada al cauce del río Teaone, esto ocasiona a la empresa pérdidas económicas.

- e) Dado que se está produciendo mucha agua residual en estos momentos se entrega a EP-Refinería Esmeraldas, por lo que es de mucha importancia e interés darle una solución a este problema de la planta.

Con estas deficiencias en la planta de tratamiento de los residuales aceitosas y la circunstancia de incumplimiento de la calidad del agua es necesario desde la visión del ingeniero químico experimentar con reactivos químicos que permitan acelerar la decantación del aceite y poder separar los fluidos por lo que realizare la prueba de Jarras con la que determinare la cantidad de Policloruro de aluminio que se debe agregar para alcanzar una separación óptima.

### **Determinación de grasas y aceites Standard Method5520B**

Aceites y grasas se considera cualquier material recuperado de la muestra acidificada como una sustancia soluble en éter de petróleo y no volatilizable, durante este análisis además de aceites y grasas se puede determinar otros materiales extraídos por el solvente.

#### **Equipos y Materiales**

- Equipo de extracción Soxhlet: matraz de extracción, embudo Soxhlet y refrigerante.
- Bomba de vacío.
- Manta eléctrica de calentamiento.
- Estufa a 103°C.
- Embudo Buchner.
- Cono de extracción.
- Papel de filtro de 11 cm de diámetro, WhatmanNº40 o equivalente.
- Piedras de ebullición

#### **Reactivos**

- Ácido clorhídrico (1+1).
- Éter de petróleo con punto de ebullición entre 60°C a 70°C. El solvente utilizado no debe dejar residuos medibles en su evaporación, en este caso destilar el solvente previo a su utilización.
- Tierra de diatomeas en suspensión 10 g/L en agua destilada.

#### **Procedimiento**

- Marcar el nivel de líquido en el frasco de muestreo para luego determinar el volumen de muestra tomado. Denominar a dicho volumen en ml como V.
- Verificar que el pH de la muestra es menor que 2, en caso contrario acidificar con HCl (1+1).
- Colocar un papel de filtro en el embudo Buchner y humedecerlo con agua destilada. Haciendo vacío pasar 100 ml de la suspensión de tierra diatomeas a través del filtro y lavar con 1 L de agua destilada.
- Filtrar la totalidad de la muestra recogida y acidificada. Usando pinzas transferir el filtro a un vidrio reloj. Pasar un papel de filtro humedecido en solvente por el embudo Buchner y por el frasco de muestreo, asegurándose de remover las películas de grasas y material sólido presente. Juntar ambos filtros, envolverlos y colocarlos en el cono de extracción.
- Secar el cono de extracción en una estufa de aire caliente a 103°C por 30 minutos. Los compuestos volátiles a 103°C se perderán durante este proceso.
- Pesar el matraz de extracción conteniendo perlas de ebullición. Denominar a dicho peso como p1.
- Colocar el cono en el embudo Soxhlet. Agregar aproximadamente 200 ml de éter de petróleo al frasco de extracción. Extraer aceites y grasas a una velocidad de 20 ciclos por hora durante 4 horas, tiempo tomado a partir del primer ciclo.
- Destilar el solvente del frasco de extracción en un baño de agua a 70°C. Cuando se observa que la condensación del solvente finaliza, sacar el frasco de extracción del baño de agua, cubrir el baño con un soporte adecuado y secar el frasco sobre el soporte durante 15 minutos, en el último minuto, pasar aire a través del residuo usando un vacío apropiado.
- Enfriar el frasco de extracción en un desecador por 30 minutos y pesar. Denominara dicho peso como p2.

**Cálculos y expresión de resultados**

$$\text{Aceites y grasa (mg/L)} = \frac{(P_2 - P_1) \cdot 1000}{V}$$

Dónde:

p1 = peso del matraz con las perlas de ebullición previo a la extracción en mg.

p2 = peso del matraz con las perlas de ebullición luego de la extracción en mg.

V = volumen de muestra filtrado en mL.

**Determinación de Sólidos Suspendidos Standard Method 2540B25**

Corresponde a la cantidad de material (sólidos) que es retenido después de realizar la filtración de un volumen de agua. Es importante como indicador puesto que su presencia disminuye el paso de la luz a través de agua evitando su actividad fotosintética en las corrientes, importante para la producción de oxígeno (Standard Methods).

**Equipos y Materiales**

- Equipo de filtración
- Filtros para análisis gravimétrico: AP40 Millipore o equivalente (como GF 1822047 o 934AH Whatman)
- Estufa
- Desecador con sílica azul como indicador colorimétrico de humedad
- Balanza analítica
- Agitador magnético
- Probetas de diferentes volúmenes.

**Procedimiento:**

- Las condiciones ambientales no son críticas para la realización de este ensayo.
- Preparación del filtro de fibra de vidrio:
- Alistar la estufa a una temperatura entre 103-105°C.
- Empleando grafito, marcar el filtro de forma inequívoca (ej.: mediante numeración consecutiva).
- Colocar el filtro (con la cara rugosa hacia arriba), en el equipo de filtración.
- Aplicar vacío y lavar el filtro con 3 porciones sucesivas de 20 mL de agua destilada.
- Mantener la filtración hasta la remoción total de las trazas de agua. Desechar el filtrado (Standard Methods).
- Retirar el filtro, colocarlo en un papel de aluminio y secarlo en estufa a 103-105°C durante una hora.
- Enfriar en el desecador hasta su empleo, pesar el filtro, y registrar los datos.
- Repetir hasta que la variación del peso sea < 4% ó de 0.5 mg (lo que resulte menor).
- Anotar el peso del filtro (peso A).

**Análisis de la muestra:**

- Esperar a que la muestra se encuentre a temperatura ambiente.
- En función del aspecto de la muestra, seleccionar el volumen a filtrar (ver nota).
- Coger el filtro previamente tarado del desecador, llevarlo al equipo de filtración e iniciar la succión.
- Agitar la muestra adecuadamente y depositar el volumen seleccionado sobre el filtro.
- Una vez que la muestra haya terminado de filtrar, lavar 3 veces sucesivas con volúmenes de 10 ml de agua destilada dejando secar entre lavados.
- Retirar el filtro y llevarlo al papel de aluminio (al mismo donde se guardó en el desecador) y secarlo en la estufa a 103-105°C durante una hora. A criterio del analista, el secado puede extenderse (incluida toda la noche), cuando la apariencia física de la muestra denote presencia de grasa o alto contenido de sales.
- Enfriar en desecador, pesar el filtro y registrar los datos.

- Repetir el ciclo de secado, enfriamiento, desecado y pesado, hasta que la variación del peso sea < 4% ó de 0.5 mg (lo que resulte menor). Anotar los pesos del filtro (peso B) (Standard Methods).

### Cálculos y Presentación de Resultados

$$\text{mg SST/L} = [(B - A) \times 1000] / \text{volumen muestra (mL)}$$

Dónde:

A: peso del filtro seco antes de la filtración (en mg).

B: peso del filtro + residuo seco (en mg).

En ambos casos, se empleará el promedio de los dos valores que cumplan el requisito de peso constante antes enunciado. Los resultados inferiores a 1 mg/L deben informarse como "< 1 mg/L". Resultados entre 1-10 mg/L, se informarán con una cifra decimal; superiores a 10 mg/L, se redondearán a la unidad.

### Conductividad

Es la capacidad que tiene el agua para conducir energía eléctrica, generalmente se expresa como micro-siemens por centímetro (Rigola, 1990).

### Sólidos Totales Disueltos

Los sólidos totales disueltos STD, se refiere a la materia orgánica e inorgánica que se encuentra disuelta en el agua, se pueden determinar filtrando y evaporando una cantidad de agua a temperatura baja +-105 °C.25 (Roldan & Ramírez, 2008).

### Prueba de Tratabilidad

Este análisis de laboratorio se realiza con el equipo denominado prueba de jarras, se compone de 4 o 6 recipientes, el objetivo es determinar la dosis óptima de coagulante o floculante (Jiménez, La Contaminación Ambiental en México, 2005).

El ensayo consiste en:

- Colocar el agua cruda en los 4 o 6 vasos de precipitación según el equipo
- Añadir progresivamente diferentes cantidades de coagulantes o floculantes a los vasos de precipitación
- Someter a los vasos a agitación rápida, con el fin de homogenizar el medio
- Luego someter a agitación lenta, para la formación de flóculos.
- Pasado un tiempo se dejan reposar los vasos, y los lodos o flóculos se depositan al fondo por acción de la gravedad.
- Se realizan los análisis de pH, turbidez, color a las aguas de las diferentes jarras para determinar cuál de las dosis añadidas a las jarras es la óptima (Jiménez, La Contaminación Ambiental en México, 2005).

Figura 6. Prueba de jarras.



Fuente: INCAV

### Análisis de aguas oleosas

El tanque del sistema de aguas oleosas tiene una capacidad nominal de 80 m<sup>3</sup> y caudal de 10 m<sup>3</sup>/h.

Tabla 7. Caudal, pH, temperatura entrada y salida del sistema

<b>MUESTREO 1</b>						
<b>Tipo de Muestra: Compuesta</b>			<b>Volumen de Muestra: 1000 ml</b>			
<b>Frecuencia: 30 Minutos</b>			<b>Entrada al Sistema</b>		<b>Salida del Sistema</b>	
<b>Muestra N°</b>	<b>Hora</b>	<b>Caudal (m3/h)</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura °C</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura °C</b>
1	10:00	0,56	7,76	28	7,14	28,5
2	10:30	0,60	7,20	29	6,5	29
3	11:00	0,58	5,56	30	5,55	28
4	11:30	0,57	4,86	32	4,70	30
5	12:00	0,56	7,50	29	7,40	30
6	12:30	0,55	7,45	39	7,30	29
7	13:00	0,58	7,80	28	7,50	28
8	13:30	0,54	7,90	28	7,47	28
<b>Promedio</b>		0,56	7,03	30,75	6,62	28,81

Nota: Elaboración propia. Muestras tomadas en Termoesmeraldas II, Sistema de aguas aceitosas.

Tabla 8. Concentración de sólidos totales, sólidos suspendidos entrada y salida del sistema

<b>VOLUMEN DE MUESTRA: 100 ml</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Antes del filtro</b>				<b>Después del filtro</b>			
			<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Promedio</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Promedio</b>
<b>Sólidos totales</b>	ppm		100	58,8	300	152,93	28,8	50,0	320	132,93
<b>Sólidos suspendidos</b>	ppm		58,8	30,5	150	79,76	9	28	100	45,66

Nota: Elaboración propia. Muestras tomadas en Termoesmeraldas II, Sistema de aguas aceitosas.

### Segundo muestro

Tabla 9. Caudal, pH, temperatura entrada y salida del sistema.

<b>MUESTREO 1</b>									
<b>Tipo de muestra: compuesta</b>					<b>Volumen de muestra: 600 ml</b>				
<b>Frecuencia: 30 minutos</b>					<b>Entrada al sistema</b>		<b>Salida del sistema</b>		
<b>stra N°</b>	<b>Mue</b>	<b>ora</b>	<b>H</b>	<b>Ca</b>	<b>Temperatur</b>	<b>H</b>	<b>a</b>	<b>Temperatur</b>	<b>°C</b>
			<b>udal</b>	<b>(m3/h</b>	<b>°C</b>				<b>°C</b>
			<b>)</b>	<b>H</b>	<b>°C</b>				
1		0:00	1	0,5	28				29
			6	,86			,63		
2		0:30	1	0,5	30				28
			5	,55			,80		
3		1:00	1	0,5	29				28
			4	,14			,89		
4		1:30	1	0,5	32				30
			8	,80			,78		
5		2:00	1	0,5	29				30
			6	,58			,76		
6		2:30	1	0,5	28				30
			8	,89			,78		
7		3:00	1	0,5	29				31
			4	,89			,89		
8		3:30	1	0,5	30				31
			5	,55			,14		
<b>Promedio</b>				<b>0,</b>	<b>29,37</b>		<b>,39</b>		<b>29,62</b>
			<b>5575</b>	<b>,60</b>					

Nota: Elaboración propia. Muestras tomadas en Termoesmeraldas II, Sistema de aguas aceitosas.

Tabla 10. Concentración de solidos totales solidos disueltos entrada y salida del sistema.

Volumen de muestra: 100 ml		Antes del filtro				Después del filtro			
Parámetro	Unidad	1	2	3	Promedio	1	2	3	Promedio
Solidos totales	ppm	65,98	89,68	92,86	82,84	60,10	89,56	270	140
Solidos suspendidos	ppm	20,5	25,5	28,75	24,92	28,9	30,5	150	69,8

Nota: Elaboración propia. Muestra tomadas en Termoesmeraldas II, Sistema de aguas aceitosas

Tabla 11. Pruebas de tratabilidad.

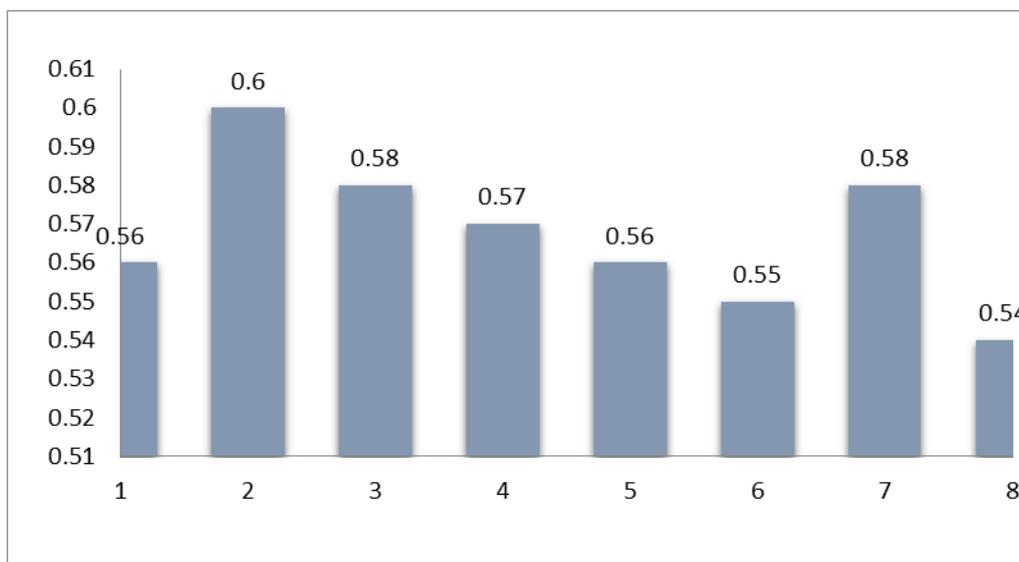
Coagulante	Policloruro de aluminio	Temperatura	31 °C	pH	7,31
Volumen de muestra	850 ml	Mezcla: Rápida:1 minuto		Lenta: 180 Minutos	
Jarra N <sup>a</sup>	Dosis de Coagulante (mg/L)		Turbidez Residual (FTU)		
1	70	2			
2	75	3			
3	80	3			
4	85	8			
5	90	16			
6	95	21			
7	100	19			
8	105	24			

### Análisis de resultados y propuesta

#### Tratamiento adecuado

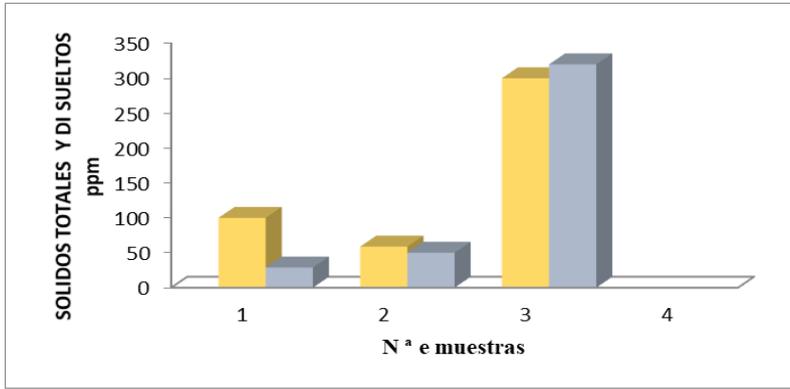
Para poder obtener agua con la calidad acorde a lo que establece la legislación ecuatoriana para que esta pueda ser descargada al cuerpo de agua dulce (rio Teaone) y en base a los parámetros físico-químicos determinados y mostrados en el presente documento se recomienda tener en cuenta lo siguiente:

Figura 7. Caudal m<sup>3</sup>/h.



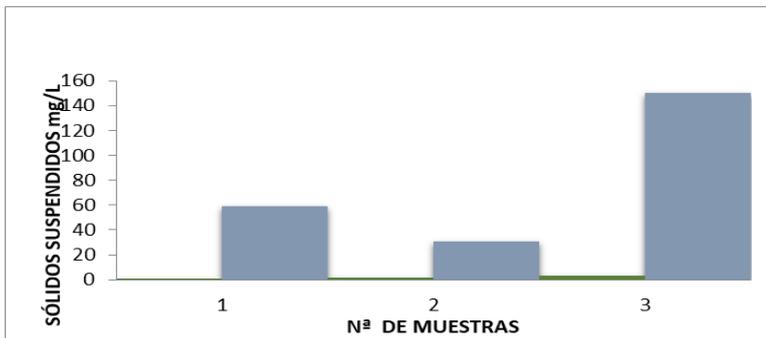
Como puede observarse de ocho muestras realizadas todas están sobre 0,54 m<sup>3</sup>/h dando un promedio de 0,5675 m<sup>3</sup>/h.

Figura 8. Turbidez.



De tres muestras en las que se realizó el análisis de sólidos totales y sólidos en suspensión en la muestra tres es muy elevado el valor determinado.

Figura 9. Sólidos suspendidos antes del filtro.



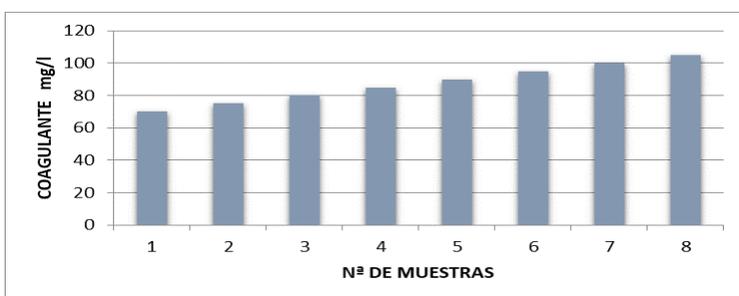
En estas muestras se pueden relacionar la turbidez y los sólidos suspendidos y puede decirse que mientras mayor es la turbidez mayor son los sólidos suspendidos lo cual se refleja en la muestra tres.

Figura 10. Sólidos suspendidos después del filtro.



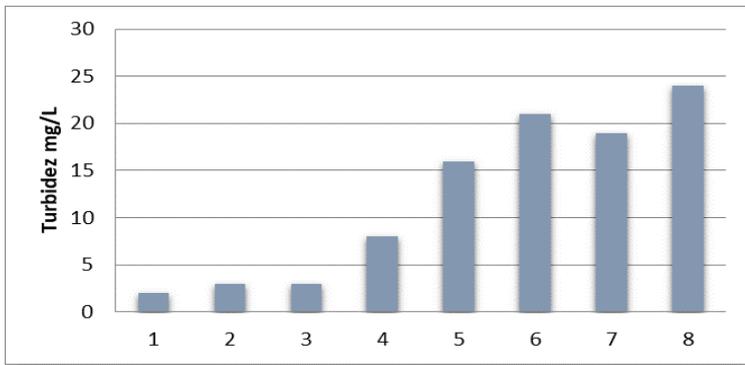
En relación a los sólidos retenidos después del filtro se observa que la muestra uno tiene el mejor resultado.

Figura 11. Dosis de coagulante (mg/l).



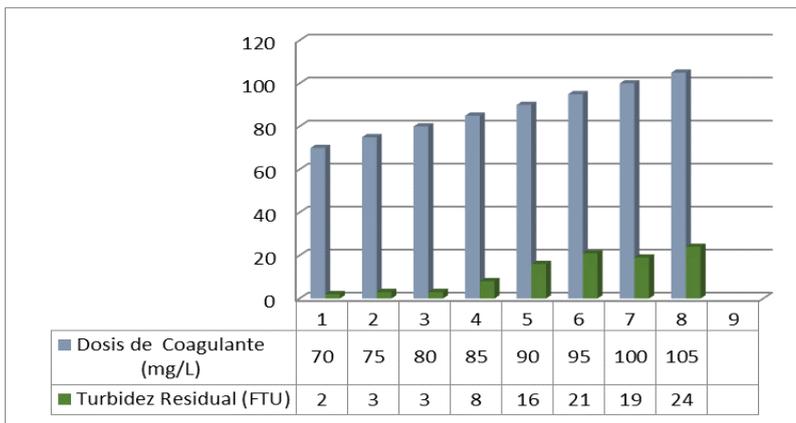
Al agregar el coagulante Policloruro de Aluminio se observa que la muestra de la jarra uno tiene el mejor resultado al agregarle 70 mg/L de Policloruro de aluminio a 850 ml de residuo aceitoso con un pH de 7,31 en un tiempo de un minuto para observar la decantación en 180 minutos.

Figura 12. Turbidez residual (FTU).



El análisis de turbidez luego de aplicar el policloruro de aluminio da como resultado de dos FTU lo cual es un resultado positivo para la empresa.

**Figura 13.** Prueba de tratabilidad.



Este gráfico nos indica la relación de turbidez vs coagulante en donde se observa lo acertado de agregar un Policloruro al agua residual aceitosa. Teniendo el mejor resultado con la muestra uno.

**Dosificación de policloruro de aluminio a las aguas aceitosas**

$$D = Q \cdot C \cdot \frac{1}{\vartheta}$$

D= dosificación ml/min

Q= Caudal de entrada m3/h

C= Concentración de la solución a dosificar ppm (g/m3)

$\vartheta$  = Densidad del Policloruro de Aluminio mg/ml

$$D = 0,00946 \frac{m^3}{min} 70 \frac{g}{m^3} \frac{ml}{1,25g}$$

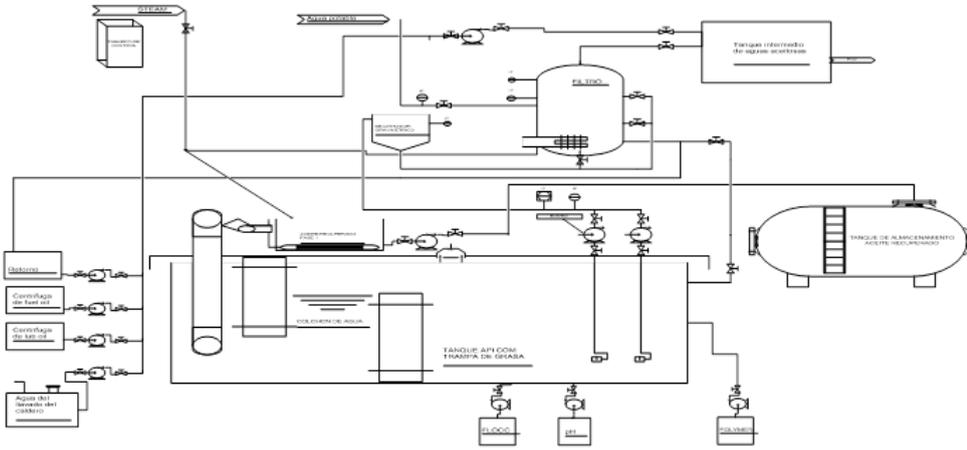
Q= 0,5675 m<sup>3</sup>/h      D = 31 ml/h

$\vartheta$  = 1,25 g/ml

C= 70 g/ m<sup>3</sup>

Para que la Central Térmica Esmeraldas II descargue su efluente al río Teaone debe retirar el aceite del agua, lo cual se logra agregándole 31 ml cada hora de Policloruro de aluminio, controlar el pH el mismo que debe estar en el rango de alcalinidad para favorecer la formación de flóculos, adicional al estudio realizado en el diagrama se sugiere la variante al actual sistema de tratamiento de aguas residuales.

Figura 15. Propuesta para la planta de tratamiento de aguas oleosas de Central Térmica Esmeraldas II.



## CONCLUSIONES

Los análisis se realizaron en la Escuela Politécnica Nacional y en la Central Térmica Esmeraldas II, lo que se convierte en una dificultad para desarrollar futuras investigaciones.

Del análisis realizado a los resultados obtenidos se encuentra que las aguas aceitosas son enviadas a otra provincia para su disposición final

De la discusión de resultados se establece que el agua aceitosa con un pH de 7,3 una vez que se le agrega el Policloruro de aluminio, es posible separar el agua del aceite por lo que la empresa podría depositar el agua al río Teaone.

## REFERENCIAS

- CEC.CCA.CCE. (s.f.). Emisiones atmosféricas de las Centrales Eléctricas . Obtenido de CEC.CCA.CCE: <http://www2.cec.org/site/PPE/es/technologie>
- CELEC EP. (s.f.). Reseña histórica de la Central Térmica Esmeraldas II. Obtenido de [www.celec.gob.ec](http://www.celec.gob.ec): <https://www.celec.gob.ec/termoesmeraldas/>
- Coronel , J. (2004). Remoción de sólidos suspendidos en los efluentes líquidos residuales de la planta extractora de aceite de Palma Aiquisa. Obtenido de <http://repositorio.uisek.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/440/1/TESES%20AIQUISA.pdf>.
- Derjaquin, Oberbeek, Verwery, & Landau. (s.f.). Teoría DLVO.
- Jiménez, B. (2005). La Contaminación Ambiental en México. México: Limusa S.A.
- Jiménez, B. (2005). La Contaminación Ambiental en México. México: Limusa S.A.
- Milacron Mexicana Sales . (s.f.). Tratamiento y Eliminación de Aguas residuales. Técnico, Queretaro.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador . (s.f.). Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes. Obtenido de Ministerio del Ambiente del Ecuador: <http://www.ambiente.gob.ec/>
- Municipio de Esmeraldas . (s.f.). Línea base del río Teaone. Esmeraldas.
- Metcalf, & Eddy. (1991). Repercusión ambiental. México: Wastewater Engineering.
- Nemerow , L. N., & Dasgupta , A. (1998). Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos (Díaz de Santos ed.). Madrid.
- Organización mundial de la propiedad intelectual (Ed.). (1999). Certificación Internacional de Patentes. Ginebra.
- Perry, R., & Green, D. (2001). Manual del Ingeniero Químico (Septima ed., Vol. III). Madrid, España : McGraw-Hill.
- Rigola, M. (1990). Tratamiento de Agua Industriales: Aguas de Proceso y Residuales. Barcelona: Marcombo S.A.
- Roldan, G., & Ramírez, J. (2008). Fundamento de Limnología Neotropical. Medellín: Universidad de Antioquia.
- Romero, J. (2000). Tratamiento de Aguas Residuales, Teoría y Príncios de Diseño (Primera ed.). Colombia : Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sainz, R., & Ribas , J. (1999). Ingeniería Ambiental, Contaminación y Tratamientos, (Primera ed.). Bogotá, Colombia.
- Sedapal. (s.f.). Coagulantes . Obtenido de [www.sedapal.com](http://www.sedapal.com): [www.sedapal.com](http://www.sedapal.com)
- Standard Methods. (s.f.). Standard Method 2540-B"Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA, AWWA, WPCF 17 ed.". Obtenido de Standard Methods: <https://www.standardmethods.org/>
- Valencia, J. (2000). Teoría y Práctica de la Purificación del Agua (Tercera ed.). Bogotá, Colombia : McGraw-Hill.
- [www.ambiente.gob.ec](http://www.ambiente.gob.ec). (s.f.). Ley de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental. Obtenido de [www.ambiente.gob.ec](http://www.ambiente.gob.ec): <http://www.ambiente.gob.ec>
- [www.celec.gob.ec](http://www.celec.gob.ec). (s.f.). Central Térmica Esmeraldas II. Recuperado el 19 de Noviembre de 2014, de [www.celec.gob.ec](http://www.celec.gob.ec): <https://www.celec.gob.ec/termoesmeraldas/index.php/central-termica-esmeraldas-u2>