

**Universidad de Matanzas
Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Química**



Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Producciones más Limpias

Título: Propuesta tecnológica para el mejoramiento del proceso de tratamiento de aguas residuales oleosas de la División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas

Autor: Lic. Aymara Lozano Brito.

Matanzas, Cuba. 2020.

Universidad de Matanzas
Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Química



Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Producciones más Limpias

Título: Propuesta tecnológica para el mejoramiento del proceso de tratamiento de aguas residuales oleosas de la División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas

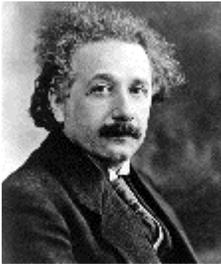
Autor: Lic. Aymara Lozano Brito.

Tutores: Dr.C. Lourdes Yamen González Sáez.

Tutor consultor: MSc. Lázaro Jesús Rodríguez Bolaños.

Matanzas, Cuba. 2020.

PENSAMIENTO



“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad.”

Albert Einstein

AGRADECIMIENTOS

A la profesora Lourdita por tantas horas de dedicación, sin su guía no hubiera sido posible la realización de este trabajo.

A mi compañero Lázaro Rodríguez, por prestarme la ayuda necesaria, por su buen carácter, por su incondicionalidad.

A mis primos Marlen y Edgar por abrirme el camino y por estar siempre pendiente al avance de la maestría.

A mí querido amigo Leroy por su preocupación y por facilitarme casi toda la bibliografía consultada.

A mi alumno Anthony por estar siempre dispuesto a ayudarme.

A mi compañera Zoraime por gestionarme tantas veces el transporte para los viajes al CEINPET.

A mi amiga Yaimelis por acompañarme en todos los eventos.

A la profesora Olguita por ofrecerme sus conocimientos de Idioma Inglés

A mi esposo, a mis padres y a mis hijos por las horas que les robe, por la paciencia que tuvieron conmigo, por el apoyo emocional, por estar a mi lado todo el tiempo, por todo lo que les debo.

Declaración de autoridad

Declaro ser la única autora de este Trabajo de Tesis de Maestría y autorizo a la Facultad de Ciencias Técnicas de la Universidad de Matanzas a que haga uso parcial o total del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Firma

Página de Aceptación

Nota de Aceptación:

Presidente del Tribunal

Tribunal

Tribunal

Evaluación

Fecha

Ciudad de Matanzas a los ____ del mes ____ 2020

RESUMEN

El presente proyecto de investigación se realiza en la planta de tratamiento de aguas oleosas, perteneciente a la División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas (DTCCM). Tiene como objetivo proponer modificaciones tecnológicas en el proceso de tratamiento de aguas residuales que permitan llevar a la condición de vertimiento el efluente, pues actualmente este residual no cumple con los estándares de calidad para ser vertido al cuerpo receptor. Se realiza una caracterización físico-química del efluente y se compara con la norma N/C 521:2007, demostrándose que algunos parámetros se encuentran fuera de los límites máximos permitidos. Se valoran dos opciones de tratamiento (Biofiltración y Tratamiento físico-químico). Con ambas opciones se logra disminuir los indicadores de contaminación, aunque la segunda resulta más efectiva técnica y ambientalmente. Se logra una remoción de más del 86% para grasas y aceites, 68% para hidrocarburos totales, y de 87% para DQO, por lo que se propone su vertimiento a la bahía de Matanzas. La propuesta del sistema de recirculación incluye el uso de una bomba instalada en la planta, que garantiza 10,15 m de carga de bombeo y un flujo de 11,41 m³/h. La factibilidad económica de la propuesta proporciona una relación positiva de beneficio/costo igual a 190,47; lo cual se traduce en ahorros considerables de electricidad (8432 \$/a) y productos químicos en el proceso (21 015 \$/a). Además, con la implementación de esta tecnología disminuye la posibilidad de que se produzcan vertimientos de este residual al suelo.

ABSTRACT

This research project is carried out in the oily water treatment plant, belonging to the Territorial Division of Commercialization Fuels of Matanzas (DTCCM). Its objective is to propose technological modifications in the wastewater treatment process that can carry out a discharge condition for the effluent, since currently, this waste does not meet the quality standards to be discharged to the receiving body. A physical-chemical characterization of the effluent is carried out and it is compared with the N/C 521: 2007 standard, showing that some parameters are outside the maximum permitted limits. Two treatment options are valued (Biofiltration and Physico-chemical treatment). With both options it will be possible to reduce the contamination indicators, although the second is more technically and environmentally effective. A removal of more than 86 % of oil is achieved for suspended matter, 68 % for total hydrocarbons and 87 % for COD, for which it is proposed to dump it into the Matanzas Bay. The recirculation system proposal includes the use of a pump installed in the plant, which guarantees 10.15 m of pumping head and a flow of 11.41 m³/h. The economic feasibility of the proposal provides a positive benefit / cost ratio equal to 190.47; which translates into considerable savings in electricity (8432 \$/year) and chemical products in the process (\$ 21 015 / year). In addition, with the implementation of this technology, the possibility of spillage of this residual to the ground decreases.

Contenido

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: Análisis bibliográfico	4
1.1 Aguas residuales.....	4
1.2 Clasificación de las aguas residuales	5
1.3 Indicadores de contaminación en las aguas residuales	6
1.4 Composición de las aguas residuales oleosas.....	7
1.5 Daños al medio ambiente ocasionados por aguas residuales oleosas	7
1.6 Tratamiento de aguas residuales oleosas.....	8
1.7 Tratamiento de aguas oleosas derivadas del petróleo en Cuba	17
1.8 Gestión ambiental en Cuba.....	18
1.9 Conclusiones parciales	20
CAPÍTULO II: Materiales y métodos	21
2.1 Descripción del Proceso de tratamiento de aguas oleosas. Planta de Tratamiento..	21
2.2 Análisis Físico-Químico de las aguas residuales	26
2.2.1 Identificación del Problema Ambiental	27
2.2.2 Análisis Estadístico	28
2.3 Propuestas de alternativas tecnológicas	28
2.3.1 Tratamiento del efluente por Biofiltración.....	28
2.3.2 Tratamiento Físico- Químico del efluente.....	29
2.3.3 Resultado del tratamiento con los valores operacionales obtenidos en las pruebas	33
2.4 Diseño del Sistema de Bombeo	33
2.4.1 Mediciones del sistema de tuberías	34
2.4.2 Procedimiento para el cálculo de la carga a entregar por la bomba al sistema	34
2.4.3 Cálculo de la carga de bombeo por software	37
2.4.4 Comparación de los resultados obtenidos por los software	38
2.5 Factibilidad económica de la propuesta	38
2.5.1 Costos asociados al tratamiento del agua residual oleosa fuera de especificación	38
2.5.2 Relación beneficio – costo	40
2.5.3 Valoración ambiental de la propuesta	41
2.6 Implementación.....	41
CAPÍTULO III: Análisis de los resultados	42

3.1 Caracterización físico-química de las aguas residuales tratadas por la PTR.....	42
3.1.1 Análisis estadístico de la caracterización fisicoquímica	42
3.2. Análisis de alternativas de producción más limpia (P+L)	44
3.2.1 Alternativa 1: Biofiltración.....	45
3.2.2 Alternativa 2: Tratamiento Físico-Químico	46
3.2.2.1 P-01: Determinación de la dosis óptima de coagulante para Oíl Break	46
3.2.2.2 P-02: Determinación de la dosis óptima de coagulante para Deflocar	47
3.2.2.3 P-03: Determinación de la dosis óptima del floculante Polielectrolita Aniónica... ..	47
3.2.2.4 P-04: Determinación de la actividad (par coagulante/floculante)	48
3.2.2.5 P-05: Estudio de la flotación por aire disuelto- determinación de la presión de operación y la relación A/X (aire/DQO) (aire/S Susp)	49
3.2.2.6 P-06: Estudio de la energía de mezcla en coagulación	50
3.2.2.7 P-07: Estudio de la energía de mezcla en floculación.....	51
3.2.2.8 P-08: Determinación del tiempo de reacción óptimo	51
3.2.2.9 P-09: Determinación de la velocidad de ascenso promedio de los sólidos	52
3.2.2.10 Parámetros óptimos. Resumen.....	53
3.3 Evaluación del tratamiento físico-químico	54
3.4 Propuesta del Sistema de recirculación	55
3.4.1 Datos disponibles del equipamiento del sistema.....	56
3.5 Carga a entregar por la bomba al sistema.	58
3.5.1 Utilizando el software PSIM	58
3.5.2 Utilizando el software <i>Tksolver</i>	58
3.5.3 Comparación de resultados	60
3.6 Evaluación del sistema propuesto.....	60
3.7 Evaluación económica de la opción de P+L propuesta.....	61
3.7.1 Beneficios económicos de la propuesta.....	61
3.7.2 Costo económico de la propuesta.....	64
3.7.3 Relación beneficio – costo	65
3.8 Valoración ambiental de la propuesta de P+L.....	65
3.9 Conclusiones parciales	65
CONCLUSIONES	66
RECOMENDACIONES	67
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68

INTRODUCCIÓN

Desde los inicios del empleo de los hidrocarburos, la presencia de agua durante el proceso de explotación–producción se percibe como un mal necesario. En este punto, aunque se empleen las mejores técnicas de manejo, siempre la producción de agua aumenta hasta alcanzar límites que dificultan su disposición. Así mismo, es difícil cumplir con los parámetros técnicos, tanto físicos como químicos, respecto a las características de carga del sistema donde será dispuesta, dependiendo del ecosistema y la normativa vigente.

En la actualidad en el campo del tratamiento de las aguas residuales se plantean diferentes planes de implementación enfocados en la eco eficiencia en este sentido se aplican mejoras del proceso, eficiencia energética, ahorro de agua y adecuada disposición de residuos sólidos y tóxicos para evitar su vertimiento al cuerpo receptor. Por otro lado, implica conocer su origen, su uso, tratamiento y reuso a fin de aprovechar los recursos hídricos como uno de los objetivos fundamentales para la protección de la salud y la gestión ambiental (Díaz, 2019)

Dentro de los residuos que se generan en la División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas (DTCCM) se encuentran las aguas oleosas, presentando alto contenido de hidrocarburo que forman emulsiones estables.

Su tratamiento es una tarea difícil ya que la sedimentación en el campo gravitatorio en algunos casos es lenta y frecuentemente una operación inefectiva que requiere mucho espacio y algunas veces necesita excesivas cantidades de productos químicos para su tratamiento. Se debe tener en cuenta su procedencia y calidad para proponer una solución propia y viable desde el punto de vista técnico económico y ambiental.

La DTCCM genera por año aproximadamente 10 000 m³ de agua oleosa, obtenida del drenaje de los tanques de combustibles, del lavado de cisternas y salas de máquinas de los buques petroleros que atracan en los muelles de Matanzas y de los combustibles derramados en los cargaderos de camiones cisternas (Gómez, 2018^a).

Este residual se almacena en el Tanque 14 de la terminal 320 y es el que alimenta la planta de tratamiento de agua residual oleosa (PTR) de esta División. Esta cuenta con cuatro procesos fundamentales: Separación de aceites fuera de emulsión, Separación de aceites emulsionados, Separación de lodos y Separación de metales pesados. Es completamente automática su objetivo es aplicarle un tratamiento físico químico a esta agua y una vez que cumpla con las especificaciones de calidad (según la norma de vertimiento de aguas residuales a la zona costera y aguas marinas, cuerpo receptor clase D) verterla a la bahía de Matanzas.

La toma de muestra se efectúa en distintos puntos del proceso fundamentalmente en la cisterna de aguas claras (a mediación del proceso y al terminar en la cisterna de vertimiento al mar), esta es llevada al laboratorio donde se analiza y si se obtiene como resultado que el agua se encuentra dentro de los parámetros que establece la norma se vierte a la bahía de Matanzas. Si por el contrario se encuentra fuera de parámetros, es bombeada al tanque receptor donde se mezclará de nuevo con el agua contaminada ya que el proceso no tiene una facilidad que permita incorporar esta agua a otro tanque, proceso que ocurre con frecuencia en la planta (Gómez, 2018b).

Es decir que después de consumir los ocho productos químicos (la mayoría importados) que son inyectados a lo largo del proceso, electricidad, horas de trabajo de muchos de los equipos, etc. el agua vuelve a mezclarse con la que contiene el tanque receptor haciéndose este un proceso cíclico hasta que se llegue a dosificar exactamente las concentraciones de químicos que esa agua necesita. Esta situación permite definir el siguiente problema científico.

Problema Científico: El efluente del proceso de tratamiento de agua residual oleosa de la DTCCM se recicla al proceso por no cumplir con los estándares de calidad para ser vertida a la bahía de Matanzas.

Por lo que se declara como **Hipótesis:** Si se evalúan alternativas de mejoras tecnológicas del proceso de tratamiento de las aguas oleosas de la DTCCM, se logrará obtener un agua tratada con los estándares de calidad requeridos para ser vertida a la bahía de Matanzas.

Objetivo general. Proponer una mejora tecnológica en el proceso de tratamiento de aguas oleosas de la DTCCM para que el agua tratada alcance los estándares de calidad requeridos y pueda ser vertida a la bahía de Matanzas.

Objetivos específicos.

- 1- Evaluar la calidad del efluente del sistema de tratamiento de agua oleosa de la DTCCM.
- 2- Proponer alternativas tecnológicas para mejorar el proceso de tratamiento de las aguas oleosas de la DTCCM.
- 3- Seleccionar y diseñar la alternativa técnicamente factible.
- 4- Evaluar económicamente la alternativa propuesta.

CAPÍTULO I: Análisis bibliográfico

Se realiza el análisis y la revisión de la bibliografía especializada con el tema de esta investigación. El análisis está dirigido hacia los aspectos vinculados con las aguas residuales obtenidas de procesos petroleros, así como los daños que ocasionan al medio ambiente, los tratamientos actuales, la disposición después de haberse tratado, entre otros elementos teóricos.

1.1 Aguas residuales

La primera prioridad que demanda una comunidad es el suministro del agua, con calidad adecuada y cantidad suficiente. Ya logrado este objetivo, surge otro no menos importante que consiste en la adecuada eliminación de las aguas ya utilizadas, estas aguas se les llaman aguas residuales que se convierten en potenciales vehículos de muchas enfermedades y trastornos del medio ambiente (Rodríguez, 2017).

Uno de los desechos contaminantes más peligrosos que produce el ser humano son las aguas residuales. Con este nombre se agrupan todas las aguas que, debido a la acción del hombre, han sido contaminadas y son potencialmente peligrosas en el caso de que sean vertidas en el medio ambiente sin un tratamiento previo.

Las aguas residuales son todas aquellas aguas que han sido usadas en los entornos domésticos y urbanos, en las industrias y ganaderías, así como las aguas naturales que, por accidente o mala praxis, se hayan mezclado con las anteriores (Arriol, 2018).

Según NC 521 (2007) agua residual es “aquella agua cuya calidad original se ha degradado por cambios significativos en su composición como consecuencia de su utilización”.

A criterio de la autora, las aguas residuales, son aguas que han sufrido contaminación por la incorporación de materias extrañas, como microorganismos, productos químicos, residuos industriales y de otros tipos. Estas materias deterioran la calidad del agua y definen el tipo de agua residual. Esto está en correspondencia con muchos investigadores sobre esta temática.

1.2 Clasificación de las aguas residuales

La clasificación más general de las aguas residuales se realiza a partir de la fuente generadora:

- Domésticas: aguas residuales generadas en asentamientos poblacionales, escuelas, instalaciones turísticas, edificios públicos, centros comerciales e instalaciones sanitarias de las industrias, que se componen fundamentalmente de desperdicios humanos.
- Industriales: aguas residuales resultantes de la actividad manufacturera, la industria extractiva y el procesamiento de los productos de la actividad agropecuaria.
- Agropecuarias: aguas residuales generadas en las instalaciones agropecuarias (centros porcinos, vaquerías, granjas avícolas, producciones agrícolas (Metcalf & Eddy, 1998).
- Municipales: combinación de aguas residuales provenientes de residencias, edificios públicos, establecimientos comerciales, sistemas de drenaje pluvial y algunas industrias (Fernández, 2002).

Rodríguez (2006) clasifica las aguas residuales de la siguiente forma:

Aguas residuales domésticas: aquellas procedentes de zonas de vivienda y de servicios generadas principalmente por el metabolismo humano y las actividades domésticas.

Aguas residuales industriales: todas las aguas residuales vertidas desde locales utilizados para efectuar cualquier actividad comercial o industrial, que no sean aguas residuales domésticas, ni aguas de escorrentía pluvial.

Aguas urbanas: las aguas residuales domésticas o la mezcla de las mismas con aguas residuales industriales y/o aguas de escorrentía pluvial. Habitualmente todas se recogen en un sistema colector y son enviadas mediante un emisario terrestre a una planta EDAR (Estación Depuradora de Aguas Residuales). Las industrias que realicen el vertido de sus aguas residuales en esta red colectora, habrán de acondicionarlas previamente.

Los criterios de los autores expuestos anteriormente se complementan entre sí y detallan con gran precisión la definición de agua residual, así que la autora considera que la mejor clasificación que se le puede dar a las aguas obtenidas en los procesos petroleros, consideradas aguas oleosas, es la de aguas industriales, en otras literaturas se consideran estas aguas negras o cloacales.

1.3 Indicadores de contaminación en las aguas residuales

La contaminación del agua no es más que la presencia de uno o más contaminantes o cualquier combinación de ellos que perjudiquen o resulten nocivos para uno o varios de los factores o componentes del medio en cualquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o encontrarse por encima de sus concentraciones normales en cualquier elemento del medio ambiente, altera su composición y condición natural (Urbieta, 2005; Serrano, *et. al.*, 2006). La composición de las aguas residuales se analiza con diversas mediciones físicas, químicas y biológicas.

La concentración orgánica se mide con los análisis DBO₅ y DQO. La DBO₅ es la cantidad de oxígeno empleado por los microorganismos a lo largo de un período de 5 días para descomponer la materia orgánica de las aguas residuales a una temperatura de 20°C. De modo similar el DQO es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica por medio del Dicromato en una solución ácida y convertirla en dióxido de carbono (CO_{2(g)}) y agua (H₂O). El valor de DQO es siempre mayor que el DBO₅ porque muchas sustancias orgánicas pueden oxidarse químicamente pero no biológicamente. La DBO₅ se usa para comprobar la carga orgánica de las aguas residuales municipales e industriales biodegradables sin tratar o tratadas. La DQO se usa para comprobar la carga orgánica de las aguas residuales que no son biodegradables o contienen compuestos que inhiben la actividad de los microorganismos (Menéndez, 2007; Teichert y col., 2017).

Relación entre la DBO₅ y la DQO:

La proporción de DBO₅ a DQO da información sobre la degradabilidad de los compuestos presentes en las aguas residuales. Si la DBO₅ está biodegradada, se elimina simultáneamente la “cantidad” correspondiente de DQO. Si todos los

compuestos de las aguas residuales son biodegradables en un plazo de cinco días, la proporción DBO_5 : DQO es 1, y de 0,6-1 indica compuestos fácilmente degradables en el agua residual, proporciones inferiores a 0,6 indican compuestos poco degradables. Después de un tratamiento biológico de aguas residuales, sólo los compuestos no biodegradables permanecen en el efluente. Esta carga orgánica restante impide el reciclaje del agua, de modo que las aguas residuales que se liberan al medio ambiente pueden tener impactos ambientales dañinos (Marsilli, 2005; Teichert y col., 2017).

1.4 Composición de las aguas residuales oleosas

Las aguas oleosas provienen de diversas fuentes y varían ampliamente en la composición y propiedades físicas. Un factor común en ellas, es que contienen tanto aceite como impurezas, gruesas y finas que forman una emulsión estable y un alto contenido de hidrocarburos, según Teas *et al.*, (2002), Brito (2006) y Ortiz *et al.*, (2006).

Las aguas oleosas que provienen de actividades petroleras son una mezcla de hidrocarburos, sólidos y agua, que normalmente se presentan como una emulsión difícil de separar.

1.5 Daños al medio ambiente ocasionados por aguas residuales oleosas

Una disposición inadecuada de las aguas residuales oleosas, puede resultar una contaminación de las aguas superficiales, las aguas subterráneas y los suelos, esto trae consigo afectaciones de forma directa o indirectamente a casi todo ser vivo, por lo que un adecuado tratamiento de estas aguas, permite un aumento de la calidad de vida.

Los daños ocasionados por las aguas residuales provenientes de los procesos del petróleo dependen de varios factores: tipos de petróleo (crudo o refinado), cantidad liberada, distancia del tipo de liberación desde el cuerpo de agua receptor, época del año, temperatura del agua, clima y corrientes oceánicas. El petróleo que llega al mar se evapora o es degradado lentamente por bacterias. Los hidrocarburos orgánicos volátiles del petróleo matan inmediatamente varios animales,

específicamente en sus formas larvales. Otras sustancias químicas permanecen en la superficie y forman burbujas flotantes que cubren las plumas de las aves que se zambullen, lo cual destruye el aislamiento térmico natural y hace que se hundan y mueran. Los componentes pesados del petróleo que se depositan en el fondo del mar pueden matar animales que habitan en las profundidades como cangrejo, ostras, etc., o los hacen inadecuados para el consumo humano (Barron, 2012; Hernández, 2017). En tierra muchos animales también sufrirán daños. Los humanos obtendrán los efectos a través de la inhalación, la piel e irritación en los ojos (Brody *et al.*, 2010).

Muchos investigadores han trabajado en los aspectos e impactos que producen los derrames de residuos oleosos en los ecosistemas con el tiempo. Además de todos estos efectos, las aguas residuales oleosas pueden ser causa de situaciones epidemiológicas en núcleos poblacionales ya sea por encontrarse estos en el entorno de las zonas de vertimiento o por el consumo de productos animales o vegetales que pudieran contaminarse con tales aguas por manejos inadecuados o por la acción indolente de quienes utilizan éstas para el riego de cultivos sin el tratamiento adecuado o por captura de peces en lagunas y ríos contaminados (Henkel *et al.*, 2012; Chang *et al.*, 2014; Akob *et al.*, 2016; Lauer, *et al.*, 2016).

1.6 Tratamiento de aguas residuales oleosas

Las aguas residuales oleosas (AO) obtenidas en los procesos industriales tales como de industrias petroquímica, refinerías de petróleo, transporte y metalurgia, necesitan ser tratadas antes de verterse al medio ambiente (Amed *et al.*, 2017).

Muchos países se esfuerzan para encontrar una paridad en la eficiencia y costos considerables en el tratamiento de AO y darle un uso para evitar el consumo de agua fresca en la industria como por ejemplo el control de polvos, control de incendio y lavado de automóviles (Veil, 2004).

El nivel de tratamiento recomendable dependerá del uso final de las aguas tratadas.

En la figura 1.1 se reflejan las técnicas y procesos del tratamiento de aguas residuales

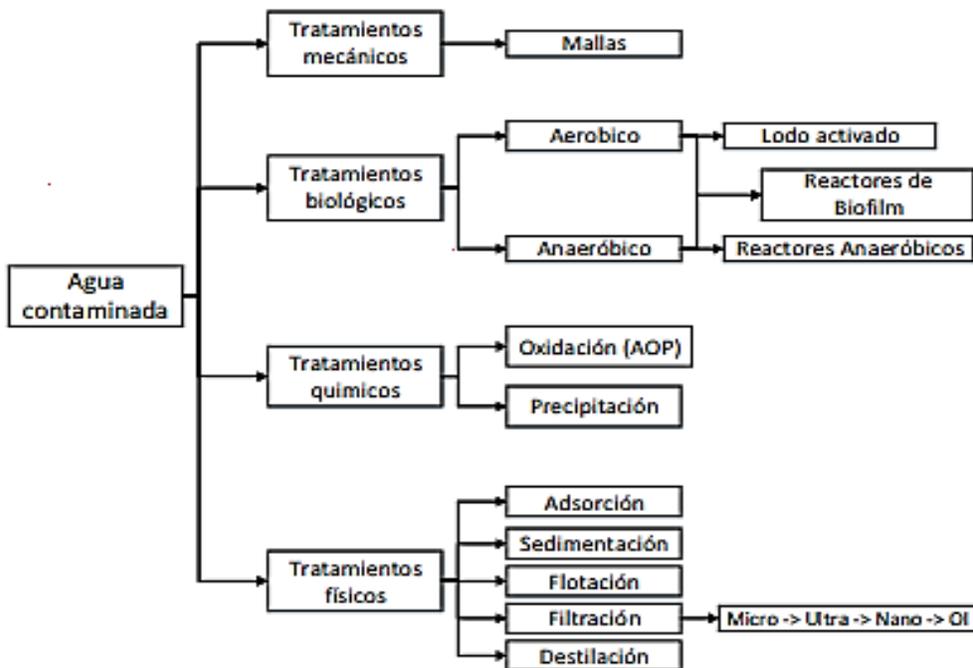


Figura: 1.1 Métodos básicos en tratamiento de aguas

Fuente: Teichert y col. (2017).

Tratamiento mecánico:

Los métodos de tratamiento mecánico son métodos que aplican exclusivamente a elementos mecánicos estáticos por donde se hace pasar el flujo contaminado para remover materiales. Principalmente, se utilizan como una etapa de tratamiento primario y por lo tanto sirven como etapa de pre clarificación. Los compuestos sólidos e inorgánicos, así como las partículas suspendidas flotantes de mayor tamaño, que pueden perturbar e interferir en otras etapas del tratamiento, se pueden eliminar de las aguas residuales con este método. Un método típicamente aplicado son pantallas o mallas. Con estos componentes también se previene el daño y obstrucciones de equipos, tuberías y accesorios de aguas abajo, que por lo general son de alto costo. Dependiendo de la composición de las aguas residuales, se aplican mallas gruesas (típicamente con aberturas de 6 mm o más) o mallas finas (1,5 - 6 mm) (Teichert y col., 2017).

Tratamiento biológico:

Constituyen una serie de importantes procesos de tratamiento que tienen en común la utilización de microorganismos (entre las que destacan las bacterias) para llevar a cabo la eliminación de componentes indeseables del agua, aprovechando la actividad metabólica de los mismos sobre esos componentes. La aplicación tradicional consiste en la eliminación de materia orgánica biodegradable, tanto soluble como coloidal, así como la eliminación de compuestos que contienen elementos nutrientes (N y P). Es uno de los tratamientos más habituales, no solo en el caso de aguas residuales urbanas, sino en buena parte de las aguas industriales. En la mayor parte de los casos, la materia orgánica constituye la fuente de energía y de carbono que necesitan los microorganismos para su crecimiento. Además, también es necesaria la presencia de nutrientes, que contengan los elementos esenciales para el crecimiento, especialmente los compuestos que contengan N y P, por último, en el caso de los sistemas aerobios, la presencia de oxígeno disuelto en el agua.

Este último aspecto será clave a la hora de elegir el proceso biológico más conveniente. En el metabolismo bacteriano juega un papel fundamental el elemento aceptor de electrones en los procesos de oxidación de la materia orgánica. Este aspecto, además, tiene una importante incidencia en las posibilidades de aplicación al tratamiento de aguas (Teichert y col., 2017).

Los lodos activados son sistemas de tratamiento biológico en los que se mezclan las aguas residuales que han de ser tratadas con el caldo de cultivo de los microorganismos, donde las sustancias contaminantes son degradadas en medio aerobio, de forma que los lodos activados se depositan en el fondo del tanque y en la parte superior quedan las aguas ya tratadas. Es un sistema de tratamiento basado en el contacto del residual crudo con una parte del volumen de lodo químico bacteriológicamente activo, en un tanque de aireación con suficiente oxígeno disuelto para estabilizar la materia orgánica y mantener condición aerobia en todo el proceso, seguido por una separación líquido – sólido en un sedimentador secundario (Díaz, 2006)

En los últimos años se ha desarrollado el proceso de Biofiltración de Lecho Empacado. Este proceso aplica fundamentalmente medios orgánicos que pueden actuar como resinas naturales capaces de fijar diferentes contaminantes mediante mecanismos de adsorción/absorción y que favorecen la implantación de microorganismos degradadores de estos contaminantes. Así mismo se utilizan matrices inorgánicas o la mezcla de ellas (Díaz, 2019).

La bioremediación es otro tratamiento biológico natural que confía en los microorganismos para degradar el contaminante en las fuentes de agua, el éxito de la tecnología por bioremediación se ha comprobado en el derramamiento de petróleo ya que muchos microorganismos son capaces de degradar grandes cantidades de hidrocarburos que se encuentran en el agua (Kachieng'a, 2015).

Sistemas aerobios:

La biodegradación de la materia orgánica es el resultado de la acción de microorganismos en presencia de oxígeno molecular. Estos microorganismos convierten la materia orgánica en CO₂, agua y material celular propio (lodo activado). La mayoría de las técnicas aplicadas corresponden a procesos de lodos activados y de película fija.

La presencia de Oxígeno (O₂) hace que este elemento sea el aceptor de electrones, por lo que se obtienen unos rendimientos energéticos elevados, provocando una importante generación de fangos, debido al alto crecimiento de las bacterias aerobias. Su aplicación a aguas residuales puede estar muy condicionada por la baja solubilidad del oxígeno en el agua (Teichert y col., 2017).

Sistemas anaerobios:

La digestión anaeróbica se lleva a cabo en ausencia de oxígeno, por una serie de microorganismos anaeróbicos, principalmente bacterias, que tienen tasas de crecimiento más bajas que los microorganismos aeróbicos. La ventaja del tratamiento anaeróbico en comparación con el tratamiento aeróbico es, por un lado, que no se requieren grandes cantidades de energía para la aireación; y, por el contrario, el biogás producido puede ser utilizado en forma de energía (térmica o eléctrica). Además, el exceso de lodo producido es significativamente más bajo que

en el tratamiento aeróbico. Sin embargo, la DQO (Demanda Química de Oxígeno) no se puede bajar tanto como en el tratamiento aeróbico y el sistema es más susceptible a las cargas fluctuantes (Teichert y col., 2017).

Sistemas anóxicos:

Se denominan así los sistemas en los que la ausencia de O₂ y la presencia de nitratos, hacen que este último elemento sea el aceptor de electrones, transformándose, entre otros, en Nitrógeno (N_{2(g)}), elemento completamente inerte. Por tanto, es posible, en ciertas condiciones, conseguir una eliminación biológica de nitratos (desnitrificación).

Tratamiento químico:

En el tratamiento químico del agua, la composición del agua se cambia por la adición de productos químicos. Los métodos más comunes son la oxidación química y la precipitación química, que se explican a continuación.

Oxidación química (procesos avanzados de oxidación): Los procesos avanzados de oxidación dependen de la producción de radicales altamente reactivos que se generan a partir del agente oxidante respectivo. Estos radicales oxidan de forma no específica todos los compuestos orgánicos (y a veces inorgánicos) existentes en las aguas residuales. Los compuestos orgánicos no se degradan, pero su estructura química se altera, por lo que los compuestos persistentes son accesibles para la biodegradación y por lo tanto para el tratamiento biológico.

Precipitación química / Floculación: La precipitación química es el método más común para eliminar las partículas más finas y disueltas de las aguas residuales que se comportan como una suspensión coloidal para esto se utilizan procesos químicos que tienen como función aglomerar las partículas y por consiguiente la floculación.

Para convertir las partículas disueltas en una forma de partículas sólidas, se añade un agente de precipitación al agua residual. Esta reacción provocada por el agente, hace que las partículas disueltas formen partículas sólidas. La precipitación se utiliza para la separación de iones metálicos (metales pesados), sulfuros y fosfatos.

El hierro y las sales de aluminio son los agentes precipitantes más utilizados. En un proceso físico subsiguiente, estas partículas sólidas pueden separarse (ZHDW, 2002; Sellami, 2016).

Tratamientos físicos: Los métodos físicos de tratamiento de aguas residuales realizan la eliminación de sustancias mediante el uso de fuerzas naturales, tales como la gravedad, las fuerzas de Van der Waals, así como mediante el uso de barreras físicas tales como filtros. Los métodos más aplicados se explican a continuación.

Adsorción física: Es la adsorción de partículas (adsorbato) de una fase líquida a la superficie de un cuerpo sólido (adsorbente). La adsorción física se basa en fuerzas de Van der Waals. El grado de adsorción depende de diversos factores, tales como presión, temperatura, textura superficial del adsorbente y estructura química de la sustancia a adsorber. La superficie adsorbente no puede unirse ilimitadamente a las moléculas. La fijación molecular es entonces terminada, cuando se ha establecido un equilibrio de adsorción entre el adsorbato y las partículas ya adsorbidas. Para conseguir una adsorción adicional, el adsorbente debe ser regenerado, reactivado o sustituido. Los adsorbentes utilizados en el tratamiento de aguas residuales son principalmente materiales basados en carbono, tales como carbón activado, o materiales minerales, por ejemplo, la zeolita (Hansen B.R, 1994; Teichert y col., 2017).

Sedimentación: Según Teichert y col., (2017), la sedimentación es la separación de partículas suspendidas que son más pesadas que el agua. La sedimentación de las partículas se basa en la fuerza de gravedad de las diferencias de densidad entre las partículas y el fluido. La sedimentación es ampliamente utilizada en sistemas de tratamiento de aguas residuales en diferentes etapas de tratamiento, particularmente como pre y postratamiento. Para el proceso de sedimentación se aplican frecuentemente clarificadores para eliminar:

- Sólidos y materia particulada en la etapa de tratamiento primario.
- Lodos del tratamiento biológico.
- Conglomerados del tratamiento químico.

La flotación: Es un proceso para separar selectivamente los materiales hidrófobos de los hidrófilos. El proceso depende de la adhesión selectiva de las burbujas de aire a las superficies minerales en una suspensión mineral / agua (aguas residuales). Las burbujas de aire se unirán a partículas más hidrófobas, las harán flotar y transportarlas a la superficie del agua, donde pueden ser removidas (Moosai and Dawe, 2003; Napier-Reid, 2005).

Existen varios dispositivos de flotación y actualmente el más común usado es el de aire disuelto (*DAF*) por sus siglas en inglés. Otros usados son los de impelente o aireación mecánica por agitación, pero estos consumen mucha energía por lo que son una desventaja.

En el caso del aceite emulsificado, el diámetro de las gotas normalmente es menor que 50 μm , lo que dificulta su separación por procesos gravitacionales. Frecuentemente, el tratamiento de aceite emulsificado requiere la utilización de otros procesos tales como flotación asociada a la adición de productos químicos (Rubio, 2002; Rosa y Rubio, 2003).

Los sistemas *DAF* utilizan los coagulantes normalmente empleados en los sedimentadores por gravedad. Se considera que las moléculas orgánicas con alto peso molecular son removidas con hierro o aluminio, si se emplea el pH y dosis óptima (Hurtado, 2006).

Los procesos de flotación por aire disuelto (*DAF*) han sido probados con eficacia para remover hidrocarburos y materia suspendida en una gran variedad de aguas residuales, incluyendo las que originan las actividades de producción y refinación de petróleo (Klock, 2004; Schultz, 2006).

Filtración: Es una operación física mediante la cual los sólidos se separan de los fluidos con un filtro. El filtro permite que pase el fluido, pero retiene el material sólido. El fluido que pasa a través del filtro se llama filtrado, el material sólido que permanece en el filtro se denomina residuo (ZHDW, 2002; Sellami, 2016).

La filtración por membranas ha alcanzado gran connotación en el mundo en el contexto del tratamiento de aguas residuales oleosas (Zhong *et al.*, 2003; Abadi *et al.*, 2011; Das *et al.*, 2017). Ya que, la separación por gravedad, floculación,

coagulación, desnatado, desmasificación, flotación por aire disuelto, no es eficaz cuando la concentración de aceite es muy baja (Abadi, 2011; Elnenay *et al.*, 2017).

En el proceso de tratamiento del agua oleosa los contaminantes orgánicos (hidrocarburos, aceite soluble etc. y los microbios pueden formar una capa de gel delante de la superficie de la membrana aumentando la resistencia de la membrana y la reducción de la penetración del flujo (Napier-Reid, 2005).

El mayor obstáculo de la filtración por membrana es el ensuciamiento de la membrana. El ensuciamiento de la membrana es un proceso mediante el cual una solución o una partícula se deposita sobre una superficie de membrana o en poros de membrana, de manera que el rendimiento de la membrana se degrada. El sistema tiene que ser detenido con frecuencia para restaurar el flujo por lavado a contracorriente, limpieza y sustitución, lo que resulta en altos costos de mantenimiento y operación. A continuación, se explican con más detalle los diferentes tipos de filtración.

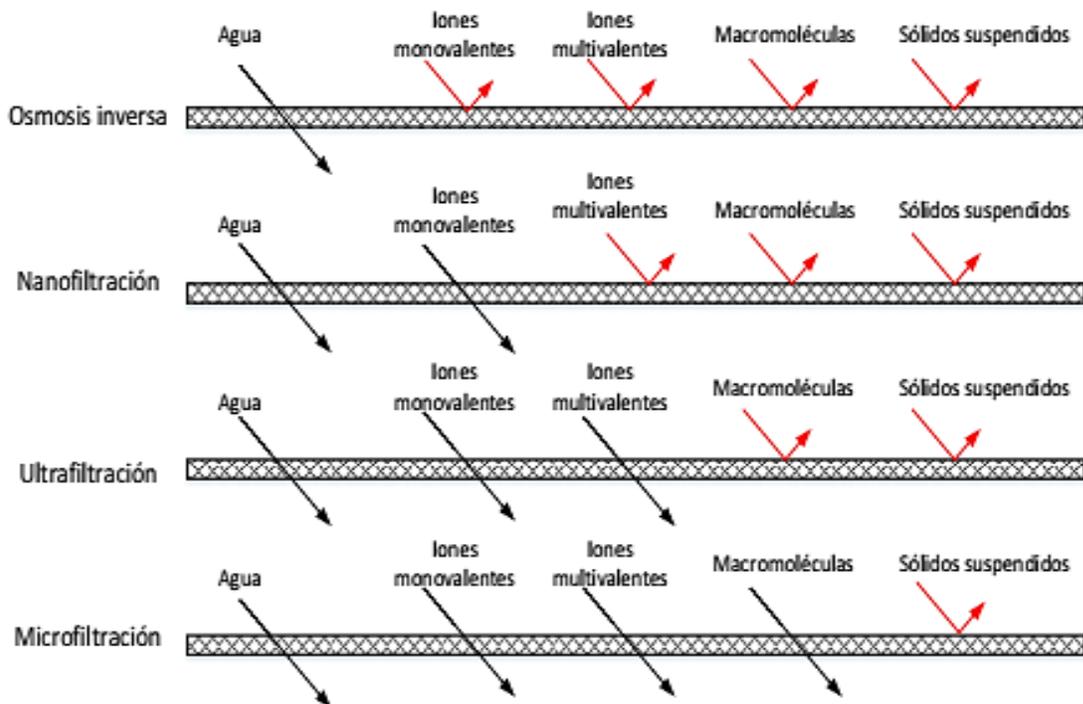


Figura. 1.2 Características de diferentes filtraciones por membranas

Fuente: Teichert y col., (2017)

Microfiltración: Esta operación sirve usualmente como un pretratamiento para otros procesos de separación tales como la ultrafiltración, y un postratamiento para procesos de filtración gruesa. El tamaño típico de poro utilizado para la microfiltración oscila entre aproximadamente 0,1 y 10 μm . De esta manera, las membranas son capaces de prevenir partículas tales como sedimentos, algas, protozoos, hongos y bacterias.

Ultrafiltración: Industrias como la química y farmacéutica, el procesamiento de alimentos y bebidas y el tratamiento de aguas residuales, emplean ultrafiltración para reciclar el flujo o agregar valor a los productos posteriores. El tamaño de poro típico utilizado para la ultrafiltración oscila entre aproximadamente 0,01 y 0,1 μm . De esta manera, las membranas pueden prevenir virus y otros patógenos (Teichert y col., 2017).

La ultrafiltración es una tecnología de membrana representativa (Bai *et al.*, 2013). Ha recibido gran aceptación debido a sus grandes ventajas, tales como la eficacia en la separación, bajo consumo de energía, y fácil mantenimiento (Bai *et al.*, 2012). Estas poseen una estructura capaz de separar partículas grandes, microbios, gotas de aceite y disolver bio-macromoléculas (proteínas, virus, etc.)

El tratamiento de emulsiones estables sobre todo agua-aceite necesita el tratamiento moderno como los procesos de separación por membrana como microfiltración y ultrafiltración, estas llegan a ser las innovaciones más efectivas en la tierra (Atadashi *et al.*, 2015).

Nanofiltración: Las membranas de nanofiltración tienen tamaños de poro en el rango de 1 a 10 nm. Esto permite la eliminación de sustancias de alto peso molecular, materiales coloidales y moléculas poliméricas orgánicas e inorgánicas. Los materiales orgánicos de bajo peso molecular e iones como el sodio, el calcio, el cloruro de magnesio y el sulfato no son eliminados por las membranas ultrafiltrantes.

Osmosis Inversa: Los tamaños de poro de la membrana varían de 0,1 a 5 nm. Es, con mucho, el mejor proceso de filtración por membrana disponible para la

industria. Se utiliza a gran escala para la desalinización y purificación del agua, ya que filtra todo menos las moléculas de agua (Teichert y col., 2017).

Como se ha analizado en este capítulo existen distintas tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales, en esta investigación se toma como alternativas para lograr que el agua tratada cumpla con los estándares de calidad para ser vertida al proceso de biofiltración de lecho empacado y el tratamiento físico-químico, con posterior flotación por aire disuelto (*DAF*) para llevar a condición de vertimiento las aguas oleosas generadas por la División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas.

1.7 Tratamiento de aguas oleosas derivadas del petróleo en Cuba

En Cuba se conoce, de la instalación de complejos sistemas de tratamiento de aguas oleosas residuales, como es el caso de la Refinería de Cienfuegos, que requiere un área grande de emplazamiento, así como sencillos sistemas de tratamiento físico primario, para la separación de aguas-lodos-fuel oíl, compuestos por ejemplo por separadores API, PPI, CPI y/o filtros verticales semiautomáticos con apoyo de Skimmer, estos últimos costosos, aplicados en empresas comercializadoras de combustibles.

Por lo general los sistemas de tratamiento de las aguas oleosas reconocidos responden a entidades de perforación, extracción, refinación y comercialización de petróleo, donde se utilizan y procesan grandes volúmenes de agua e hidrocarburos respectivamente y en correspondencia se generan grandes cantidades de residuos de procesos y efluentes acuosos oleosos (Chaves, 2012).

Dado que el Petróleo Crudo, combustibles derivados, grasas y aceites son viscosos y menos densos que el agua, estos tienden a depositarse en la superficie de esta, generando una capa flotante que impide el paso de la luz, así como también impide el paso del aire y consecuentemente sólo se producen procesos anaerobios donde la producción de energía es menor, razones por las que este tipo de tratamiento es poco utilizado para eliminar los contaminantes en aguas oleosas residuales. También atenta que los lodos residuales que generan estos procesos son petrolizados. Así mismo, en dichos efluentes se integran sustancias de difícil

degradación biológica. En el tratamiento de aguas residuales oleosas se utiliza por lo general tratamiento físico o físico-químico.

En el caso de las aguas residuales oleosas el tratamiento primario se realiza para reducir hidrocarburos, aceites, grasas, lodos petrolizados y metales pesados disueltos que en las grandes industrias se realiza con maquinaria, de ahí que es conocido también como tratamiento mecánico, pero que no es viable en el caso de pequeñas industrias y talleres de transporte donde son más factibles los métodos de sedimentación-decantación, separación por gravedad y otros más sencillos. Una vez eliminados de un 40 a un 60% los sólidos en suspensión, reducida de un 20 a un 40% la DBO₅ y de un 60 a un 99% las sustancias oleaginosas, por medios físicos en el tratamiento primario, el tratamiento secundario reduce en el agua la cantidad de materia orgánica, las trazas de aceites, olores, colores, metales pesados y compuestos no aptos para su destino final, que difiere en tecnología según calidad de agua requerida para ser reutilizada o vertida al cuerpo receptor (Chaves, 2012).

Investigaciones recientes han demostrado que diferentes materiales pueden ser empleados como biosorbentes de hidrocarburos. Tal es el caso de fibras de palma, coco, caña de azúcar, algunas algas (buchón de agua), tallos de flores, cabellos humanos, plumas de pollos, cáscara de guayaba, bagazo de caña, paja de arroz, fibras de henequén, cáscara de café entre otros. Estudios realizados por Knight *et al.*, (2000); Reyes (2003); Ortiz (2006), Salazar (2012) sobre biomateriales lignocelulósicos han aportado resultados significativos en la remoción de hidrocarburos.

1.8 Gestión ambiental en Cuba

En Cuba la protección del medio ambiente tiene gran importancia. El Estado protege el medio ambiente y los recursos naturales del país. Reconoce su estrecha vinculación con el desarrollo económico y social sostenible para hacer más racional la vida humana y asegurar la supervivencia, el bienestar y la seguridad de las generaciones actuales y futuras (Iturralde, 2011).

Desde el triunfo de la Revolución el país ha tenido importantes avances y logros en la esfera ambiental como son:

- Creación de la Comisión Nacional para la Protección del Medio Ambiente y Conservación de los Recursos Naturales (COMARNA) (1976).
- Promulgación del Decreto Ley 118. Estructura, organización y funcionamiento del sistema nacional de protección del medio ambiente y su órgano rector (1990).
- Aprobación del Programa Nacional del Medio Ambiente y Desarrollo (1993).
- Creación del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA) (1994).
- Promulgación de la Ley 33 de Protección del medio ambiente y del uso racional de los recursos naturales (1997).
- Aprobación de la Estrategia Ambiental Nacional. (EAN) (1997), actualizada (2016-2020).
- Promulgación de la Ley 81. Estrategia nacional para la protección del medio ambiente y del uso racional de los recursos naturales (1998).
- Creación de la red nacional de producción más limpia mediante un proyecto auspiciado por la Organización de Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI) (2001).
- NC 133, NC134 Y NC 135: 2002 –Residuos Sólidos Urbanos. Requisitos Higiénicos Sanitarios y Ambientales.
- Resolución 136, Reglamento para el manejo integral de desechos peligrosos., Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, 28 de agosto, Cuba (2009).

Un aspecto importante en el análisis de la situación ambiental en el país lo constituye la evaluación del impacto ambiental, actividad que por su trascendencia está recogida en La Legislación de la República, así el artículo 4 de la Ley 81 del medio ambiente postula que “La Evaluación de Impacto Ambiental tiene el propósito primordial de proteger el medio ambiente y, a ese fin, debe valorar y proporcionar la información de los probables efectos ambientales a los encargados de tomar

decisiones, de forma tal que permita, de ser necesario, aprobar condicionadamente o denegar la ejecución de un proyecto de obra o actividad, estableciendo los procedimientos adecuados a esos fines.” Esto está corroborado por Serrano *et al.*, (2006).

En la provincia de Matanzas también se desarrollan acciones encaminadas a la protección del medio ambiente, por ejemplo, los tratamientos de las aguas obtenidas de procesos industriales que dentro de éstas se encuentra la planta de tratamiento de agua oleosa de la División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas objeto de esta investigación, la más grande del país con capacidad para tratar 20 m³/h del agua residual obtenida de los procesos petroleros.

La autora considera que es importante concientizar a la población de la necesidad de conocer las acciones que se han tomado para la protección del medio ambiente, así como las causas y consecuencias que proporcionan su deterioro.

1.9 Conclusiones parciales

- Las aguas oleosas que provienen de actividades petroleras producen severos daños a los ecosistemas por lo que es necesario su tratamiento para poderla verter al cuerpo receptor.
- Existen varios tratamientos efectivos que permiten reducir o eliminar las materias contaminantes en las aguas residuales oleosas, entre las más utilizadas se encuentran los sistemas DAF, el tratamiento microbiológico y la filtración por membrana. Esta última es la más efectiva y por esto ha alcanzado actualmente gran connotación en el mundo.
- De los distintos tipos de filtración por membrana, la Osmosis Inversa resulta ser el mejor proceso disponible para las industrias.

CAPÍTULO II: Materiales y métodos

En este capítulo se describe el proceso de tratamiento de aguas residuales oleosas de la DTCCM, se evalúa la calidad del efluente, se muestra la metodología utilizada en la investigación para dos propuestas de tratamiento: El tratamiento del residual líquido por Biofiltración y el tratamiento físico químico con sus características operacionales. Se describe la metodología para un nuevo sistema de recirculación utilizando los softwares profesionales *Tksolver* y *Pump System Improvement Modeling Tool* (PSIM 2007).

2.1 Descripción del Proceso de tratamiento de aguas oleosas. Planta de Tratamiento

El esquema de trabajo de la Planta (fig. 2.1) consta de dos bloques de equipos; el primero está enclavado en el Tanque 14 y tiene como objetivo efectuar la equalización total del residual oleoso a tratar, a través del skit de bombas instalado, logrando además la separación del grueso de los aceites fuera de emulsión. El segundo bloque de equipos está en la planta principal y tiene el objetivo de dejar en condiciones de vertimiento el agua resultante de sus procesos de depuración.

Ambos bloques de equipos presentan pizarras generales alimentadas desde la red eléctrica a un voltaje trifásico de 460 V y su funcionamiento es gobernado por autómatas "SIEMENS S7-300", que se comunican entre sí a través de una red "PROFIBUS". En el autómata maestro ubicado en la Planta Principal está habilitado un módulo para conexión "LAN" con la computadora personal que es utilizada como terminal de diálogo y que se encuentra en el cuarto del operador, brindando la posibilidad del monitoreo de señales y la parametrización en tiempo real de todos los equipos. El funcionamiento de la planta es completamente automático, pero puede tenerse control manual puntual sobre cada uno de los equipos.

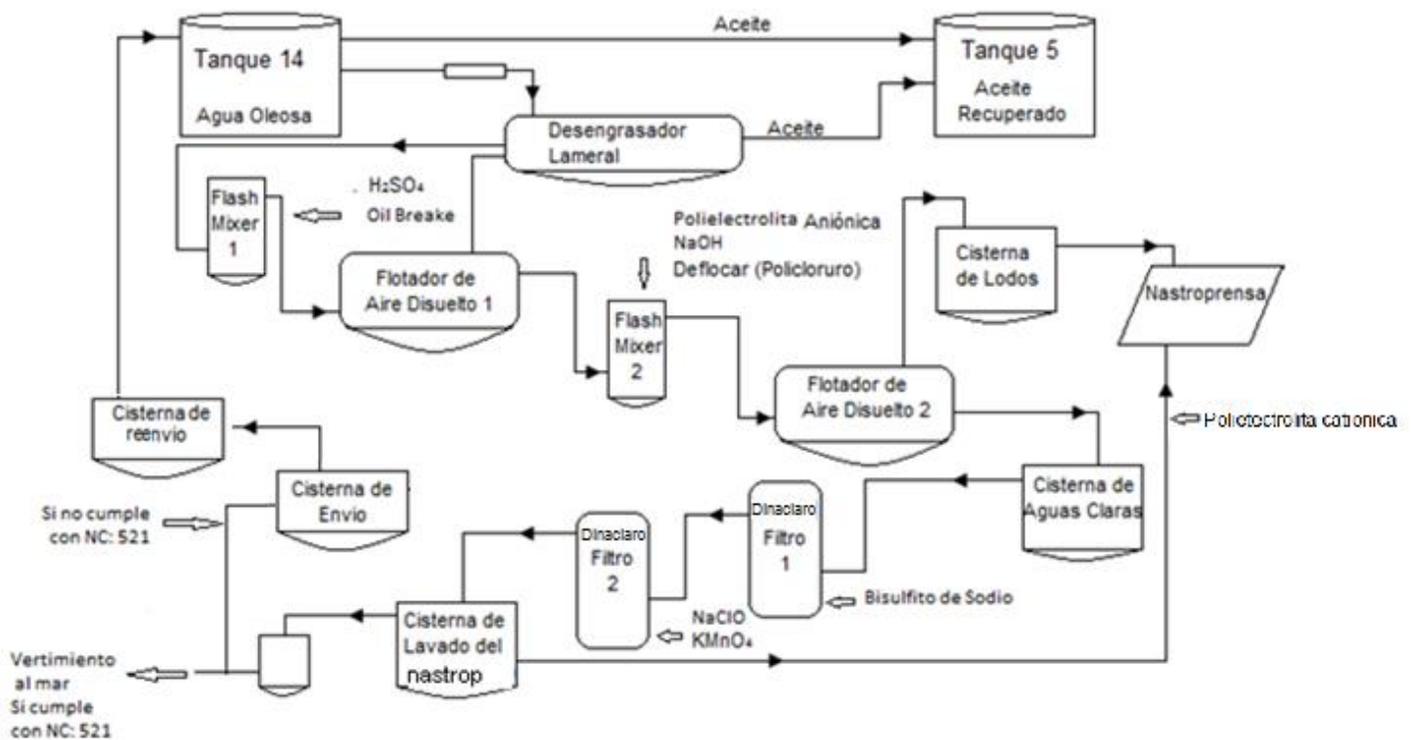


Figura 2.1 Descripción del flujo tecnológico de la PTR

Fuente: Gómez, (2018b)

1. Los residuales oleosos (agua de sentina de los buques, drenajes de los tanques del área de bahía) se reciben en el tanque 14 a través de las líneas habilitadas para este fin.

2. El residual de los buques será bombeado por el barco mientras los del área de bahía serán recolectados en una cisterna y bombeados al tanque 14.

3. Cuando se da la orden de “*START IMPIANTO*” (Arranque de Planta) la automática de la planta chequea los siguientes niveles:

- Tanque de acumulación de residuales (TK-14).
- Tanque de aceites recuperados (TK-5).
- Depósito de aceites recuperados del Desengrasador Lateral.
- Depósito de lodos aceitosos del Flotador a Aire Disuelto 1 (DAF 1).
- Cisterna de lodos.

- Cisterna de aguas claras.
- Entrada de residual en el *Dinaclaro 1* (Filtro 1).
- Entrada de residual en el *Dinaclaro 2* (Filtro 2).
- Cisterna de aguas de lavado del Nastro prensa.
- Cisterna de envío.
- Cisterna de reenvío.
- Depósitos de productos químicos.

Se muestra el estado de los mismos y proyectándose cualquier alarma peligrosa que detengan los procesos involucrados. Si no hay señales de alarma entonces se ponen en marcha los siguientes equipos:

- Los mezcladores de Productos Químicos (*Flash Mixer*).
- El preparador de Polielectrolita Aniónica.
- El preparador de Polielectrolita Catiónica.
- El Compresor de aire.
- El grupo Hidropresor.
- Evacuación del sistema de aguas de recogida.
- El resto de la infraestructura de trabajo.

De igual forma se muestra el estado de los mismos y se proyecta cualquier alarma peligrosa, pero no son detenidos si se detecta cualquier otra alarma ajena a su funcionamiento.

Ecualización del residual oleoso. Tanque 14 y Skit de bombas

Si después de la orden de puesta en marcha, existe el nivel mínimo predeterminado en el tanque de acumulación de residuales (TK-14); se activa el bloque de pretratamiento y comienzan a funcionar las bombas de recirculación con cuatro bombas, de las cuales dos son reserva, recirculará el agua oleosa del tanque a través de un circuito hidráulico instalado en el interior del tanque logrando una completa homogenización y emulsión de los oleosos de mayor densidad; de manera simultánea en el interior del tanque se separa la mayor parte del combustible suspendido en agua a través del funcionamiento de dos *Skimmer* y dos Bombas neumáticas flotantes y es evacuado hacia el tanque # 5 de aceites recuperados.

Tratamiento del agua oleosa. Planta Principal

El residual ecualizado se envía a la Planta Principal donde es tratado a través de un proceso que pasa por ocho etapas. La entrada del agua a la planta es chequeada por un caudalímetro y una válvula proporcional que aseguran un caudal constante de 20 m³/h.

Etapa 1 (Desengrasador Lamerl)

El residual al entrar en la Planta es depositado en un Desengrasador Lamerl que tiene el objetivo de eliminar los posibles aceites fuera de emulsión que aún existan por medio de un *Skimmer* y una bomba neumática (hay una de reserva instalada) controlada por un nivel que las conduce al depósito de aceites recuperados en el tanque # 5. Las borras remanentes son extraídas por el fondo de la tolva de entrada de la máquina. La altura con que ha sido dispuesto el Desengrasador Lamerl permite el trasiego del residual por gravedad por las siguientes etapas del proceso de tratamiento del agua residual.

Etapa 2 (Flash Mixer 1)

Después del Desengrasador Lamerl, el residual es conducido a la primera etapa del *Flash Mixer 1* (mezclador rápido 1) donde se dosifica ácido sulfúrico (H₂SO₄, 60%) controlado por un pHmetro hasta regular un valor de 4 y se dosifica el coagulante Oíl Break, proporcional a la señal del caudalímetro de entrada. El *Flash Mixer 1* está diseñado para romper las emulsiones de aceite presentes en el agua.

Etapa 3 (Flotador de Aire Disuelto 1, DAF1)

El *DAF 1* (flotador a aire disuelto 1), pone en marcha su bomba de recirculación con inyección de aire con un anticipo de tiempo respecto al bombeo de residual y detiene su bomba de recirculación con inyección de aire con un retardo de tiempo respecto al bombeo de residual. El raspador del flotador trabaja en paralelo a la bomba de recirculación del flotador, enviando los lodos aceitosos a un depósito y una bomba neumática controlada por un nivel que conduce dichos lodos aceitosos a la entrada del Desengrasador Lamerl. La unidad *DAF 1* tiene el objetivo de

eliminar por flotación, los aceites que previamente han sido sacados de emulsión por el *Flash Mixer 1*, entonces el residual es conducido al *Flash Mixer 2*.

Etapa 4 (*Flash Mixer 2*)

En la primera etapa del *Flash Mixer 2* (mezclador rápido 2) se dosifica el coagulante Policloruro de Aluminio (PAC o Deflocar) proporcional a la señal del caudalímetro de entrada e Hidróxido de Sodio (NaOH, 40%) controlada por un pHmetro hasta regular un valor entre 6,8 y 7,8. En la segunda etapa del *Flash Mixer 2* se dosifica el floculante Polielectrolita Aniónica proporcional a la señal del caudalímetro de entrada. En el primer estadio del mezclador rápido 2 se realiza la coagulación de las sustancias suspendidas. En el segundo estadio se realiza la floculación que consiste en el agrandamiento de los pequeños floculos constituidos a través de la coagulación. El mezclador rápido 2 está diseñado para flocular los lodos acompañantes.

Etapa 5 (Flotador de Aire Disuelto 2, *DAF 2*)

El *DAF 2* tiene el mismo sistema de funcionamiento que el *DAF 1*. El raspador del flotador elimina los lodos y los envía a la cisterna de lodos. En estas condiciones es conducido el residual a la cisterna de aguas claras donde una bomba controlada por niveles eleva el residual a un proceso doble de filtración.

Etapa 6 (*Dinaclaro 1*)

El *Dinaclaro 1* es un filtro mecánico ascendente que tiene una electroválvula de inyección de aire para el lavado constante o intermitente, que se activa con retardo de tiempo respecto a la bomba de filtración. En la entrada del *Dinaclaro 1* se inyecta Bisulfito de Sodio (reductor fuerte) controlado por Redoxímetro ubicado a la salida de este *Dinaclaro*, con el objetivo de reducir el Cromo VI hasta Cromo III, el cual no es soluble y por lo tanto es retenido por el filtro. El *Dinaclaro 1* está diseñado en su conjunto para reducir y remover por filtración sobre una cama de cuarcitas y zeolitas el Cromo Hexavalente. Entonces el residual pasa por gravedad al *Dinaclaro 2*.

Etapa 7 (*Dinaclaro 2*)

El *Dinaclaro 2* presenta el mismo principio de funcionamiento que el *Dinaclaro 1*. En la entrada del *Dinaclaro 2* se inyecta Hipoclorito de Sodio (NaClO , 18%, oxidante fuerte) controlado por el Redoxímetro ubicado en la salida de este *Dinaclaro* y Permanganato de Potasio (KMnO_4 , 30%) proporcional a la señal del caudalímetro de entrada. El *Dinaclaro 2* está diseñado en su conjunto para oxidar catalíticamente y remover por filtración sobre una cama de cuarcitas y zeolitas, el cromo libre y otras sustancias disueltas. Entonces el residual es depositado en la cisterna de lavado del Nastroprensa antes de ser vertido al mar desde la misma por gravedad.

Etapa 8 (Línea de Lodos)

La línea de lodos es activada cuando existe la señal del nivel en la cisterna de acumulación de lodos, provenientes del *DAF 2*, el condicionamiento de los mismos es efectuado por la adición de Cloruro Férrico (FeCl_3 , 41%) y Polielectrolita Catiónica de forma volumétrica (productos que favorecen la ruptura de los grandes flóculos y optimizan la deshidratación) antes de ser bombeados para su deshidratación en el Nastroprensa. El material filtrante del Nastroprensa (esteras de lona sintética) es mantenido limpio por una bomba de lavado que funciona en paralelo a su trabajo. Un transportador de tornillo sin fin eleva los desechos sólidos hasta los contenedores de recolección. La línea de lodos convierte en lodos deshidratados listos para su eliminación todo el producto excedente del *DAF 2*.

Los drenajes procedentes del lavado de los *Dinaclaros* y del Nastroprensa, las extracciones de fondo del Desengrasador Lamerol, así como los eventuales vertimientos por limpieza de otros equipos, son conducidos a una cisterna colectora donde una bomba controlada por un nivel envía este residual a la cisterna de reenvío, donde de igual forma una bomba controlada por un nivel trasiega el residual al tanque 14 para ser reprocesado (Gómez, 2018b).

2.2 Análisis Físico-Químico de las aguas residuales

Históricamente la caracterización físico química de las aguas tratadas se realiza con 2 o 3 frecuencias anuales para ello se contrata los servicios del Centro de Investigación del Petróleo (CEINPET). El Laboratorio de Química Ambiental del

CEINPET muestrea el agua a la entrada de la planta y después del tratamiento (cisterna de vertimiento). Las muestras son tomadas con un muestreador de 2,5 l de capacidad y según el método de normalización ISO 5667 se preservan para ser procesadas y analizadas según la NC 521:2007.

En los análisis físico-químicos se emplean métodos estándar establecidos. Los análisis de nitrógeno y fósforo total son subcontratados al Laboratorio de Química Biología de la misma entidad.

Tabla 2.1 Análisis realizados y Métodos de ensayo

Análisis	Métodos de Ensayo
DQO (mg/l)	ISO 6060
pH (25 °C)	ISO 10523
DBO ₅ (mg/l)	ISO 5815
Sulfuros (mg/l)	APHA 4500-SO42
Sólidos suspendidos (mg/l)	APHA 2540
Conductividad (ms/Cm) 25 °C	APHA 2510
Fenoles (mg/l)	ISO 6439
Sólidos Sedimentarios (mg/l)	APHA 2540
Grasa y aceites (G y A) (mg/l)	APHA 5520
Hidrocarburos (HC) (mg/l)	APHA 6440
Nitrógeno total (mg/l)	APHA 4500-N
Fósforo Total (mg/l)	APHA 4500-P

Fuente: Díaz, 2019

2.2.1 Identificación del Problema Ambiental

Se comparan los resultados de la caracterización de las aguas tratadas en la PTR durante los últimos 4 años (2015-2018) con la NC 521:2007 (anexo 1) teniendo en cuenta la ubicación cercana a la zona costera y al mapa de clasificación de cuerpos receptores marinos realizados por el SITMA, con el objetivo de definir si cumplen con los requerimientos para ser vertidas.

Para la propuesta de producción más limpia se analizan muestras puntuales de agua antes y después del tratamiento, en la PTR, lo cual permite corroborar e identificar el problema ambiental.

2.2.2 Análisis Estadístico

Se utiliza el programa *Statgraphics 5.0* desarrollado por *Statistical Graphics Corp .for Windows*, para procesar estadísticamente los resultados obtenidos por el análisis físico-químico, con el objetivo de estudiar y validar el comportamiento de los mismos, que facilitan hacer las propias valoraciones, análisis y finalmente proponer recomendaciones.

2.3 Propuestas de alternativas tecnológicas

Para dar solución al problema identificado se valoran dos propuestas tecnológicas para el tratamiento del efluente:

- Biofiltración
- Tratamiento físico químico recirculando el residual al proceso y ajustando los parámetros operacionales.

Para estudiar ambas propuestas las muestras son tomadas, preservadas y caracterizadas según NC 521:2007 con los métodos de ensayo referidos en el (anexo 1), tal y como se describe en el epígrafe 2.2.

Estos estudios se realizan por investigadores y especialistas del grupo de Ingeniería Ambiental y el Laboratorio de Química Ambiental, además participan otros especialistas y técnicos del Laboratorio de Biotecnología, todos pertenecientes al CEINPET.

2.3.1 Tratamiento del efluente por Biofiltración

El objetivo fundamental de este estudio es mejorar la calidad de vertimiento al cuerpo receptor mediante un tratamiento por Biofiltración. Para este proceso se realizan cuatro experimentos en columnas empacadas (anexo 2) con materiales orgánicos, residuos de otras industrias. Se selecciona el bagazo de caña (Exp 1), la paja de arroz (Exp 2), los lodos activados (Exp 3), la Afromena y Zeolita (Exp 4)

como material de empaque. En este proceso se produce la degradación de los contaminantes mediante la adsorción y biodegradación por los microorganismos propios de estos materiales. Se realizan dos corridas para cada experimento.

2.3.2 Tratamiento Físico- Químico del efluente

El tratamiento físico-químico consiste en la adición de coagulante y floculante con posterior flotación por aire disuelto (*DAF*) para las aguas residuales oleosas tratadas por la PTR. Se evalúa si la modificación propuesta satisface la calidad del agua requerida para ser vertida al cuerpo de agua receptor, según las especificaciones de la NC 521:2007 de acuerdo al Protocolo P-2014-078 REV: 03 (BEROTZ/INTACTA, octubre 2015). Este estudio permite determinar el programa químico de tratamiento en la PTR, así como sus características operacionales.

Las muestras representativas se toman a la salida de la PTR en la cisterna de vertimiento, con un volumen mínimo de 100 l, para ser tratada a escala de laboratorio.

Los reactivos utilizados [coagulante Oíl Break, coagulante Deflocar (PAC o Policloruro de aluminio), floculante Polielectrolita aniónica, reguladores de pH (NaOH, H₂SO₄)] se entregan por la especialista principal de la PTR al centro contratado. Los ensayos se realizan bajo las mismas condiciones operacionales que en la planta.

Equipos utilizados para los ensayos de proceso:

- Equipo *Jar Test* marca AZTEC de fabricación inglesa para coagulación y floculación con posibilidad de ajuste y medición de la velocidad de giro de las paletas (entre 40 y 400 rpm) (anexo 3).
- Equipo de flotación por aire disuelto (*DAF*) de fabricación japonesa (anexo 4) para la realización de los ensayos correspondientes.

Se ensaya el Oíl Break, el Deflocar y la Polielectrolita Aniónica, para seleccionar las condiciones operacionales más adecuadas del sistema químico.

Los coagulantes evaluados se preparan en dilución al 10% mediante pesada directa (utilizando balanza analítica marca Ohns) de una masa de 10 g diluida en 100 ml

de agua. En cada preparación se mantienen condiciones de agitación a 200 rpm durante 3 minutos. Los coagulantes se añaden en el vórtice de agitación de manera rápida, usando una jeringa. Finalizada la preparación, se comprueba la no existencia de grumos, flotados o precipitados. Las preparaciones se realizan diariamente.

El ensayo con los coagulantes, consiste en la adición de un volumen de mezcla diluida de coagulante puro, que permita alcanzar la concentración deseada del producto puro en mg/l, a partir del reactivo diluido. Se añaden en condiciones de agitación de mezcla rápida de 200 rpm durante 3 minutos, para posteriormente mantener agitación de mezcla lenta 40 rpm durante 10 minutos. Ambos reactivos se dejan por 10 minutos, para tomar la muestra de agua tratada del seno de la disolución y someterla a análisis.

El floculante evaluado se prepara al 0,5% mediante pesada directa de aproximadamente 0,5 g en 100 ml de agua. El floculante se añade mediante una jeringa, sobre el vórtice de agitación. La adición se realiza relativamente lenta, para evitar la formación de grumos que tardan en disolverse. Las condiciones de mezcla son: agitación de 200 rpm durante 3 min, para posteriormente mantener agitación de 40 rpm durante 10 minutos y otros 45 minutos de maduración. Finalizada la preparación, se comprueba la no existencia de grumos, flotados o precipitados. Las disoluciones se preparan frescas cada 1 a 2 días.

Los ensayos en el equipo *Jar Test* se realizan usando un volumen de muestra de 1000 ml. Los ensayos de selección del programa químico se efectúan con los fluidos a temperatura ambiente.

El ensayo con manejo del floculante, consiste en la adición de un volumen de mezcla diluida del floculante puro, que permite alcanzar la concentración deseada del producto puro en mg/l, a partir del reactivo diluido. Se añade en condiciones de agitación y sobre la mezcla de reacción previamente coagulada. Se utiliza una velocidad de 40 rpm aplicada durante 10 min. Posteriormente se deja decantar 10 min, para tomar la muestra de agua tratada del seno de la disolución y realizar las determinaciones analíticas correspondientes.

En las etapas de tratamiento en las que hubo que ajustar el pH, se usan 2 mol/l de disoluciones de hidróxido de sodio (NaOH) y ácido sulfúrico (H₂SO₄) concentrado al 98%.

Al inicio de los trabajos, la muestra es homogeneizada aplicando una agitación a velocidad de 150 rpm durante 5 minutos.

Las pruebas P01 al P09 se realizan para determinar los parámetros operacionales del sistema químico, según se describen en el Protocolo P-2014-078 REV: 03.

P-01: Determinación de la dosis óptima de coagulante para Oíl Break

Se le añade al agua residual objeto de estudio una dosis pequeña de H₂SO₄ concentrado, garantizándole a la muestra un valor de pH-4, se monta 1litro de la misma en cada jarra del equipo (*Jar test*) y se le añade el coagulante objeto de estudio en un rango de dosis de 100 a 300 mg/l. Las corridas se realizan primero con agitación rápida, después disminuye la agitación con el tiempo. Se toman las muestras de cada una de las jarras, se montan en el equipo *DAF* por 2 min, se analizan sus DQO y se grafican los resultados.

P-02: Determinación de la dosis óptima de coagulante para Deflocar

Las corridas se realizaron sobre las aguas tratadas con Oíl Break se le añade a esta agua NaOH concentrado para garantizarle a la muestra un pH igual a 7,0, de igual manera se monta 1l de muestra en cada una de las jarras del equipo añadiéndole el coagulante en un rango de dosis de 100 a 300 mg/l primero con agitación rápida, luego disminuyendo la agitación con el tiempo. Se toma las muestras de cada una de las jarras, se montan en el equipo *DAF* por 2 min y se analizan sus DQO.

P-03: Determinación de la dosis óptima de Floculante Polielectrolita Aniónica

Las corridas se realizaron sobre las aguas tratadas con Oíl Break y Deflocar a pH-7, empleando el floculante objeto de estudio en un rango de dosis de 0,5 a 2,5 mg/l primero con agitación rápida, luego disminuyendo la agitación con el tiempo. Se toman las muestras de cada una de las jarras, se montan en el equipo *DAF* por 2 min y se analizan sus DQO.

P-04: Determinación de la actividad (coagulante/floculante)

Para determinar la actividad floculante/coagulante se selecciona el par Deflocar/Polielectrolita Aniónica. Se toma la muestra de mayor DQO de las aguas tratadas con *Oil break*, se procede de la misma manera que en los casos anteriores, primero en el equipo *Jar test* por 10 min y después en el *DAF* por 2 min aplicando decantación para la separación de los flóculos formados. Se evalúa a pH 7. Se realizan tres corridas, dos con el Deflocar (Policloruro de Aluminio) entregado por la PTR (PAC 7.0) y la tercera con el mismo producto (Policloruro de Aluminio) pero aportado por el laboratorio contratado (PAC 300). Se observa el comportamiento de los sólidos suspendidos y el DQO y se grafican los resultados.

P-05: Estudio de la flotación por aire disuelto-determinación de la presión de operación y la relación A/X óptima

Para la determinación de la presión de operación y la relación A/X óptima se toman las muestras estudiadas a temperatura ambiente del agua residual, se llevan al equipo de flotación (*DAF*) empleando una tasa de recirculación de un 33%, se toman los valores de presión, el tiempo de flotación y la altura de capa flotada. Se analizan y se grafican los resultados de DQO y sólidos suspendidos.

.P-06: Estudio de la energía de mezcla en coagulación

Este estudio se realiza con el equipo de flotación (*DAF*) se toman las muestras antes analizadas y se gradúa el equipo a velocidad rápida en un rango de revoluciones de 100 a 400 rpm, luego la muestra se pone a decantar, se determina la concentración del coágulo formado (sólidos suspendidos) y se toma el tiempo, luego se grafican los resultados.

P-07: Estudio de la energía de mezcla en floculación

Para determinar la energía de mezcla en floculación se toman las muestras antes analizadas en el equipo de flotación y se gradúa el equipo a velocidad lenta en un rango de revoluciones de 30 a 80 rpm, luego la muestra se pone a decantar, se determina la concentración del flóculo formado (sólidos suspendidos) y se toma el tiempo, luego se grafican los resultados.

P-08: Determinación del tiempo de reacción óptimo

Se realizan varias corridas con las condiciones elegidas y se toman los valores de DQO en el tiempo y se observa el comportamiento de la cinética. Luego se gráfica y se analizan los resultados.

P-09: Determinación de la velocidad ascensional promedio de los sólidos

Se mide la capa flotada en altura con respecto al tiempo (cada 15 min). Se realizan tres corridas para determinar velocidad promedio de ascenso, se calcula la velocidad ascensional en m/s.

2.3.3 Resultado del tratamiento con los valores operacionales obtenidos en las pruebas

Una vez determinados los resultados de las pruebas se realiza el tratamiento por flotación con los valores operacionales seleccionados y se valoran los resultados obtenidos.

2.4 Diseño del Sistema de Bombeo

Para llevar el agua de la cisterna de vertimiento al Desengrasador Lamerl, y volverla a incorporar al proceso donde se vuelve a tratar, se diseña un isométrico (anexo 5) que aprovecha la bomba del lavado del nastroprensa situada a 3 m de la misma (anexo 6), esta posee características similares a las bombas de envío que son las que hacen llegar el agua oleosa del tanque 14 a la PTR. (Para la confección de este trazado se utiliza el programa *Auto Cad.*)

Para comenzar se toman los datos de la bomba, las medidas de la cisterna y del Desengrasador Lamerl y se calcula su capacidad (V):

$$V = A \times L \times H \quad (2.1)$$

Donde:

V: Volúmenes de la cisterna y del Desengrasador Lamerl (m³)

A: Ancho (m)

L: Largo (m)

H: Altura (m)

2.4.1 Mediciones del sistema de tuberías

Se divide el sistema de tuberías en dos tramos, uno de succión y otro de descarga con cada uno de los accesorios que tienen los mismos, así como los diferentes valores de K (coeficientes de resistencia hidráulica) según Crane, (2006).

2.4.2 Procedimiento para el cálculo de la carga a entregar por la bomba al sistema

Para el cálculo de la carga de la bomba se utiliza y despeja la ecuación de balance de energía mecánica de Bernoulli (ec 2.2), según la metodología que se presenta a continuación (Rosabal, 2006).

$$\frac{P_1}{\rho_1 * g} + Z_1 + \frac{\alpha_1 * (v_1)^2}{2 * g} + Hb_s = \frac{P_2}{\rho_2 * g} + Z_2 + \frac{\alpha_2 * (v_2)^2}{2 * g} + \Sigma Hf$$

Donde:

(2.2)

P1: presión en el punto de referencia # 1, Pa

P2: presión en el punto de referencia # 2, Pa

ρ_1 : densidad del fluido en el punto de referencia # 1, kg/m³

ρ_2 : densidad del fluido en el punto de referencia # 2, kg/m³

Z1: altura en el punto de referencia #1, m

Z2: altura en el punto de referencia #2, m

α : factor de corrección de energía cinética ($\alpha = 1$ para régimen de flujo turbulento, $\alpha = 0,5$ para régimen de flujo laminar)

v_1 : velocidad del fluido en el punto # 1, m/s

v_2 : velocidad de fluido en el punto # 2, m/s

g: valor de la aceleración de la gravedad, m/s²

H_{bs}: carga del sistema, m

ΣHf : pérdidas por fricción totales, m

A partir de aplicar el balance de energía mecánica (ec 2.2) al sistema de flujo se obtiene la carga de la bomba necesaria para el sistema (H_{bs})

1- Cálculo de las pérdidas por fricción totales (ΣH_f)

Para el cálculo de las pérdidas por fricción totales se considera las pérdidas en tuberías y accesorios. Se tiene en cuenta los tramos de tuberías antes (AB) y después (DB) de la bomba. En el diseño se considera el mismo diámetro de tubería en todo el sistema.

Las pérdidas por fricción totales se determinan por la siguiente expresión:

$$\Sigma H_f = (Hf_t + Hf_{acc})_{AB} + (Hf_t + Hf_{acc})_{DB} \quad (2.3)$$

Donde:

ΣH_f : Pérdidas por fricción totales de la instalación, m

Hf_t : Pérdidas por fricción en las tuberías, m

Hf_{acc} : Pérdidas por fricción en accesorios, m

AB: tramo antes de la bomba (1-3)

DB: tramo después de la bomba (4-2)

Cálculo de las pérdidas por fricción en tuberías (Hf_t)

$$Hf_t = \frac{f * v^2 * L}{d * 2g} \quad (2.4)$$

Donde:

Hf_t : pérdidas por fricción total en tuberías, m

f: factor de fricción

v: velocidad del fluido en la tubería, m/s

L: longitud de la tubería, m

d: diámetro de la tubería, m

g: valor de la aceleración de la gravedad, m/s²

Cálculo del área de la tubería (A_t , m²):

$$A_t = \frac{\pi * d^2}{4} \quad (2.5)$$

Cálculo de la velocidad del fluido en la tubería (v, m/s)

$$v = \frac{q_s}{A_t} \quad (2.6)$$

Donde q_s es el flujo volumétrico (m^3/h).

Cálculo del número adimensional de Reynolds (Re)

$$Re = \frac{\rho * d * v}{\mu} \quad (2.7)$$

Donde:

ρ : densidad del fluido en tuberías a la temperatura del fluido, kg/m^3

μ : viscosidad del fluido en tuberías a la temperatura del fluido, Pa. s

Re - régimen de flujo turbulento ($Re > 4000$), régimen de flujo laminar ($Re < 2100$)

Cálculo de las pérdidas por fricción en accesorios ($H_{f_{acc}}$, m)

$$H_{f_{acc}} = \sum k * \left(\frac{v^2}{2 * g} \right) \quad (2.8)$$

Donde:

k: coeficientes de resistencias locales de cada accesorio (Rosabal, 2006)

2- Cálculo del NPSH del sistema

Para comprobar uno de los criterios de selección de la bomba se calcula el $NPSH_s$ por la siguiente ecuación:

$$NPSH_s = \frac{P_5 - P_v}{\rho * g} \quad (2.9)$$

Donde:

$NPSH_s$: carga neta de succión positiva del sistema.

P_5 : presión de succión de la bomba (punto 5), Pa

P_v : presión de vapor de agua a la temperatura del fluido (tabla 16 del Rosabal, 2006, p290), Pa

Para calcular P_5 se realiza un balance de energía mecánica antes de la bomba (1-5) según la metodología anteriormente descrita.

3- Evaluación del sistema de Bombeo

Para evaluar el adecuado funcionamiento de la bomba se tienen en cuenta los cuatro criterios imprescindibles para validar el funcionamiento de los sistemas de flujo:

$$H_b > H_{bs}$$

$$q_b > q_s$$

$$NPSH_s > 0$$

$$NPSH_b \leq NPSH_s$$

Donde:

H_b : Carga de diseño de la bomba para el flujo de operación. Se determina a partir del gráfico de curvas características específico de la bomba (Catálogo)

q_b : Flujo máximo de diseño de la bomba. Se determina a partir de los datos brindados por el fabricante (Catálogo)

$NPSH_b$: Carga neta de succión positiva de la bomba: Se determina a partir del gráfico de curvas características específico de la bomba (Catálogo)

2.4.3 Cálculo de la carga de bombeo por software

Para realizar los cálculos de los parámetros del sistema se escogieron los *software* PSIM 2007 (*Pump System Improvement Modeling Tool.*) y *Tksolver*

El PSIM (2007) es una herramienta diseñada para simular sistemas de bombeo de cualquier índole con el objetivo de calcular todos los parámetros de bombas, tuberías y reservorios que tenga la instalación. Como ventajas tiene que permite realizar cambios en un sistema para mejorarlo y valorar la influencia que tengan cada uno de ellos en la eficiencia general de la instalación.

El *Tksolver* se utiliza para realizar los distintos cálculos de un sistema de bombeo.

2.4.4 Comparación de los resultados obtenidos por los software

Para determinar si los cálculos son satisfactorios se haya el error relativo (ε) de determinación de la carga entre método del software *Tksolver* (Crane, 2006) y el modelado con software PSIM. Según la siguiente expresión.

$$\varepsilon = \frac{(H_{p \text{ Tksolver}} - H_{p \text{ PSIM}})}{H_{p \text{ Tksolver}}} * 100\% \quad (2.10)$$

Donde:

$H_{p \text{ Tksolver}}$: Carga de la bomba calculada por el método del *Tksolver* (m).

$H_{p \text{ PSIM}}$: Carga de la bomba calculada por el método del PSIM (m).

Si el resultado llega a ser mayor que 5% el cálculo se considera no satisfactorio para los casos prácticos de trayectoria de tuberías con bombas, si por el contrario llega a ser menor que 5% se considera correcto.

2.5 Factibilidad económica de la propuesta

La factibilidad económica de la opción de P+L se determina a partir del Método Costo – Beneficio, teniendo en cuenta los costos de operación en el tratamiento de aguas oleosas tratada por la PTR fuera de especificación por la NC-521 (actual y después de la propuesta) además se valora el ingreso monetario por concepto de recibo de aguas oleosas por buques a la DTCCM si se implementa esta alternativa.

2.5.1 Costos asociados al tratamiento del agua residual oleosa fuera de especificación

Beneficios: Ahorro de productos químicos y electricidad por concepto de implementar la propuesta.

- Costos por ahorro de productos químicos (CT_a)

$$CT_a = CT_{(A)} - CT_{(P)} \quad (2.11)$$

Dónde:

CT_a – Costo por ahorro de productos químicos (\$)

$CT_{(A)}$ – Costo de tratamiento actual (\$)

$CT_{(P)}$ – Costo de tratamiento con la propuesta (\$)

Los costos de tratamiento (CT) se calculan:

$$CT = \sum (C_{PQ} * P_{PQ}) \quad (2.12)$$

Donde:

C_{PQ} – Consumo de cada producto químico antes y después de la propuesta (m^3)

P_{PQ} – Precio de cada producto químico ($\$/m^3$)

Se considera el flujo de agua tratada para los cálculos de ahorro de productos químicos

- Consumo por ahorro de electricidad (CE_a)

$$CE_a = CE_{(A)} - CE_{(P)} \quad (2.13)$$

CE_a – Costo por ahorro de electricidad (\$)

$CE_{(A)}$ – Costo de electricidad de los equipos que intervienen en el tratamiento actual (\$)

$CE_{(P)}$ – Costo por ahorro de electricidad de los equipos que intervienen en la propuesta (\$)

Los costos de electricidad de los equipos (CE) se calculan:

$$CE = \sum (C_E * P_E) \quad (2.14)$$

Dónde:

P_E – precio de la electricidad ($\$/kW$)

C_E – Consumo de electricidad de los equipos que intervienen (kW/h)

El precio de la electricidad se refiere en la factura del mes de septiembre 2012 emitida por el departamento de economía de la división.

Para calcular los beneficios anuales se tiene en cuenta que la planta trabaja 5 horas durante aproximadamente 200 días al año.

Costos: Se considera la amortización de la inversión por concepto de instalar el sistema de flujo propuesto.

En la Inversión no se toman en cuenta los costos de la bomba utilizada y por mano de obra, porque se escoge para la recirculación propuesta la bomba del lavado del Nastroprensa y el trabajo es realizado por una brigada de mantenimiento de la propia División.

- Inversión (sistema de recirculación)

$$ISR = C_{tub} + C_{acc} \quad (2.15)$$

C_{SR} – Costo del sistema de recirculación (\$)

C_{tub} – Costo de tuberías (\$)

Los accesorios a instalar son: válvula de cheque, válvula de bola y codo 90°

$$C_{acc} = C_{V_{ch}} + C_{V_b} + C_{codo} \quad (2.16)$$

Donde:

$C_{V_{ch}}$ – Costo de la válvula de cheque (\$)

C_{V_b} – Costo de la válvula de bola (\$)

C_{codo} – Costo de los codos (\$)

- Amortización

$$A = \frac{ISR}{t} \quad (2.17)$$

Donde:

A – Amortización (\$/a)

t – tiempo de vida útil (años)

2.5.2 Relación beneficio – costo

La relación beneficio-costos (B/C), se determina al evaluar el valor actual de los ingresos o beneficios netos (VAI) y el valor actual de los costos de inversión (VAC) a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{B}{C} = \frac{VAI}{VAC} = \frac{CTa + CEa}{A} \quad (2.18)$$

Donde:

C_{Pa} – Costo de productos químicos actual (\$)

C_{Ea} – Costo de electricidad actual (\$)

CI– Costo por inversión (\$)

Si la relación B/C es mayor que 1, el proyecto evaluado es económicamente ventajoso.

2.5.3 Valoración ambiental de la propuesta

En la valoración ambiental se tuvieron en cuenta los beneficios e impactos ambientales positivos de la propuesta.

2.6 Implementación

La implementación de la propuesta de P+L se desarrollará en etapas posteriores de esta investigación.

CAPÍTULO III: Análisis de los resultados

En este capítulo se evalúa la caracterización del agua tratada según especificación de la NC 521:2012. Se evalúan las dos alternativas de P+L propuesta (biofiltración y tratamiento físico químico), y se diseña la nueva propuesta técnica de solución al problema detectado.

3.1 Caracterización físico-química de las aguas residuales tratadas por la PTR.

En el anexo 7 se presenta la caracterización de las aguas tratadas en la PTR durante los últimos 4 años (2015-2018).

Al comparar los valores medios de cada parámetro con la NC 521:2012 para el vertimiento a cuerpos de aguas receptores clase D (anexo 1) demuestran que la DQO, Grasas y Aceites, e hidrocarburos Totales, no cumplen con los requerimientos de vertimiento, ya que sus valores son superiores a los LMP establecidos por dicha Norma. Este análisis justifica el estudio de las propuestas de producción más limpia.

3.1.1 Análisis estadístico de la caracterización fisicoquímica

La tabla 3.1 describe el comportamiento estadístico de los resultados de dicha caracterización.

El coeficiente de variación (CV) relaciona la varianza de cada una de las variables con su media y facilita valorar cuán estables resultan. El análisis de los coeficientes de variación de cada variable permite concluir que Los sólidos sedimentarios, sólidos suspendidos, las grasas y aceites, los sulfuros, el DQO, pH, nitrógeno total, fósforo total se comportan establemente. La variable Fenoles y conductividad presentan gran dispersión con respecto a la media. El comportamiento inestable de estas se debe a que las aguas oleosas no tienen el mismo origen, las misma provienen indistintamente de productos refinados, o directamente de pozos. Además, la dosificación de químicos es la misma y se realiza para todas las aguas en el tanque 14. No se miden todas las variables con sistematicidad; solo se cuantifica en el proceso el caudal, pH y la presión

Tabla 3.1 Análisis de varianza

Data variable:	S Sed	SSusp	fenoles	G y A	sulfuros	DQO	Cond	DBO	pH	HC	Nt	Pt
Count	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	18	18
Average	0,225556	100,197	0,112778	29,4737	90,3333	627,278	42,5722	49,6444	7,28722	25,8944	11.069	7.9166
Variance	0,000469	120,472	0,002564	9,6227	34,2222	4955,42	38,4895	29,7258	0,1485	9,1338	6.13	1.9441
Standard Deviat	0,021659	10,976	0,050641	3,10205	5,84998	70,3948	6,2039	5,45214	0,5854	3,0222	2,4772	1.3943
Minimum	0,2	78,8	0,03	25,0	80,0	580,0	28,3	42,5	6,45	22,1	8.36	5.63
Maximum	0,26	120,0	0,2	36,2	106,0	830,0	55,4	60,4	8,2	32,2	15.3	10.26
Range	0,06	42,0	0,17	11,2	26,0	250,0	27,1	17,9	1,75	10,1	6.94	4.63
Std. Skewness	0,567322	-0.04673	0,54425	1,39924	0,931262	4,4685	-0,1901	0,78670	0,0398	1,77067	0,6749	4.63
Std. Kurtosis	-1,00836	-0,43939	-0,79225	-0,18808	1,92266	4,90437	0,58692	-0,6679	1,31352	0,20076	1,2815	6.6127
Coeffofb variation	9,602275 %	10,9577 %	44,9033 %	10,5248 %	6,47599 %	11,2223 %	14,5923 %	10,9824 %	5,2896 %	11,6712 %	10,379 %	10.543 %

Fuente: Elaboración propia

A partir de estos resultados se puede concluir que la PTR instalada bajo las condiciones técnicas/operacionales actuales no satisface todos los parámetros normativos verter al cuerpo de agua receptor el agua tratada con la calidad requerida, lo cual constituye el principal problema ambiental.

3.2. Análisis de alternativas de producción más limpia (P+L)

Caracterización inicial del Residual Líquido

Luego de identificar el problema ambiental se realiza un estudio para la propuesta y selección de las alternativas de P+L. Para el estudio se caracteriza el agua antes y después del tratamiento propuesto (tabla 3.2)

Tabla 3.2 Caracterización del agua tratada por la PTR.

Parámetros	Antes del tratamiento (Entrada a la PTR) CEINPET ¹	Después del tratamiento (Cisterna de vertimiento) CEINPET ¹	LMP ²
pH (25°C)	7.75	7.45	5-10
DQO (mg/l)	1368	632,3	300
DBO5 (mg/l)	131	43.1	150
S Suspendidos (mg/l)	104	78	150
S Sed (mg/l)	0.6	0,2	15
Fenol (mg/l)	0.12	0,4	ND
Grasas y Aceites (mg/l)	102.6	62,2	50
HC (mg/l)	95.3	26,7	20
Nitrógeno (mg/l)	18.8	10.2	40
P(fósforo total) (mg/l)	20.6	5,11	10

Fuente: 1- Díaz, 20192 -NC 521:2007 (Clase D) ND- No determinada

Como se observa los valores de DQO, Hidrocarburos totales, grasas y aceites, del efluente analizado se encuentran fuera de los límites máximos permisibles promedio para el vertimiento en el cuerpo receptor correspondiente y establecido en la NC 521:2007. Esto corrobora el comportamiento de la caracterización del agua residual en los últimos 4 años (tabla 3.1), lo que permite definir que la misma no se encuentra

apta para su vertimiento, por lo que se proponen como alternativas de P+L el uso de la biofiltración y el tratamiento físico-químico del agua tratada.

3.2.1 Alternativa 1: Biofiltración

En la tabla 3.3 se muestran los valores promedios obtenidos en las dos corridas experimentales de la etapa de biofiltración para los 4 materiales de empaque utilizados. Estos resultados evidencian una disminución en casi todos los parámetros evaluados respecto al de la muestra inicial. El fósforo y los sólidos suspendidos tuvieron un aumento para el bagazo de caña (Exp 1) por lo que se puede apreciar que aporta esos elementos a la muestra examinada, lo mismo sucede para la paja de arroz (exp 2), pero en este caso lo que aporta es nitrógeno. Para el caso de la DQO se obtuvo una disminución significativa del mismo, removiendo alrededor de la mitad de su contenido, no obstante, todavía no alcanza el valor permisible para su vertimiento.

Tabla 3.3 Análisis del agua residual pos tratamiento con Biofiltración

Experim.	N (mg/l)	P (mg/l)	DQO (mg/l)	S.Susp (mg/l)	Fenol (mg/l)	G y A (mg/l)	pH (25°) (25°C)	S Sed. (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)
1	9,45	6,62	318	89,5	0,06	0,25	7,6	0	18,2
2	12,25	1,85	412,2	74,5	0,16	1,2	6,8	0	24,5
3	7,255	3,58	356	42,5	<0,02	2,25	7,0	0	32,2
4	8,015	0,48	333,2	66,5	0,08	6,8	7,2	0	18,4
Antes de la Biof	10,2	5,11	632,3	78	0,4	62,2	7,4	0,2	43,1
LMPP(1)	40	10	300	150		50	5,5 - 10,0	15	150

Fuente: 1- NC 521:2007

Los sólidos suspendidos también fueron reducidos, aunque antes del tratamiento se encontraban dentro de los parámetros establecidos en la normativa.

En el caso de los hidrocarburos no se determinó la concentración ya que se observó la desaparición de la gama de colores en la superficie del agua cuya intensidad es una función del espesor de la película de aceite. En este caso no presentaba altas concentraciones de hidrocarburos y aceites que se retienen en el material de

empaque, el cual funciona como pretratamiento convencional para el desengrase de estas aguas residuales.

El seguimiento de fenoles se realiza a pesar de que no se contemplan en las normas de vertimiento que corresponden al cuerpo receptor en este caso, esto muestra que el tratamiento propuesto también contribuye a la reducción de otros contaminantes como el que se menciona.

Como medida para el seguimiento del proceso se realizó la caracterización microbiológica de los empaques de las columnas, se obtuvo como resultado que el crecimiento de los microorganismos totales no sufre variaciones apreciables en el tiempo, manteniendo valores entre 10^7 y 10^9 unidades formadoras de colonias por mililitro (UFC/ml). Lo que sugiere que la microbiota presente en estos materiales pueden sobrevivir a estas condiciones y biodegradarla materia orgánica presente en el agua. (Análisis aportado por el CEINPET)

Se puede concluir que, si bien la biofiltración permite reducir la concentración de casi todos los parámetros físico-químicos del agua, no se alcanza con este proceso los valores óptimos requeridos de DQO para ser vertida según normativa, de ahí que se desestime esta propuesta como opción de P+L.

3.2.2 Alternativa 2: Tratamiento Físico-Químico

Se determinan los parámetros óptimos para alcanzar la calidad de agua requerida en la PTR.

Se considera dosis óptima a los valores idóneos o favorables del comportamiento de cada variable en el rango experimental

3.2.2.1 P-01: Determinación de la dosis óptima de coagulante para Oíl Break

En la figura 3.1 se aprecia que la mejor dosis de coagulante es de 150 mg/l, si se tiene en cuenta que con esta se obtuvo la mayor remoción de DQO que alcanzó un valor de 75%. Aplicando flotación por aire disuelto (*DAF*) para la separación del floculo se alcanzó un 86% de remoción de DQO. A partir de este efluente se realizaron las siguientes pruebas, teniendo en cuenta la operación de la PTR, la cual utiliza dos sistemas *DAF* en serie, el primero con Oíl Break.

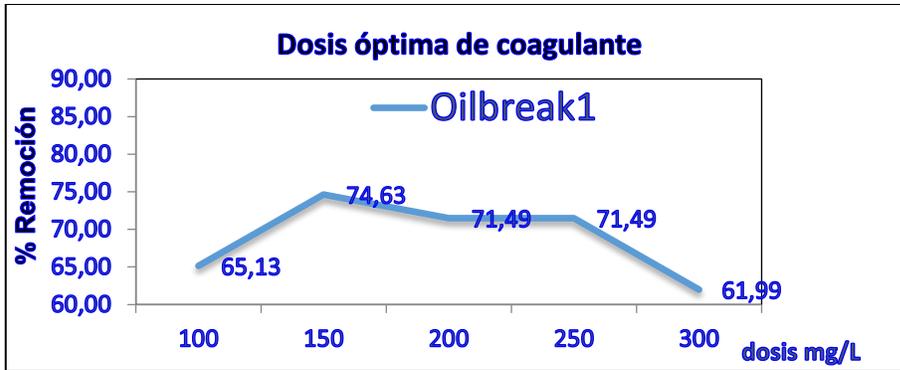


Figura 3.1 Dosis óptima de coagulante para Oíl Break.

Fuente: Díaz, 2019

3.2.2.2 P-02: Determinación de la dosis óptima de coagulante para Deflocar

En la figura 3.2 se aprecia que la dosis óptima de coagulante alcanza entre 200 y 250 mg/l, si se tiene en cuenta que en este rango se obtuvo la mayor remoción de DQO que alcanzó un valor de 86%.

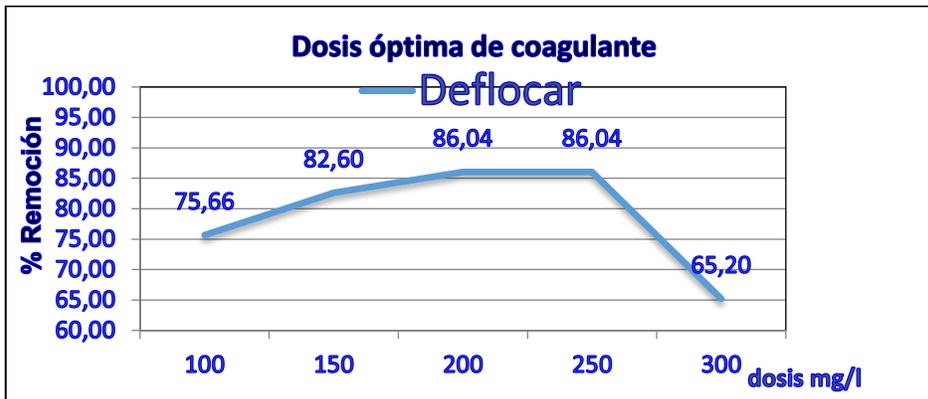


Figura 3.2 Dosis óptima de coagulante para Deflocar.

Fuente: Díaz, 2019

3.2.2.3 P-03: Determinación de la dosis óptima del floculante Polielectrolita Aniónica

En la figura 3.3 se muestran las concentraciones de funcionamiento del coagulante evaluado a pH óptimo en un rango de dosis de 0,5 a 2,5 mg/l de floculante. Se aprecia que se obtuvo una remoción mayor del 80% de DQO con dosis de 2,5 mg/l para el Polielectrolita aniónica.

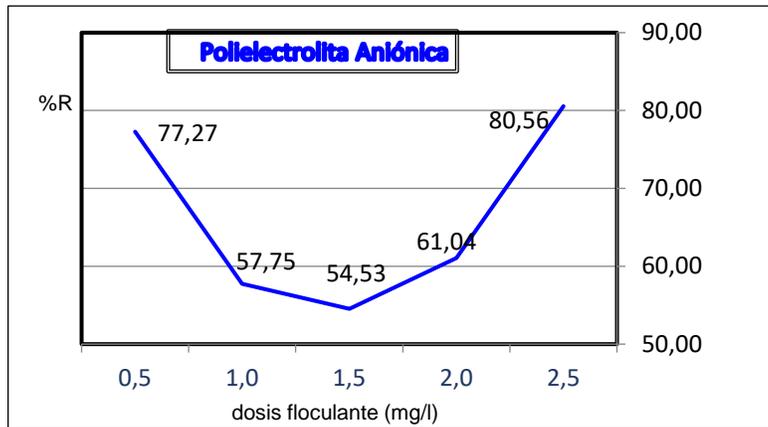


Figura 3.3 Dosis óptima de floculante para Poliectrolita Aniónica.

Fuente: Díaz, 2019

3.2.2.4 P-04: Determinación de la actividad (par coagulante/floculante)

En la figura 3.4 se comparan los resultados obtenidos con el Deflocar entregado por la planta (PAC 7) y el PAC 300 aportado por el laboratorio contratado. Al analizar los resultados de ambos reactivos se aprecia que entre las corridas realizadas por el Deflocar (PAC 7) aumenta la remoción de sólidos suspendidos en la corrida 2, y valores similares de remoción de DQO para ambos coagulantes. Sin embargo, al utilizar el coagulante PAC 300 la remoción de DQO y de sólidos suspendidos aumenta significativamente. De ahí que se pueda concluir que el coagulante aportado por el laboratorio contratado (PAC 300) es mucho más efectivo para propuesta que los que se utilizan actualmente en la DTCCM.

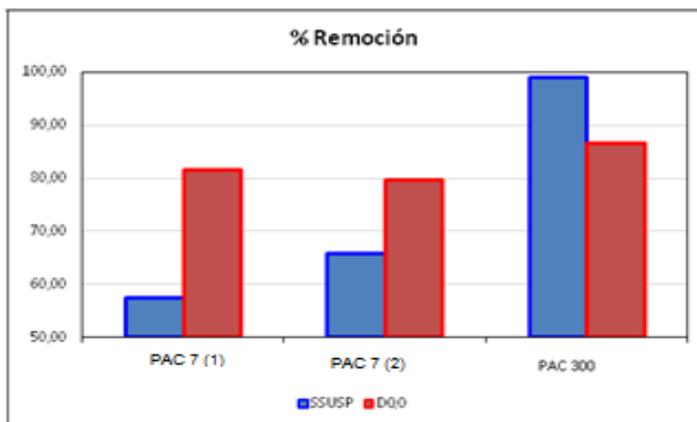


Figura 3.4 Remoción de contaminantes para el sistema (par coagulante/floculante).

Fuente: Díaz, 2019

3.2.2.5 P-05: Estudio de la flotación por aire disuelto- determinación de la presión de operación y la relación A/X (aire/DQO) (aire/S Susp)

Como se aprecia en la figura 3.5 la menor presión de operación para obtener un DQO por debajo de la normativa se alcanza entre 250 y 300 kPa, aunque con todas las presiones ensayadas se obtiene un resultado promedio del 84% de remoción de DQO, el cual se considera satisfactorio y una altura de capa flotada de 10 mm.

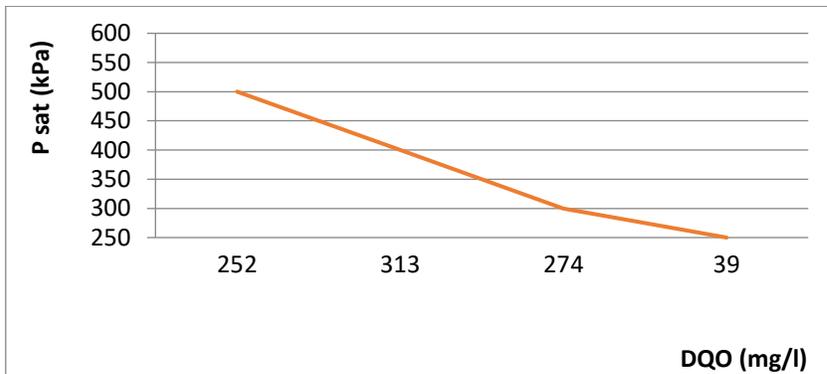


Figura 3.5 Presión de operación óptima para DQO.

Fuente: Díaz, 2019

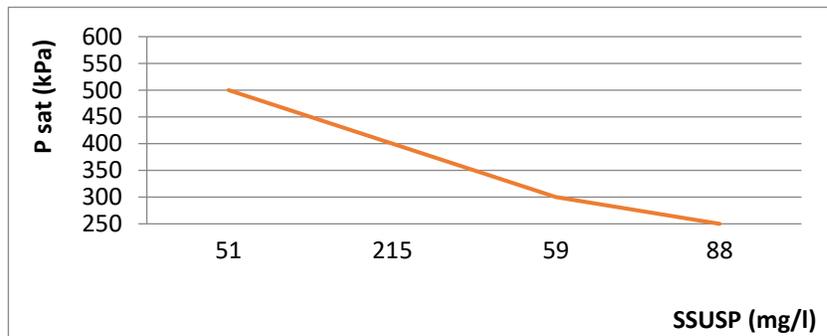


Figura 3.6 Presión de operación óptima para SSUSP.

Fuente: Díaz, 2019

Se observa en la figura 3.6 que la menor presión de operación para alcanzar valores aceptables de sólidos suspendidos se obtiene entre 250 y 300 kPa. Aunque con todas las presiones ensayadas se obtiene un resultado promedio del 84% de remoción de sólidos suspendidos, el cual se considera satisfactorio.

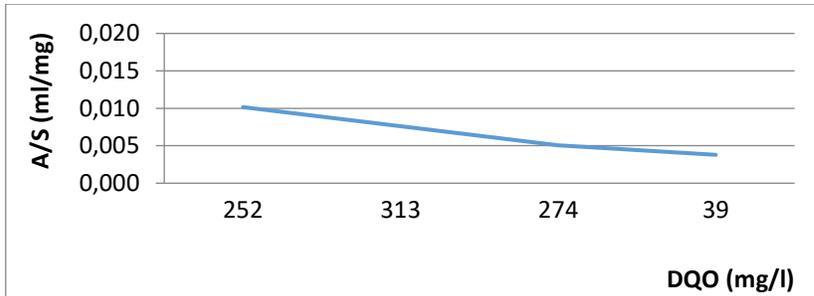


Figura 3.7 Relación A/X óptima para DQO.

Fuente: Díaz, 2019

La figura 3.7 muestra que la relación A/X óptima se obtiene entre 0,004 y 0,005 ml de aire/mg de DQO, con la cual se obtuvo resultados satisfactorios de remoción.

En la figura 3.8 se aprecian las curvas de regresión ajustadas para la presión de operación y la relación A/X, obteniendo coeficientes de correlación satisfactorios con un 95% de confiabilidad para ambos parámetros.

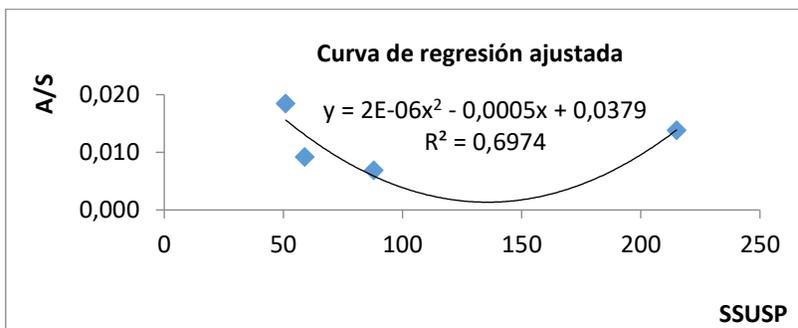


Figura 3.8 Relación A/X óptima para SSUSP.

Fuente: Díaz, 2019

La relación A/X óptima (figura 3.8) fue de 0,007 a 0,009 ml de aire/mg de SSUSP, con la cual se obtuvo resultados satisfactorios de remoción.

3.2.2.6 P-06: Estudio de la energía de mezcla en coagulación

El gráfico siguiente muestra la curva de SSUSP vs tiempo a la temperatura media del agua residual para determinar la energía de mezcla en la coagulación. El tiempo óptimo de decantación fue de 6 min. Para las corridas a la temperatura media, el tiempo mínimo de coagulación fue de 3 min para velocidad de agitación de 200 rpm.

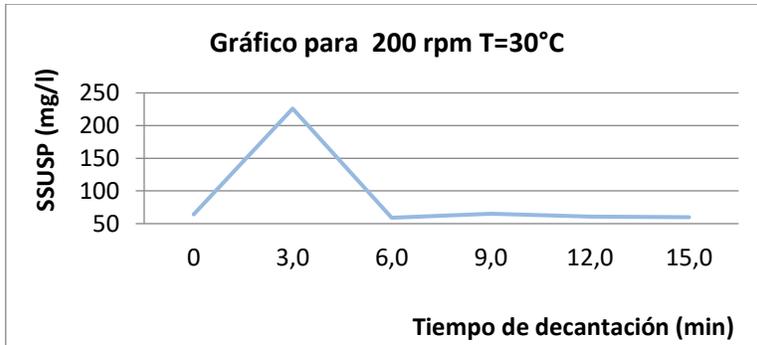


Figura 3.9 Energía de mezcla en la coagulación.

Fuente: Díaz, 2019

3.2.2.7 P-07: Estudio de la energía de mezcla en floculación

La figura 3.10 muestra la curva de SSUSP vs tiempo a la temperatura media del agua residual para determinar la energía de mezcla en la floculación. El tiempo óptimo de decantación fue de 15 min. La longitud de los flóculos fue de 8 a 10 mm. Para las corridas a la temperatura media, el tiempo mínimo de decantación para la floculación fue de 3 min para velocidad de agitación de 40 rpm.

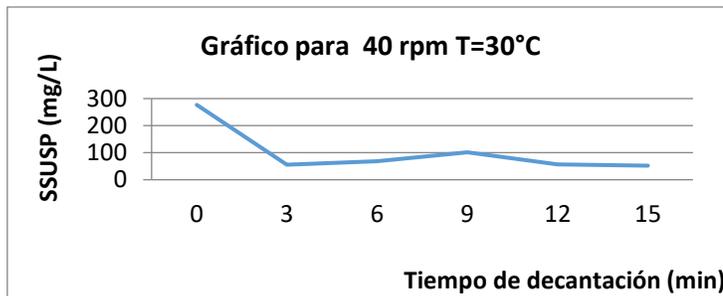


Figura 3.10 Energía de mezcla en la floculación.

Fuente: Díaz, 2019

3.2.2.8 P-08: Determinación del tiempo de reacción óptimo

Para el proceso se obtuvo un tiempo de reacción óptimo de 60 min y la cinética de la reacción sigue el comportamiento de un polinomio de orden 3, según se observa en la figura 3.11

La remoción de DQO alcanzada estuvo entre 60 y 80%. De la representación gráfica de los resultados, se deduce que 60 min es el tiempo mínimo requerido para alcanzar las condiciones demandadas en el vertido (<300 mg/l de DQO).

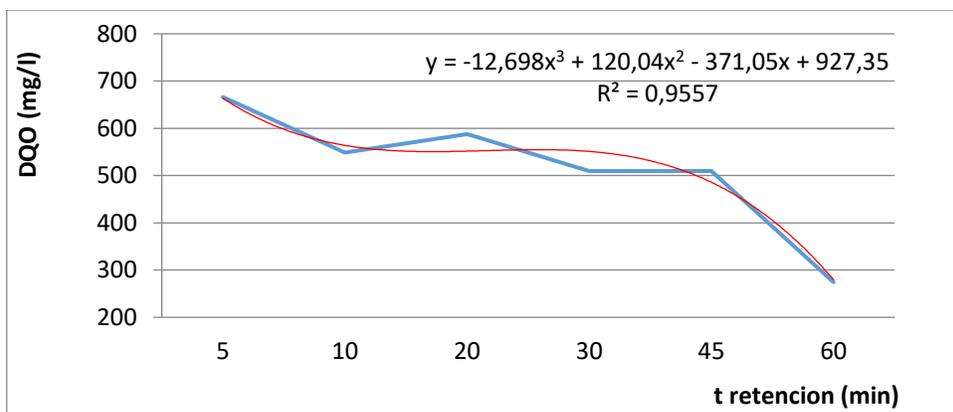


Figura 3.11 Tiempo de reacción óptimo.

Fuente: Díaz, 2019

3.2.2.9 P-09: Determinación de la velocidad de ascenso promedio de los sólidos

Se realizaron tres corridas en equipo *DAF* operando a las condiciones elegidas de presión, *A/X*, % de recirculación y tiempo de reacción, para determinar la velocidad de ascenso de los sólidos. Los gráficos siguientes (figura 3.12 y 3.13) muestran las curvas de longitud ascendente y de la velocidad de ascenso en la floculación vs tiempo a la temperatura media del agua residual.

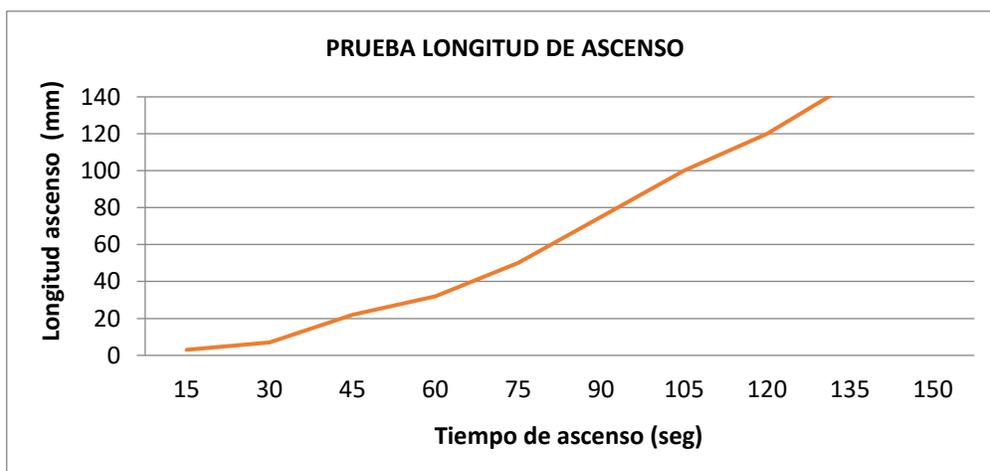


Figura 3.12 Curva de longitud de ascenso.

Fuente: Díaz, 2019

La velocidad ascensional promedio obtenida de las tres corridas efectuadas fue de 0,67 mm/s. Los valores obtenidos en las tres corridas no difieren en más de un 10% del valor medio encontrado.

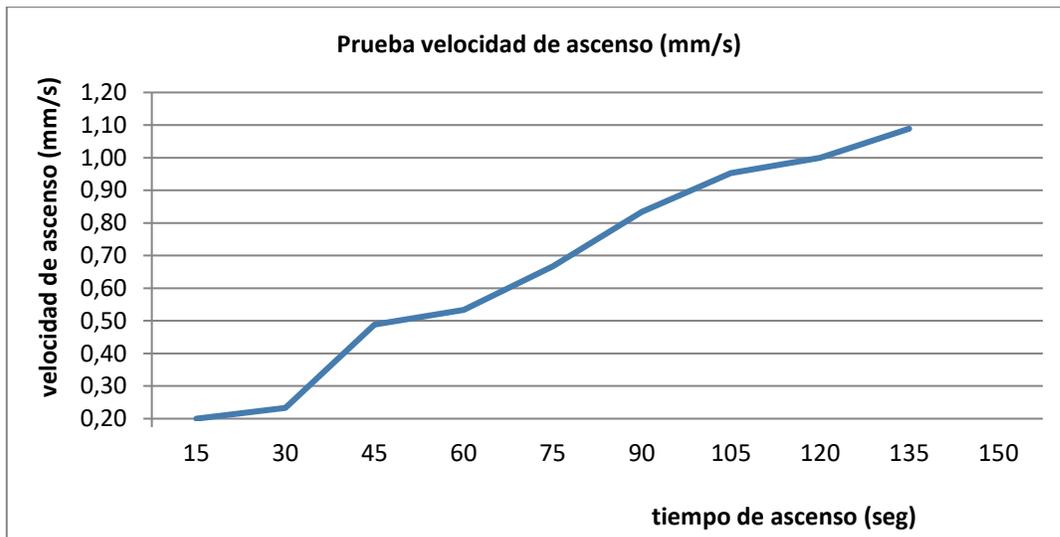


Figura 3.13 Curva de velocidad de ascenso.

Fuente: Díaz, 2019

3.2.2.10 Parámetros óptimos. Resumen

A partir de este estudio se obtuvo que los parámetros óptimos para el tratamiento físico-químico fueran:

- Dosis óptima del coagulante Oíl Break 150 mg/l a pH 4
- Dosis óptima del coagulante Deflocar 200 a 250 mg/l a pH 7
- Dosis óptima del Floculante Polielectrolita Aniónica 2,5 mg/l a pH 7
- Presión de operación óptima para remoción de DQO 250 a 300 kPa
- Presión de operación óptima para remoción de S Susp 250 a 300 kPa
- Relación A/X (Aire /DQO) óptimo 0,004 a 0,005 ml de Aire/mg de DQO
- Relación A/X (Aire/S.Susp) óptimo 0,007 a 0,009 ml de Aire/mg de S Susp
- Tiempo óptimo de decantación para floculación 15 min con longitud de flóculo de 8 a 10 mm con velocidad de 40 rpm.
- Tiempo mínimo de decantación para floculación 3 min con velocidad de agitación 40 rpm.

- Tiempo de reacción óptimo 60 min para remoción de DQO (< 300 mg/l)
- Velocidad de ascenso 0,67 mm/s.

3.3 Evaluación del tratamiento físico-químico

Teniendo en cuenta que se desecha la biofiltración y que el tratamiento físico-químico satisface la solución del problema detectado, se evalúa el Tratamiento por flotación utilizando los valores operacionales (parámetros óptimos) obtenidos en la experimentación.

Se realizan dos pruebas de flotación final con las condiciones operacionales óptimas seleccionadas y sobre el agua clarificada se determinaron los parámetros fundamentales solicitados por la DTCCM. Los resultados alcanzados en las corridas se muestran en la tabla siguiente. Se obtiene una remoción de 87.8% para DQO, 86.3% para grasas y aceites, y 68.5% para hidrocarburos totales.

Tabla 3.4. Tratamiento físico-químico del agua residual tratada

Experim.	N (mg/l)	P (mg/l)	DQO (mg/l)	S.Susp (mg/l)	Fenol (mg/l)	G y A (mg/l)	pH (25°C)	S.Sed. (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	HC (mg/l)
1	5,3	2,5	94,6	46	0,02	8,2	7,00	0,01	22,1	12,5
2	5,02	3,1	77,3	32	0,05	8,5	7,02	0,002	30,2	8,4
Antes del trat F-Q	10,2	5,11	632,3	78	0,4	62,2	7,45	0,2	43,1	26,7
LMPP(1)	40	10	300	150		50	5,5-10,0	15	150	20

Fuente: 1- NC 521:2007

Como se aprecia los valores de concentración de DQO y grasas y aceites en el agua clarificada luego de ser tratada mediante tratamiento físico-químico por *DAF* cumplen con los requerimientos de vertimiento para ambos parámetros, llegando a

la conclusión que esta alternativa es factible para la solución al problema detectado por lo que se propone recircular el agua tratada.

3.4 Propuesta del Sistema de recirculación

Propuesta P+L: Tratamiento físico-químico del agua tratada.

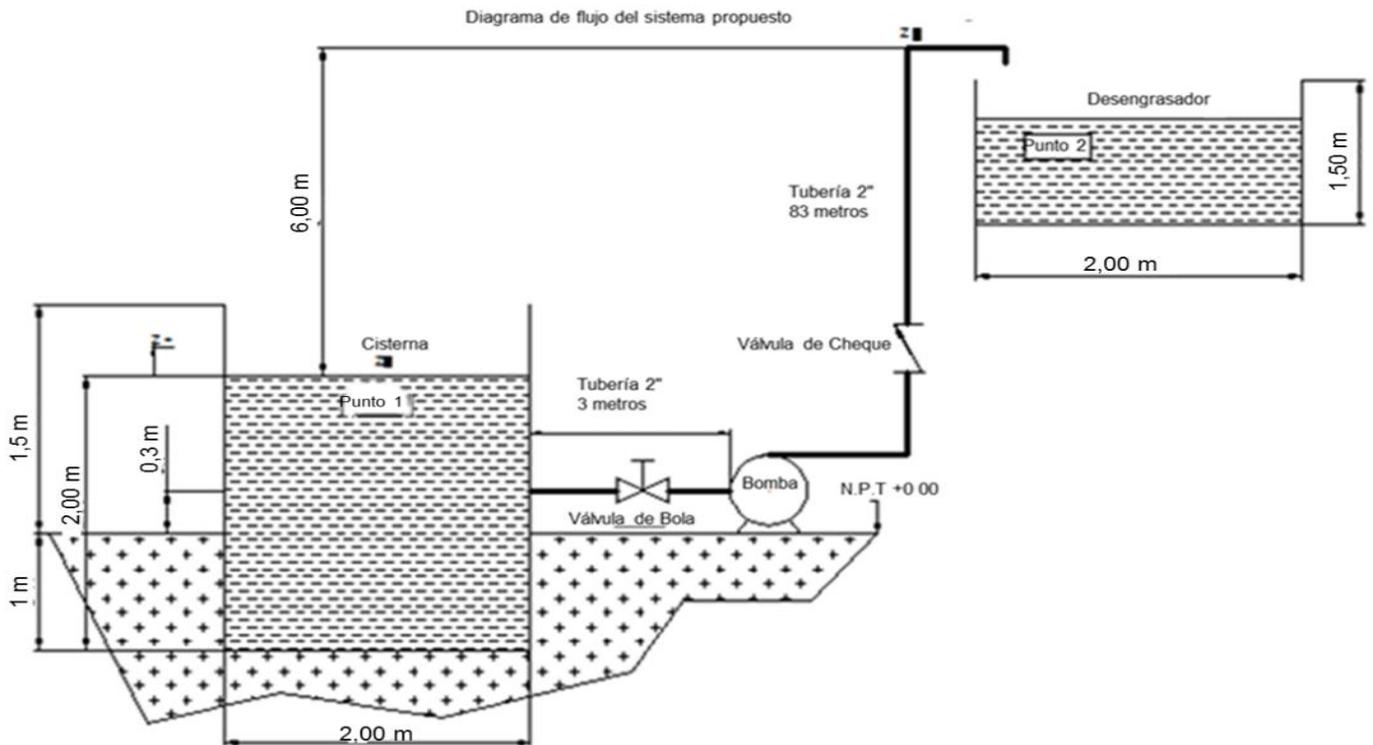


Figura 3.14 Esquema del sistema de flujo de fluido propuesto.

(Nota: En el anexo 5 se encuentra el esquema en tercera dimensión)

Al seleccionarse esta opción se hace necesario realizar una modificación al proceso que facilite llevar el agua tratada que no cumple con la N/C 521 depositada en la cisterna de vertimiento al primer equipo de la PTR (Desengrasador Lameral) con la intención de que se recircule nuevamente al proceso y se obtenga un agua tratada con los parámetros de calidad de vertimiento. Para esto se diseña el siguiente sistema de flujo de fluido.

Para implementar la propuesta la PTR cuenta con la bomba centrífuga RS4 40-18 CR020 154 de capacidad máxima 25 m³/h. La misma se utiliza en la planta para el lavado del lodo que pasa por el nastroprensa succionando el agua de la cisterna de

vertimiento (anexo 6). Se propone aprovechar para recirculación esta bomba por la cercanía a la cisterna.

Es necesaria la adquisición del resto de los insumos:

- 86 m de tubería de 2 "de acero inoxidable.
- 8 codos de 90°estándar de 2" de diámetro.
- 1 Válvula de bola de 2".
- 1 Válvula de Retorno (cheque) de 2".

(Todos estos insumos se encuentran disponibles en Almacenes Universales S.A UEB FERRETERIA).

Para evaluar la factibilidad de utilizar esta bomba en el sistema de flujo que se propone es necesario comprobar los parámetros operacionales del mismo.

3.4.1 Datos disponibles del equipamiento del sistema

Datos del motor:

(Datos de chapa)

Potencia: 1,8 KW

Velocidad de rotación: 3500 rpm

Voltaje: 440 V.

Frecuencia: 60 Hz.

Eficiencia: 90%.

Factor de potencia: 0,83

Datos de la bomba

Bomba centrífuga de acero inoxidable (RB 250 35 C)

Velocidad de rotación: 3480 rpm

Protección IP55.

Flujo volumétrico máximo: 25 m³/h

Carga: 13 m.

Potencia del eje: 1,3 kW

NPSH: 0,8

Cisterna de vertimiento.

Altura de operación 2 m

Ancho: 2 m

Largo: 3 m

Altura total: 2,5 m

Volumen= 15 m³

Tanque Recibidor (Desengrasador), en PTR

Altura de operación 1m

Ancho: 2 m

Largo: 4 m

Altura total: 1,5 m

Volumen= 12 m³

Propiedades físicas del agua residual

Temperatura: 30°C

Viscosidad: 7,9189 x 10⁻⁴ Pa.s (Rosabal, 2006)

Densidad: 995,77 kg/m³ (Rosabal, 2006)

Datos de las mediciones del sistema de tuberías

Tramo I (succión)

- Tubería:

Diámetro: 2" (0,05m)

Longitud: 3 m

Material: acero inoxidable

- Accesorios:

1 válvula de bola de diámetro de 2"

Tramo II (Descarga)

- Tubería:

Diámetro: 2" (0,05m)

Longitud: 83 m

Material: acero inoxidable

- Accesorios:

8 Codos 90° estándar de 2" de diámetro, soldado

1 Válvula de Cheque

3.5 Carga a entregar por la bomba al sistema.

3.5.1 Utilizando el software PSIM

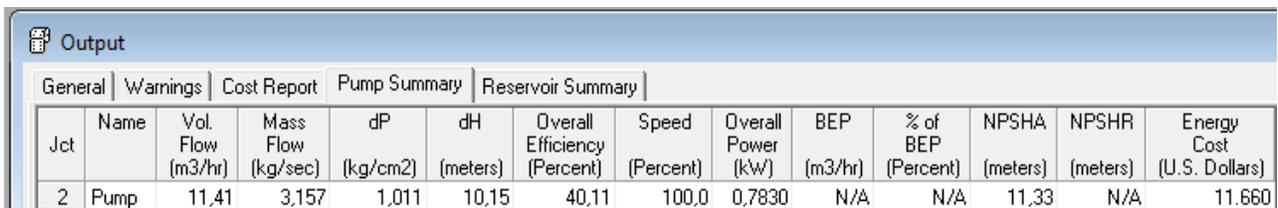
En el anexo 8 se muestran las tablas con los resultados arrojados por el software PSIM. La tabla 3.5 muestra el sumario de los parámetros del sistema por la simulación. Como se observa en la curva de flujo el punto de operación se obtiene para:

Caudal (Q) = 11,41 m³/h

Carga de la bomba (H sistema) = 10,15 m

Eficiencia (η)= 40,11 % (anexo 9- curva característica de la bomba-catálogo)

Tabla 3.5 Sumario de los parámetros del sistema con el PSIM.



Jct	Name	Vol. Flow (m3/hr)	Mass Flow (kg/sec)	dP (kg/cm2)	dH (meters)	Overall Efficiency (Percent)	Speed (Percent)	Overall Power (kW)	BEP (m3/hr)	% of BEP (Percent)	NPSHA (meters)	NPSHR (meters)	Energy Cost (U.S. Dollars)
2	Pump	11,41	3,157	1,011	10,15	40,11	100,0	0,7830	N/A	N/A	11,33	N/A	11,660

Fuente: Software PSIM

3.5.2 Utilizando el software *Tksolver*

Conforme al procedimiento para el cálculo de la carga a entregar por la bomba al sistema, mostrada en el capítulo anterior (epígrafe 2.4.2), se prosigue a realizar los cálculos mediante el software *Tksolver*.

En el anexo 10 se muestran las tablas con los resultados arrojados por el software *Tksolver*.

Tramo I

La velocidad del fluido para este tramo es:

$V_1=1,61\text{m/s}$

Para poder realizar el cálculo de las diferentes pérdidas es necesario conocer el régimen de flujo.

$Re_1= 101473,275$

El régimen de flujo desarrollado es turbulento por ser mayor a 4000

hl1- Pérdida por fricción en tubería y accesorios en tramo 1= 0,03 m

Tramo II

La velocidad del fluido para este tramo es:

Como se consideran iguales los diámetros de las tuberías en todo el sistema, la velocidad y el Reynolds del tramo 2 tiene el mismo valor que en el tramo 1.

hl2- Pérdida por tubería y accesorios en tramo 2= 4,069 m

Sistema

Para hallar las pérdidas de carga del sistema en general se suman las pérdidas de cada tramo, obteniéndose

$$h_{total} = h_{l1} + h_{l2} = 4,099m$$

Los datos y resultados del balance de energía mecánica aparecen reflejados en la tabla 3.6, la cual representa la salida del software *Tksolver*

Se obtiene que la carga de la bomba necesaria para el sistema propuesto (H sistema) es de 10,1 m.

Tabla 3.6 Resultados obtenidos por el *Tksolver*

Status	Input	Name	Output	Unit	Comment
	.003169	Q		m3/s	Flujo volumetrico de la bomba.
	.05	d1		m	Diametro del tubo de primer tramo.
		V2	1.61395467	m/s	Velocidad a la salida de la bomba.
	.05	d2		m	Diametro del tubo del segudo tramo.
		Re1	101473,275		Numero de Reynolds en el primer tramo.
		v1	7.95261E-7	m2/s	Viscosidad cinematica del agua.
		ktub1	.168		Perdidas por friccion en la tuberia en el tramo1.
	3	L1		m	Longitud de tuberia 1.
		hl1	.030270424	m	Perdidas por tuberias y accesorios en el tramo 1.
	.06	kg1			Perdidas por accesorios (valvula de bola)
	9.81	g		m/s2	Aceleracion de la gravedad.
		Re2	101473,275		Numero de Reynolds en el tramo 2.
		ktub2	4.648		Perdidas por friccion en la tuberia en el tramo 2.
	83	L2		m	Longitud del tramo 2.
	2	kcod2			Perdidas por accesorios (codo).
	10	kcw2			Perdidas por accesorios (valvula de cheque).
	6	ΔZ		m	Altura de trasiego de la bomba.
		htotal	4.09925275	m	Perdidas por friccion total.
		Hp	10.0992527	m	Perdida de la Bomba.
		f2	.0028		
	.0028	f1			
		hl2	4.06898232	m	Perdidas por tuberias y accesorios en el tramo 2.
		A1	.0019635	m2	Area.
		V1	1.61395467	m/s	Velocidad a la entrada de la bomba.
	.000791897	VD		Pa.s	Viscosidad dinamica del agua
	995.77	D		kg/m3	Densidad del agua

Fuente: Software Tksolver

3.5.3 Comparación de resultados

El error relativo de determinación de la carga entre los métodos de los software PSIM. Y *Tksolver*..

H sistema *Tksolver* = 10,1 m

H sistema PSIM = 10,15 m

Error relativo $\varepsilon = 0,5\%$

Se considera correcto porque es menor al 5%, ya que este es el límite correcto para que el cálculo sea satisfactorio para los casos prácticos de trayectos de tuberías con bombas.

3.6 Evaluación del sistema propuesto

Para la evaluación del sistema propuesto se utilizan los resultados obtenidos por el software PSIM ya que es una herramienta específica para la modelación y cálculo de bombas en sistemas hidráulicos.

Al evaluar los criterios de evaluación de bombas se obtuvo:

Tabla 3.7 Criterio de selección de la bomba para el sistema propuesto

Parámetros	Sistema	Bomba Curva Fabricante
q (m ³ /h)	11,4	25 **
Hb (m)	10,15	10,2*
NPSH	11,33	2,2*

Fuente: **- Datos de chapa de la bomba

*-curva característica de la bomba-catálogo (anexo 9)

Como se puede observar, se cumple que:

- Carga de la bomba es mayor a la del sistema: $H_b > H_{bs}$
- Caudal de la bomba es superior a la del punto de operación del sistema: $q_b > q_s$
- Carga neta de succión positiva del sistema (NPSHs) > 0
- Carga neta de succión positiva de la bomba es menor a la del sistema: $NPSH_b \leq NPSH_s$

Al cumplirse todos los criterios de selección, se concluye que la bomba disponible satisface los requerimientos de operación del sistema propuesto.

3.7 Evaluación económica de la opción de P+L propuesta.

Como se menciona en el capítulo anterior la evaluación económica de la propuesta de P+L se determina a partir del Método Beneficio-Costo, para esto se consideran como Beneficios el ahorro de la implementación de la propuesta y como Costos la amortización de la misma.

3.7.1 Beneficios económicos de la propuesta

- Ahorro de productos químicos

El costo por consumo de producto químico se calcula comparando la preparación de los químicos consumidos en el proceso antes y después de la implementación de la propuesta. Ya que si no se efectúa la propuesta de P+L el agua de la cisterna de vertimiento regresaría al tanque de aguas oleosas aumentando la contaminación nuevamente. Si por el contrario se pone en práctica la propuesta la planta trataría un agua con menos de la mitad de esta contaminación.

Tabla 3.8 Costo de productos químicos para 1m³ de agua oleosa a tratar

Productos Químicos.	Consumo de productos químicos por m ³ de agua tratada (L/m ³)*		Precio** MLC (\$/L)	Total MLC (\$/m ³)	
	Antes de la prop.	Después de la prop.		Antes de la prop.	Después de la prop.
NaOH	0,420	0,420	0,380	0,1596	0,1596
NaHClO	0,214	0,107	0,286	0,0612	0,0306
H ₂ SO ₄	0,145	0,145	0,537	0,0779	0,0779
Oíl Break	0,071	0,0355	14,849	1,0543	0,5271
pH 7L	0,071	0,0355	8,360	0,5936	0,2968
Deflocar, PAC	0,23	0,115	3,300	0,759	0,3795
KMnO ₄	0,034	0,017	7,159	0,2434	0,1217
Poliel. Aniónica	1	0,5	0,014	0,5	0,014
				3,449	1,6072

Fuente: *- Dosis de producto químico por agua a tratar (Gómez, 2018(a))

**-Precio de productos químicos (Factura entregada por departamento de economía, 2019)

Analizando el consumo de químicos actual y el consumo con el implemento de la propuesta se puede concluir que la División ahorra \$1,84 por cada metro cúbico de agua oleosa tratada. Teniendo en cuenta que el flujo de la bomba es de 11,41 m³/h se ahorrarían 21,015 \$/h, lo que equivale a 21 015 \$/año

- Ahorro de electricidad

En el proceso actual cuando las aguas tratadas no cumplen con los parámetros para el vertimiento son enviadas por gravedad a la cisterna de envío, posteriormente se bombea a la cisterna de reenvío y esta a su vez al tanque 14. Una vez devuelta al tanque receptor el agua comienza nuevamente el proceso para el tratamiento. Se homogenizan las aguas en el interior del tanque con dos bombas de recirculación (PRD) y después de 45 min la bomba de trasiego a planta comienza a bombear el agua para el tratamiento en la PTR. En resumen, se ponen en funcionamiento 5 bombas. En la tabla 3.9 se relacionan estos equipos y su consumo.

Tabla 3.9 Equipos utilizados para retornar el agua tratada (FE) de la PTR al tanque receptor (Tk -14) (procedimiento actual)

Equipos	Consumo (kW/h)	Precio(\$/kW)	Total MLC(\$/h)
Bomba de envío	2,9	0,17	0,4930
Bomba de reenvío	3	0,17	0,5100
Bomba PRD 1 (recirculación en el tanque 14)	22	0,17	3,7400
Bomba PRD2 (recirculación en el tanque 14)	22	0,17	3,7400
Bomba de trasiego a planta	1,5	0,17	0,2550
Total.	51,4		8,738

Fuente: Manuales de las bombas y factura de electricidad (mayo 2019)

Si se implementa la propuesta para recircular el agua tratada dentro de la planta sería necesario utilizar solo una bomba (Bomba de lavado del nastroprensa). En la tabla 3.10 se muestra el consumo de electricidad de la misma.

Tabla 3.10 Equipo utilizado si se implementa la propuesta

Equipos	Consumo (kW/h)	Precio(\$/kW)	Total MLC(\$/h)
Bomba de lavado del nastroprensa	1,8	0,17	0,3060

Fuente: Manual de la bomba y factura de electricidad (mayo 2019)

Se puede concluir que con la propuesta se ahorrarían 49,6 kW/h, equivalente a 8,432 \$/h. El ahorro por consumo anual de electricidad sería de 8432 \$/a.

Los beneficios de la propuesta ascienden a **29 447\$/a**

Es importante resaltar que la propuesta brinda otros beneficios económicos relacionados con ganancias debido a:

- El cobro del almacenamiento de aguas oleosas a los buques por parte de la Empresa, lo cual no se puede realizar en ocasiones por no tener disponibilidad en el tanque receptor (TK 14). La Empresa cobra 7,93 \$/m³ de agua oleosa recibidas por buque (anexo 11), lo que multiplicado por el volumen de agua oleosa recibida al año daría la ganancia por este concepto.
- Los tanques de slot de los buques tienen una capacidad desde 100 m³ a 3000 m³ (Departamento de marítimo). Si no se puede descargar el residual por falta de capacidad en el tanque receptor (TK 14), entonces la División dejaría de cargar y vender igual cantidad de combustible a los clientes.
- Otra consideración que se puede tener es que el proceso de tratamiento de aguas oleosas recupera el combustible presente en esta agua contaminada y lo incorpora al proceso de recepción y entrega, por lo que si la División no recibe aguas oleosas por falta de capacidad en el tanque receptor (Tk 14), no puede recuperar tampoco combustible acompañante.

Estos beneficios no fueron incluidos en el análisis económico por no ser cuantificados en la DTCCM

3.7.2 Costo económico de la propuesta

Gastos por inversión

La inversión se obtuvo a partir del costo de adquisición del equipamiento necesario para poner en práctica la propuesta sin tener en cuenta los costos de instalación y montaje ya que el mismo se lleva a cabo por la brigada de mantenimiento de la empresa, tampoco se considera el costo de la bomba utilizada para el sistema de recirculación por ser la que se utiliza en el proceso para el lavado de lodos en el nastroprensa.

El monto total de la inversión se describe en la tabla 3.11

Tabla 3.11 Gastos de la inversión (tuberías y accesorios)

Inversión Total				
Elementos	Unidad de medida	Cantidad (UM)	Costo Unit (\$/UM)	Costo total (\$)
válvula de bola 2"	u	1	75,25	75,25
válvula de retorno (cheque) 2"	u	1	56,68	56,68
Codo de 90° estándar	u	8	2,97	23,76
Tuberías de acero inoxidable de 2" de diámetro	m	86	16,17	1390,62
Costo total de adquisición o Inversión				1546,31

Fuente: Departamento de Economía, 2019

El costo total de la inversión es de \$ 1546,31. Se selecciona 10 años de vida útil para la propuesta ya que según ULRICH (1992) es el tiempo adecuado para estimaciones preliminares en Plantas o Proceso Químicos.

Se obtiene que la amortización de es 154,6 \$/a

3.7.3 Relación beneficio – costo

Se obtiene una relación beneficio-costo (B/C) mayor que 1 (190,47), por lo que el proyecto evaluado puede ser considerado económicamente factible.

3.8 Valoración ambiental de la propuesta de P+L

Los combustibles depositados en tanques presentan emulsiones de agua, que precipitan al fondo del tanque. Antes de entregar o recibir producto en ellos es necesario drenarlos para poder garantizar la comercialización con la máxima calidad. Esos drenajes van a canalizaciones que llevan esta agua contaminada a una cisterna y de ahí se bombea al tanque 14. Si el tanque no tiene disponibilidad llegará el momento en que el drenaje se haga al suelo. La evaluación del impacto ambiental de la propuesta planteada se basa en el impacto ambiental positivo debido a la cantidad de agua oleosa que se deja de verter al manto freático por concepto de drenajes de tanques. La propuesta permite garantizar la disponibilidad del tanque receptor de agua oleosa y mitigar la contaminación de los suelos del área que ocupa la comercializadora.

3.9 Conclusiones parciales

- 1- La calidad del efluente del sistema de tratamiento de agua oleosa de la DTCCM no cumple con los requerimientos de vertimiento, según los valores máximos permisibles de la NC 521:2007.
- 2- De las dos propuestas de alternativas de solución, se propone el tratamiento físico-químico del agua tratada con posterior flotación de aire disuelto como opción de PML, al obtenerse un agua residual con calidad para su vertimiento.
- 3- Se define el programa químico para la propuesta y se diseña el sistema de flujo para la recirculación del efluente de las aguas tratadas, para el que se propone utilizar la bomba de lavado del Nastroprensa.
- 4- El sistema de flujo propuesto requiere alrededor de 10,15 m de carga de bomba, lo cual se satisface con una bomba centrífuga tipo (RB 250 35 C).
- 5- Se determina la factibilidad económica de la propuesta con una relación beneficio - costo mayor que 1 e igual a 190,47.

CONCLUSIONES

- 1- La calidad del efluente del sistema de tratamiento de agua oleosa de la DTCCM no cumple con los requerimientos de vertimiento, pues la concentración de DQO, grasas y aceite sobrepasan los valores máximos permisibles de la NC 521:2007.
- 2- Se propone el tratamiento físico-químico del agua tratada con posterior flotación de aire disuelto como opción de PML, al obtenerse un agua residual con calidad para su vertimiento, lo cual valida la hipótesis planteada.
- 3- Se descarta la biofiltración como alternativa de solución ya que dicho tratamiento no satisface los requerimientos para el vertimiento del agua residual, fundamentalmente por los niveles de DQO obtenidos (541 mg/l promedio) los cuales sobrepasan los límites de la NC 521:2007 (300 mg/L).
- 4- Se define el programa químico para la propuesta y se diseña el sistema de flujo para la recirculación del efluente de las aguas tratadas fuera de especificación, depositadas en la cisterna de vertimiento, al Desengrasador Lamerl, utilizando la bomba de lavado del Nastroprensa (centrífuga RB 250 35 C) instalada en la Planta.
- 5- El sistema de flujo diseñado requiere 10,15 m y 10,1 m de carga de bombeo calculado por el PSIM y *Tksolver* respectivamente, para un 0,5 % de error, lo cual se satisface con la bomba instalada que cumple con los criterios de selección para la recirculación.
- 6- Se determina la factibilidad económica de la propuesta con una relación beneficio - costo de 190,47; teniendo en cuenta los costos por concepto de implementación de la propuesta (amortización 154,6 \$/a) y los ahorros por consumo de productos químicos y electricidad (29 447 \$/a).

RECOMENDACIONES

Se recomienda proponer a la dirección de División Territorial de Comercialización de Combustibles Matanzas:

- 1- Implementar la propuesta de tratamiento físico-químico del agua tratada fuera de especificación que no cumple con la normativa de vertimiento a la Bahía de Matanzas.
- 2- Sustituir el coagulante DEFLOCAR (Policloruro de Aluminio) por el llamado PAC 300.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abadi, S.R.H., Sebzari, M.R., Hemati, M., Rekabdar, F., Mohammadi, T., *Arabian Journal of Chemistry* (2017) 10, S1913–S1922A review of treating oily wastewater. www.ksu.edu.sa/ksu/sciencedirect.com
- Akob, D.M. et al., (2016). *Wastewater disposal from unconventional oil and gas development degrades stream quality at a West Virginia injection facility. Environ. Sci. Technol. of the Total Environment. Journal home page: www.elsevier.com/locate/scitotenv. Environmental signatures and effects of an oil and gas waste water spill in the Williston Basin, North Dakota. Ooo cita 1er párrafo pag 1782.*
- Amed. M.H. et al., (2017). *Magid, Egypt. J. Petrol.*
- Arriol, E. (2018). Aguas residuales. <https://www.ecologiaverde.com/question-las-aguas-residuales-y-como-se-clasifican-1436.html>. 2018
- Atadashi, I.M. et al., (2015). *Egypt. J. Petrol.* 24. 383–396. *Egyptian Petroleum Research Institute. Journal of Petroleum. Cross flow microfiltration of oil-water, emulsions using clay based ceramic membrane support and TiO₂ composite membrane www.elsevier.com/locate/egyjp www.science direct. Como ooo cita 25 3er párrafo pag 680.*
- Barron, M.G. (2012). *Ecological impacts of the deep-water Horizon oil spill: implications for immune toxicity. Toxic*
- Brito, J. (2006). Propuesta de una tecnología para obtener un biosorbente de Cr³⁺ a partir del bagazo de caña. Escalado a nivel de planta piloto., Tesis presentada en opción al Grado Científico de Máster en Análisis de Procesos en la Industria Química, en la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba, 2006.
- Brody, T.M. et al., (2010). *Analysis of inland crude oil spill threats, vulnerabilities, and emergency response in the Midwest United States. Risk. Water Research. Journal home page:*

www.elsevier.com/locate/watres .A review of bio-based materials for oil spill treatment. Pag 263 1er párrafo.

- Chang, S.E. et al., (2014). *Consequences of oil spills: a review and framework for informing planning. Ecol. Soc*
- Chavez, L. (2012). Tesis. Evaluación del sistema de tratamiento de aguas oleosas residuales.
- Crane. (2006): Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. Editorial Mc GRAW-HILL. México.
- Das, B., et al., (2017). *Separation of oil from oily wastewater using low cost ceramic membrane. Korean J. Chem. Eng.* 34, 2559–2569
- Díaz Betancourt, R. (2006). Tratamiento de aguas y aguas residuales. Ciudad de La Habana. Editorial ISPJAE.
- Díaz, M. (2019). Informe de resultado de servicio científico-Técnico. Caracterización del agua residual después del tratamiento. CEINPET.6p
- Fernández, A. (2002). Clasificación de las aguas residuales industriales. [online]. [abril, (2002)]. Disponible en: [http://: Ambientum.Com](http://Ambientum.Com).
- Gómez, J. (2018^a). Manual de operaciones de la Planta de Tratamiento de Agua Residual Oleosa. División territorial de Combustibles Matanzas.15 p.
- Gómez, J. (2018^b). Norma de Proceso de la Planta de Tratamiento de Agua Residual Oleosa. División territorial de Combustibles Matanzas. 10p.
- Elnenay H. et al., (2017). Magid, Egypt. *J. Petrol.* 26.203–208.
- H.I. Bai, X. et al. (2012). *Prog. Nat. Sci.: Mater. Int.*–257. *Progress in Natural Science: Materials International. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/pnsmiReview. Performance improvement of hybrid polymer membranes for wastewater treatment by introduction of micro reaction locations.*

- Hansen B.R., Davies S.R.H. (1994). “Review of Potential Technologies for the Removal of Dissolved Components from Produced Water”. *Kvaerner Process System, Norway, Chemical Engineering Research and Design*; 72:176-188. 2013 5th International Conference on Chemical, Biological and Environmental Engineering SEM Study of Oil Adsorption on the Surface of *Khaya Senegalensis* Dried Leaves. www.elsevier.com/locate/procedia.
- Henkel, J.R, *et al.*, (.2012.). *Large-scale impacts of the deep-water Horizon oil spill: can local disturbance affect distant ecosystem through migratory shore birds* *Bioscience* 62, 676 e 685.
- Hernández, E. (2017). Manual de Operador MAP. Centro Politécnico del Petróleo Sede Matanzas. 130p
- Hurtado, C. San Martín R. (2006). Coagulantes inorgánicos de uso frecuente en el tratamiento de aguas. (En línea). México. (Consultado 15/02/2019). Disponible en <http://www.imiq.org/león99/memorias.htm>.
- Iturralde, M. (2011). Protege a tu familia de las aguas contaminadas. Derechos reservados. La Habana. Cuba.
- Zhong J., Sun X.J., C.L. Wang (2003). *Purif. Technol.* 32. 93–98. *Egyptian Petroleum Research Institute. Journal of Petroleum. Cross flow microfiltration of oil-water, emulsions using clay based ceramic membrane support and TiO2 composite membrane* www.elsevier.com/locate/egyjp www.sciencedirect.com.oocita 23 3er párrafo pág. 680.
- Klock, B.V. (2004). *Minimization, handling, treatment, and disposal of petroleum products terminal wastewaters*. API Pub. No. 4602, pp. 5-5 to 6-14.
- Knight, R. *et al.* (.2000). *Constructed wetlands for treatment of hydrocarbons.*, *Ecological Engineering*, Vol. 15, No. 4, 2000, pp. 41-55.
- Kachieng’a, M.N.B. (2015). *Momba, Biodegradation of fats and oils in domestic waste water by selected protozoa anisolates*, *J. Water Air Soil Pollut.* 226 .www.elsevier.com/locate.

- L.M. Bai, et al. (2013). *Desalination* 319.18–24. *Progress in Natural Science: Materials International*. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/pnsmi Review. Performance improvement of hybrid polymer membranes for wastewater treatment by introduction of micro reaction locations
- Lauer, N.E. et al., (2016). *Brines pills associated with unconventional oil development in North Dakota*. *Environ. Sci. Technol.* 50 (10), 5389–5397.50 (11), 5517–5525.ooo cita 1er párrafo pag 1782.
- Marsilli, A. (2005). Tratamiento de aguas residuales. Disponible en: www.tierramor.org.
- Menéndez Gutiérrez, C. et al., (2007). Procesos para el tratamiento Biológico de aguas Residuales Industriales. Ciudad de La Habana. Editorial Universitaria. Cuba.
- Mettcalfe & Eddy (1998). Tratamiento y Depuración de las Aguas Residuales. Editorial Labor, S.A. Barcelona.
- Moosai, R., Dawe, R.A. (2003). *Sep. Purif. Technol. (Review)*
- Napier-Reid LTD. (2005). *Water & Wastewater Treatment*. (On line). Toronto. (Consultado 23/11/2018). *Dissolved Air Floatation System*. pp. 1-8.
- NC 521:2007. Vertimiento de aguas residuales a la zona costera y aguas marinas. Especializaciones.
- Ortiz P, Fonseca, F, Rodríguez, G., Montenegro, L., (2006) Biomateriales solventes para la limpieza de derrames de hidrocarburos en suelos y cuerpos de agua. *Ingeniería e Investigación*, Vol. 26, No. 2, 2006, pp. 20-27.
- Ortiz, P. et al., (2006). Biomateriales. Solventes para la limpieza de derrames de hidrocarburos en suelos y cuerpos de agua., *Ingeniería e Investigación*, Vol. 26, No. 2, 2006, pp. 20-27.

- Reyes, L. (2003). La biomasa cañera como alternativa para el incremento de la eficiencia energética y la reducción de la contaminación ambiental. *Revista Centro Azúcar*, Vol. 30, No. 2, pp. 14-20, abril-junio, 2003.
- Rodríguez, A. (2006). Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Disponible en: www.madrimasd.org.
- Rodríguez, H. (2017). Aguas Residuales y efectos contaminantes. <https://www.iagua.es/blogs/hector-rodriguez-pimentel/aguas-residuales-y-efectos-contaminantes>.
- Rosa, J y Rubio, J. (2003). *Revista Química Industrial* (94). 58-6. Revista facultad de ingeniería. www.revistaingenieria.uda.cl. Remoción de aceites (Petróleo) emulsificados en agua por floculación–flotación.
- Rosabal, J.M y Garcell, (2006). *Hidrodinámica y separaciones mecánicas*. Ciudad de la Habana. Editorial Félix Varela. 2da edición.
- Rubio, J. (2002). *Proceedings from Strategic Conference and Workshop, Hawaii, Edited by Ralston, J. and Miller, J. (2003)* 17-32. Revista facultad de ingeniería. www.revistaingenieria.uda.cl. Remoción de aceites (Petróleo) emulsificados en agua por floculación –flotación.
- Salazar, E. (2012). Remoción de hidrocarburos mediante biopolímeros naturales: efecto del tamaño de partícula., Tesis presentada en opción al grado científico de Master en Ciencias Ambientales, en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultades de Ciencias Químicas, Ingeniería y Medicina, México.
- Schultz, T.E. (2006). *Improve oily wastewater treatment. Hydrocarbon Processing*, Vol. 85, pp. 103-111.
- Sellami M.H. (2016). *Treatment and reuse of wastewaters discharged by petroleum industries (HMD/Algeria)*. *International Journal of master sources* 6: 1-6.

- Serrano, J.H.; Tortosa, B.I. (2006). Protección Ambiental y Producción más Limpia. En Suplemento Especial Universidad para todos. Parte 1. La Habana: Academia.16 p. ISBN 978-959-270-097-0.
- Serrano, J.H.y col. (2006). Universidad para todos. Protección ambiental y producción más limpia. Suplemento especial Parte 1. Cuba. Editorial.
- Teas, C.H. *et al.*, (2002). *Investigation of the effectiveness of absorbent materials in oil spill cleanup. Spill Science & Technology, Bulletin* 8, 2002, pp. 259 – 264.
- Teichert, S. *et al.*, (2017). Estudio de tecnologías de tratamiento de agua residual y concentración en la industria. (INFORME CSET-2017-PU-005-WT).
- Urbieto, J. (2005). Contaminación y purificación del agua. [en línea]. [Consulta marzo 21, 2019]. Disponible en [http:// www.monografia](http://www.monografia.com).
- Veil J.A. *et al.*, (2004). “A White Paper Describing Produced Water from Production of Crude Oil, Natural Gas, and Coal Bed Methane,” US DOE W-31-109-Eng-38.
- ULRICH, G.D. (1992). Diseño y economía de los procesos de ingeniería química. Mc GRAW-HILL. México. ISBN 970-10-0087-0.p263
- ZHDW. (2002). *Advanced technologies in water and wastewater treatment. Journal of Environmental Engineering and Science* 1: 247-264.*Review Article .Chemical Treatment Process and Reuse of Oily-Waters arising from Petroleum Field of HBK/Algeria International Journal of Waste Resources*

ANEXOS

Anexo: 1

Tabla A.1 Límites máximos permisibles para las descargas de aguas residuales a la zona costera y a los cuerpos receptores marinos, (Parámetros Básicos)

		Clase del Cuerpo Receptor					
parámetro	UM	A	B	C	D	E	F
pH	U	5,5-9,0	NP	5,5-9,0	5,0-10,0	5,5-9,0	5,0-10,0
Temperatura	°C	40	NP	40	40	40	40
Aceites y grasas	mg/l	15	NP	15-50	50	30	50
Hidrocarburos Totales	mg/l	5	NP	5-10	20	10	20
Materia Flotante		Ausente	NP	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos Sedimentarios	mg/l	5	NP	5-15	15	10	15
Sólidos suspendidos Totales	mg/l	30	NP	30-150	150	75	150
DBO ₅	mg/l	30	NP	30-150	150	75	150
DQO	mg/l	75	NP	75-300	300	190	300
Nitrógeno Total	mg/l	10	NP	20	40	20	40
Fosforo Total	mg/l	5	NP	7	10	5	10
Coliformes fecales	NMP/100 ml	200	NP	200-400	1000	1000	SR

Fuente: NC 521:2007

Anexo: 2



Figura A.1 Equipo para la Biofiltración (columna empacada)
Fuente: Díaz, (2019)

Anexo: 3



Figura A.2 Equipo Jar Test
Fuente: Díaz, (2019)

Anexo: 4



Figura A.3. Equipo *DAF*
Fuente: Díaz, (2019)

Anexo:6

Bomba escogida para la propuesta seleccionada



Figura A.5. Bomba RS4 40-18 CR020 15
Fuente: Elaboración Propia



Figura A.6. Bomba RS4 40-18CR020 154
Fuente: Manual de la bomba

Anexo:7

Tabla A.2 Resultados de los analisis por el CEINPET 2015-2018

MUESTRAS ANALIZADAS POR CEINPET

	DQO (mg/l)	PH (25 °C)	DBO (mg/l)	Sulfuros (mg/l)	S Susp (mg/l)	Cond(ms/cm) 25 °C	Fenoles (mg/l)	S sed (mg/l)	G Y A (mg/l)	HC (mg/l)	Nt (mg/l)	Pt (mg/l)	
	ISO 6060	ISO 10523	ISO 5815	APHA	APHA	APHA	ISO 6439	APHA	APHA	APHA	ISO 10048	APHA 4500	
LMP NC 521	190	5,0-10,0	190		75			30	30		20	7	
2015	04/02/2015	600	7,42	42,5	93	184	45,4	0,08	1	34,10	23,2	10,20	8,03
	16/07/2015	528	7,4	50,3	80	104	46,2	0,05	1,5	28,50	20,2	8,90	6,20
	03/12/2015	620	7,32	42,5	106	98	50,3	0,03	0,7	26,30	26,3	11,30	9,35
2016	15/03/2016	752	7,2	60,4	85	110	36,4	0,06	0,9	20,40	22,2	9,20	6,26
	08/09/2016	530	6,8	46,2	90	88	38,5	0,02	1,2	27,30	24,3	9,50	6,45
	24/10/2016	420	7,32	56,3	88	93	43,6	0,024	2,1	25,00	30,2	8,60	8,26
	12/12/2016	530	7,5	53,2	95	110	39,2	0,32	0,8	32,20	20,6	9,50	6,42
2017	23/01/2017	620	6,8	56,3	90	104	46,8	0,06	1,6	27,40	23,1	8,39	4,98
	14/03/2017	540	7,34	48,3	96	97	50,3	0,02	0,4	28,00	26,3	9,14	7,46
	25/05/2017	602	7,45	43,1	92	193	45,4	0,08	1	36,20	25,3	12,30	8,48
	08/09/2017	615	7,2	46,4	80	132	43,6	0,04	1,8	34,50	32,1	8,50	7,23
	22/11/2017	450	6,45	50,7	89	110	34,2	0,06	1,2	29,20	24,2	11,80	5,94
2018	22/02/2018	548	6,82	52,6	94	128	39,8	0,03	0,3	27,20	23,3	9,30	7,12
	26/09/2018	640	7,3	58,3	93	95	40,2	0,021	0,8	26,20	20,2	9,36	7,42
	04/10/2018	535	8,2	45,8	88	120	43,2	0,04	1,3	32,60	24	8,40	7,96
	25/10/2018	620	7,4	43,6	90	87	45,6	0,04	0,4	29,03	25,2	9,20	5,44
	08/11/2018	490	7,83	50,8	85	93	37,4	0,06	0,8	27,20	22,1	8,36	6,87
	22/11/2018	560	7,42	46,3	92	90	32,2	0,03	1,9	30,20	24,3	9,30	5,63
PROMEDIO	566,667	7,287222	49,64444	90,33333	113	42,12777778	0,059167	1,09444	28,97	24,283	9,513889	6,97	

Fuente: Elaboración propia

Anexo: 8

Resultados arrojados por el PSIM para el sistema de recirculación propuesto.

Energy Cost

Energy Cost Calculations

Do Not Calculate Costs

Calculate Costs

Energy Cost

Cost: 0.17 U.S. Dollars

Per: kW-hr

Cost Definitions

Monetary Cost

Operation/Energy

Time Period

System Life: 10 years

Interest Rate: 10 % Per years

Inflation Rate: 10 %

OK Cancel Help

Output

General | Warnings | Cost Report | Pump Summary | Reservoir Summary

Table Units:	Type	Name	Operation/ Energy	TOTAL
U.S. Dollars				
TOTAL OF ALL MODEL COSTS				11.660
Total of All Shown Costs				11.660 11.660
Pump Subtotal				11.660 11.660
J2	Pump	Pump	11.660	11.660

Output

General | Warnings | Cost Report | Pump Summary | Reservoir Summary

Jct	Name	Vol. Flow (m3/hr)	Mass Flow (kg/sec)	dP (kg/cm2)	dH (meters)	Overall Efficiency (Percent)	Speed (Percent)	Overall Power (kW)	BEP (m3/hr)	% of BEP (Percent)	NPSHA (meters)	NPSHR (meters)	Energy Cost (U.S. Dollars)
2	Pump	11.41	3,157	1,011	10,15	40,11	100,0	0,7830	N/A	N/A	11,33	N/A	11,660

 Output

General | Warnings | Cost Report | Pump Summary | Reservoir Summary

Jct	Name	Type	Liq. Height (meters)	Liq. Elevation (meters)	Surface Pressure (kg/cm ²)
1	Cist.	Infinite	N/A	2,000	1,033
4	Desen	Infinite	N/A	8,000	1,033

Pipes

Pipe	Name	Vol. Flow Rate (m ³ /hr)	Velocity (meters/sec)	P Static Max (kg/cm ²)	P Static Min (kg/cm ²)	Elevation Inlet (meters)	Elevation Outlet (meters)	dP Stag. Total (kg/cm ²)	dP Static Total (kg/cm ²)	dP Gravity (kg/cm ²)	dH (meters)	P Static In (kg/cm ²)	P Static Out (kg/cm ²)	P Stag. In (kg/cm ²)	P Stag. Out (kg/cm ²)
1	Pipe	11,41	1,345	1,163	1,024	2,0000	0,5000	-0,1390	-0,1390	-0,1494	0,1042	1,024	1,163	1,033	1,172
2	Pipe	11,41	1,345	2,174	1,024	0,5000	8,0000	1,1498	1,1498	0,7469	4,0456	2,174	1,024	2,183	1,033

All Junctions | Database Sources | Pump | Reservoir

Jct	Name	P Static In (kg/cm ²)	P Static Out (kg/cm ²)	P Stag. In (kg/cm ²)	P Stag. Out (kg/cm ²)	Vol. Flow Rate Thru Jct (m ³ /hr)	Mass Flow Rate Thru Jct (kg/sec)	Loss Factor (K)
1	Cist.	1,033	1,033	1,033	1,033	11,41	3,157	0
2	Pump	1,163	2,174	1,172	2,183	11,41	3,157	0
4	Desen	1,033	1,033	1,033	1,033	11,41	3,157	0

All Junctions | Database Sources | Pump | Reservoir

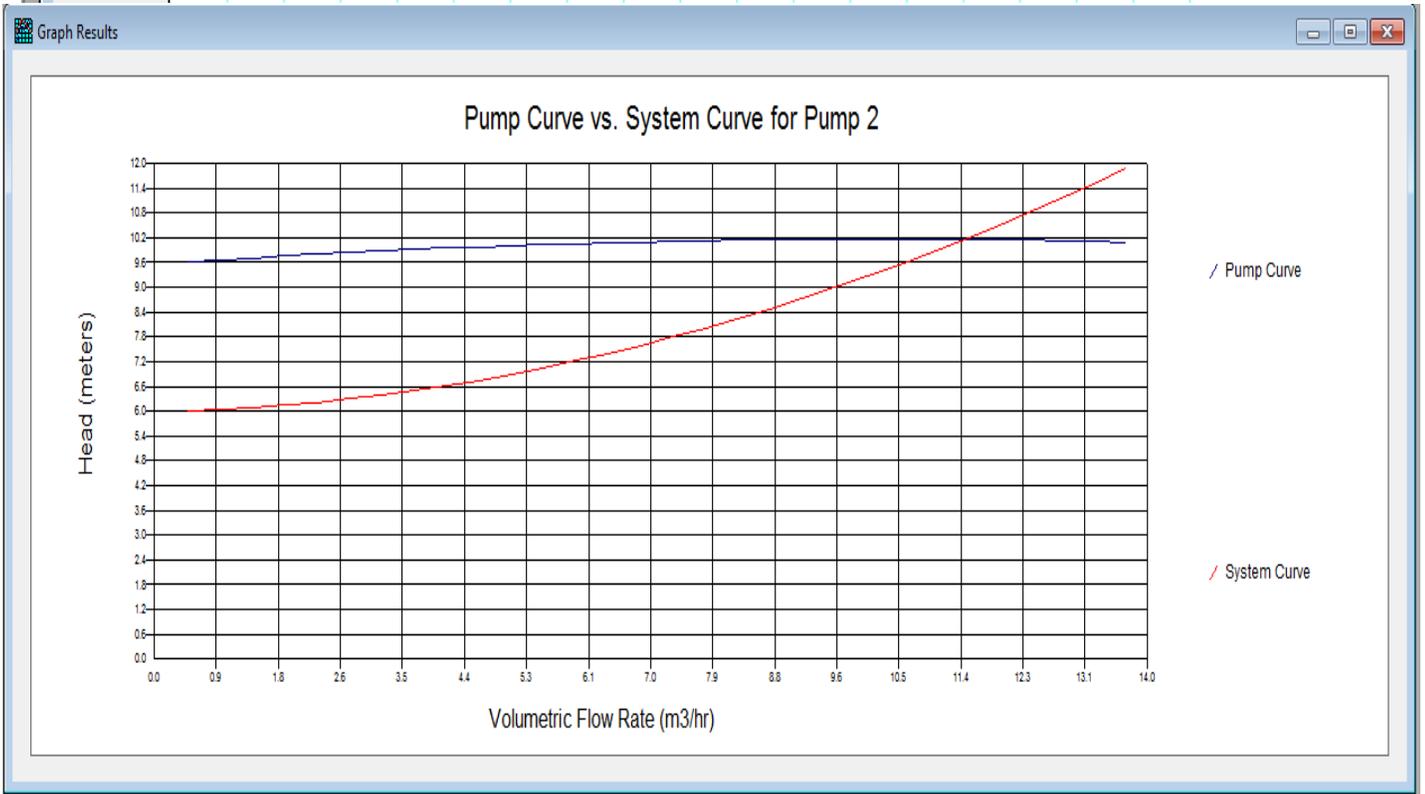
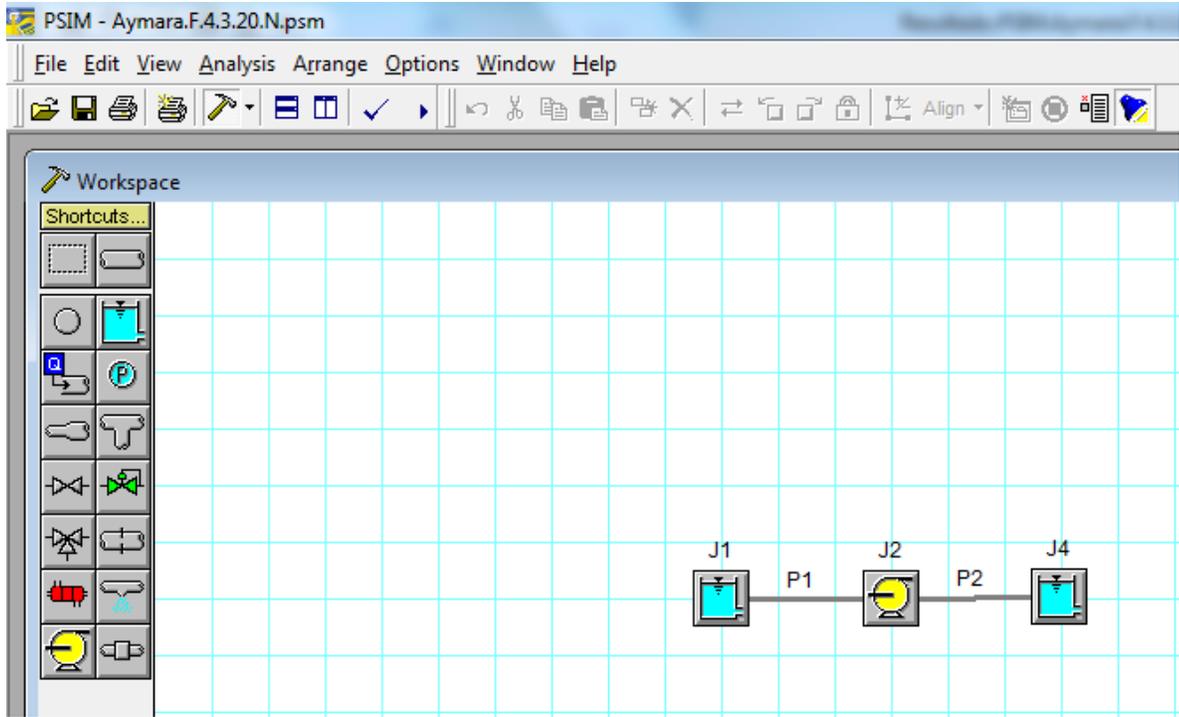
Jct	Name	Type	Operation/Energy
1	Cist.	Reservoir	
2	Pump	Pump	Fixed Energy Cost
4	Desen	Reservoir	

All Junctions | Database Sources | Pump | Reservoir

Pump	Name	P Static In (kg/cm ²)	P Static Out (kg/cm ²)	P Stag. In (kg/cm ²)	P Stag. Out (kg/cm ²)	Vol. Flow Rate Thru Jct (m ³ /hr)	Mass Flow Rate Thru Jct (kg/sec)	Loss Factor (K)
2	Pump	1,163	2,174	1,172	2,183	11,41	3,157	0

All Junctions | Database Sources | Pump | Reservoir

Reservoir	Name	P Static In (kg/cm ²)	P Static Out (kg/cm ²)	P Stag. In (kg/cm ²)	P Stag. Out (kg/cm ²)	Vol. Flow Rate Thru Jct (m ³ /hr)	Mass Flow Rate Thru Jct (kg/sec)	Loss Factor (K)
1	Cist.	1,033	1,033	1,033	1,033	11,41	3,157	0
4	Desen	1,033	1,033	1,033	1,033	11,41	3,157	0



Reservoir Specifications



Number:

OK

Name:

Cancel

Copy Data From Jgt...

Note: All pipes are currently specified as zero depth

Help

Model | Pipe Depth & Loss Coefficients | Optional | Status

Reservoir Conditions

Liquid Surface Elevation: meters

Surface Pressure: atm

Pipe Specifications

Number: Upstream Junction:
 Name: Downstream Junction:
 Copy Data From Pipe...

Pipe Model | **Fitings & Losses** | Optional | Status

Size
 Pipe Material:
 Pipe Geometry:
 Size:
 Type:
 Inner Diameter:

Length

Friction Model
 Data Set
 Unspecified

 Absolute Roughness:

Pipe Specifications

Number: Upstream Junction:
 Name: Downstream Junction:
 Copy Data From Pipe...

Pipe Model | **Fitings & Losses** | Optional | Status

All Fittings & Losses in Pipe:

	K	Quantity
VALVE Ball, PO=100 (C)	0.06	1

Abbreviations:
 D= Diameter AR= Area Ratio (C)= Crane
 PO= Percent Open deg.= degrees (I)= Idelchik
 (M)= Miller

Total K Factor:

Pump Specifications



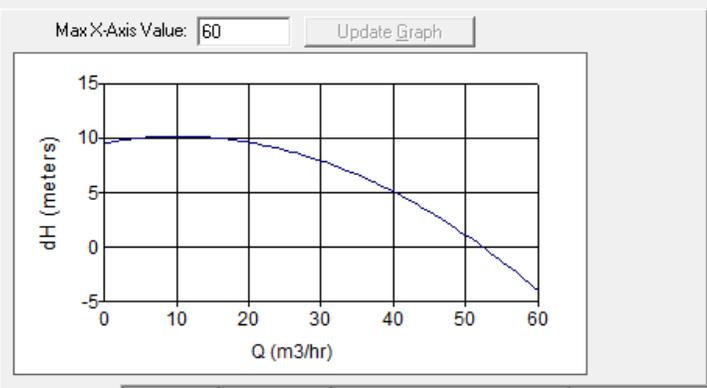
Number:
Name:
Copy Data From Jct...

Upstream Pipe:
Downstream Pipe:

Elevation
Inlet: meters
Outlet: Same as Inlet
NPSH Reference:

Pump Model
 Pump Curve
 Volumetric Flow Rate Fixed
 Mass Flow Rate Fixed
 Head Rise Fixed
 Pressure Rise Fixed

 Impeller Modifications
 Ratio as Percent



Pump Configuration

Flow Parameter

 Volumetric m3/hr
 Mass

Pressure/Head Parameter

 Head meters
 Pressure

Efficiency/Power

 Efficiency Percent
 Power

Pump Data
Configuration Data
Composite Graph
Pump Graph
Efficiency Graph

Raw Data: Optional Data

Data Point	Q (m3/hr)	dH (meters)	NPSHR (meters)	Efficiency (Percent)
1	10	10,2		39
2	15	10		42
3	20	9,6		40
4	25	8,8		38
5	30	8		34
6	35	6,8		43
7	40	5		35
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				

Edit Table ▼

Curve Fitting

Curve Fit Type: Polynomial Curve Fit Order: 2
 Interpolated X:Y Data

Head Rise
 Net Positive Suction Head Required
 Efficiency

Generate Curve Fit Now

$$\Delta H = a + bQ + cQ^2 + dQ^3 + eQ^4$$

PUMP CURVE	
a	9,557142
b	0,1171429
c	-5,714287E-03
NPSH	
None	
EFFICIENCY	
a	40,57143
b	-1,904762E-02

Pipe Specifications

Number: Upstream Junction:
 Name: Downstream Junction:
 Copy Data From Pipe... Copy Previous...

Pipe Model | **Fittings & Losses** | Optional | Status

Size

Pipe Material:
 Pipe Geometry:
 Size:
 Type:
 Inner Diameter:

Length

Friction Model

Data Set: Unspecified
 Absolute Roughness:

Pipe Specifications

Number: Upstream Junction:
 Name: Downstream Junction:
 Copy Data From Pipe... Copy Previous...

Pipe Model | **Fittings & Losses** | Optional | Status

All Fittings & Losses in Pipe:

	K	Quantity
ELBOW/BEND Smooth Flanged, r/D=1, 90 deg. (C)	2,99	8
CHECK VALVE Lift, 90 deg. wall (C)	11,21	1

Abbreviations:
 D= Diameter AR= Area Ratio (C)= Crane
 PD= Percent Open deg.= degrees (I)= Idelchik
 (M)= Miller

Total K Factor:

Reservoir Specifications

Number:

Name:

Copy Data From Jct...

Note: All pipes are currently specified as zero depth

OK
Cancel
Help

Model | Pipe Depth & Loss Coefficients | Optional | Status

Reservoir Conditions

Liquid Surface Elevation: meters

Surface Pressure: atm

Figura A.7 Ventanas del Programa PSIM
Fuente: Programa PSIM

Anexo: 9

Curva característica de la bomba



Pompa RS4 40-16CR 020 154
Pump

Data	17/03/2008
T001/W	
N 1/min	1750

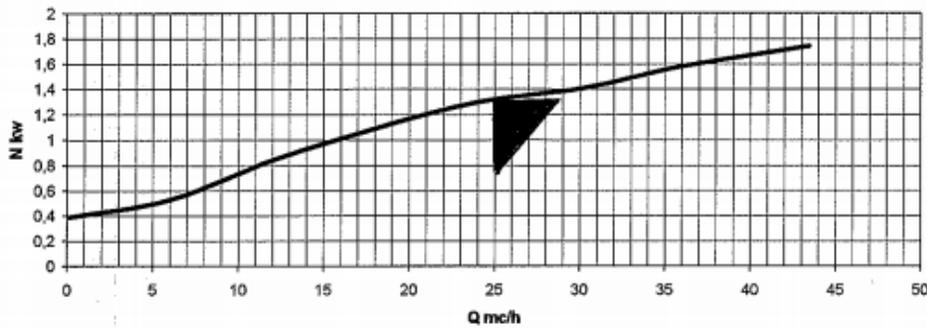
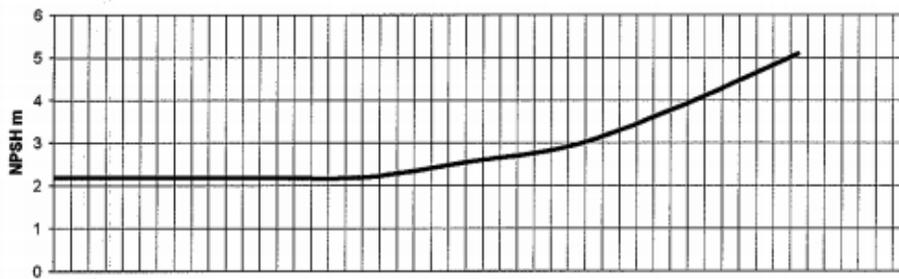
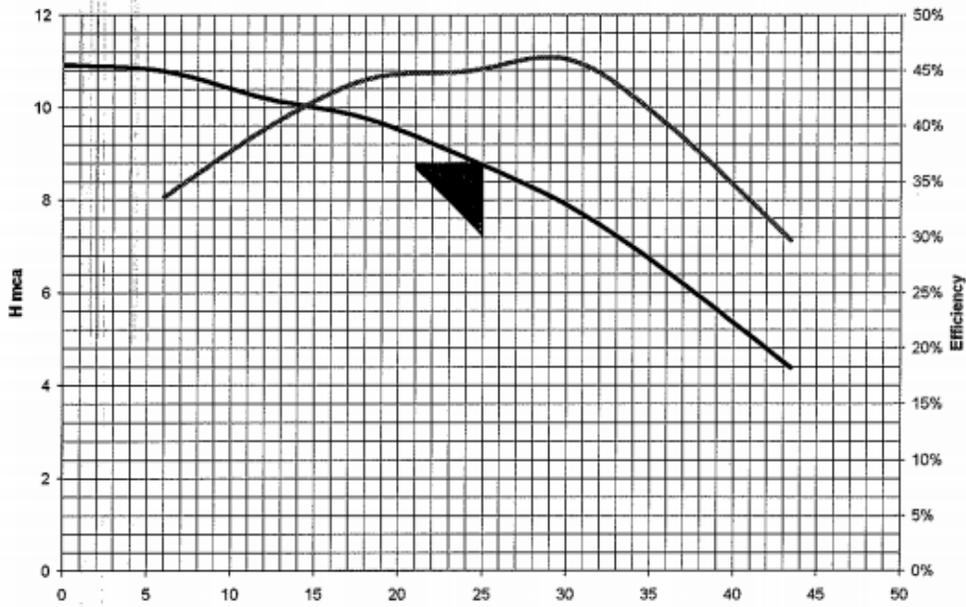
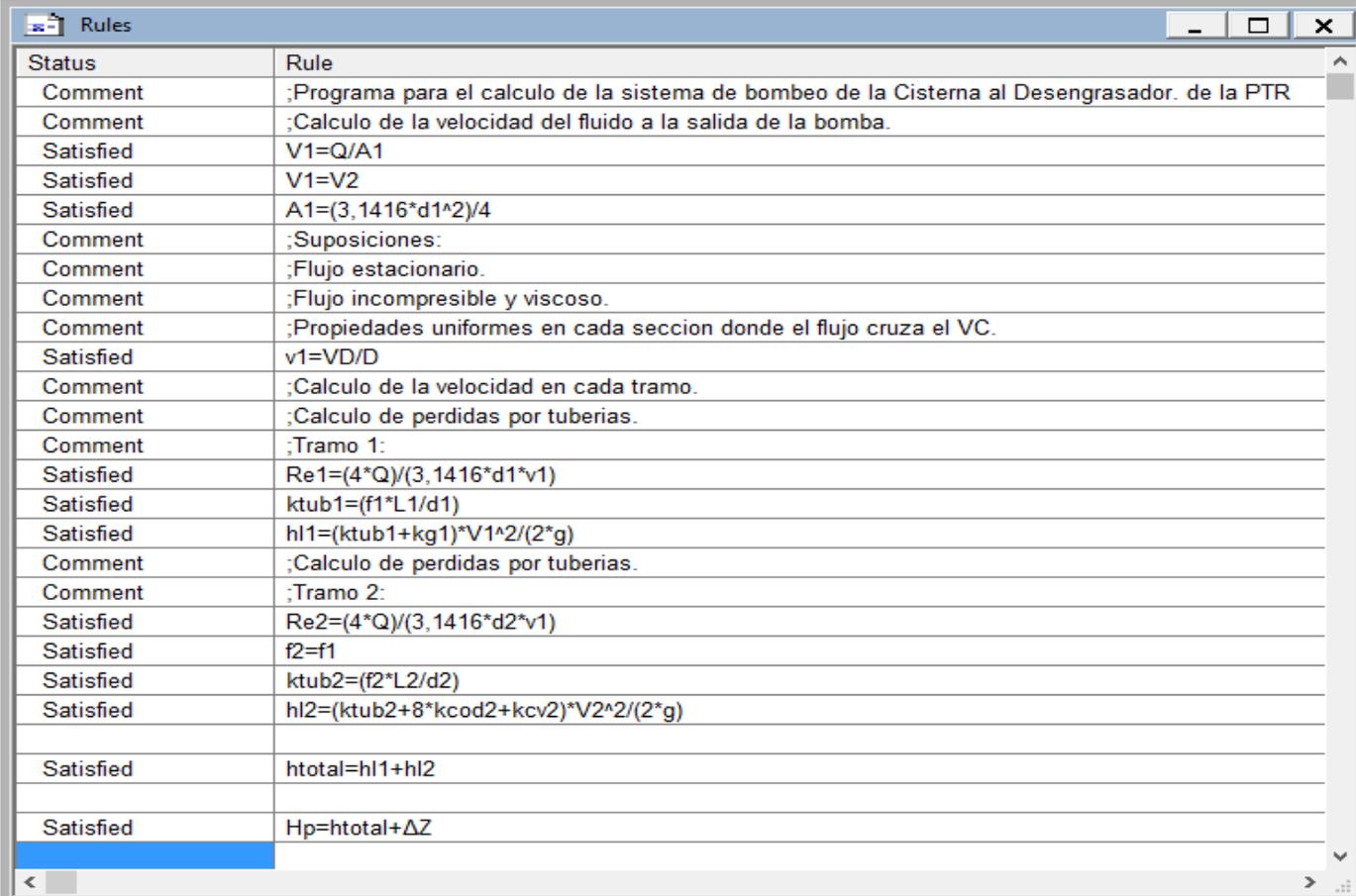


Figura A.8. Curva de la bomba RS4 40-18 CR020 154
Fuente: Manual de la bomba

Anexo: 10

Fórmulas utilizadas por el *Tksolver* mostradas en ventana al inicio del programa.



Status	Rule
Comment	;Programa para el calculo de la sistema de bombeo de la Cisterna al Desengrasador. de la PTR
Comment	;Calculo de la velocidad del fluido a la salida de la bomba.
Satisfied	$V1=Q/A1$
Satisfied	$V1=V2$
Satisfied	$A1=(3,1416*d1^2)/4$
Comment	;Suposiciones:
Comment	;Flujo estacionario.
Comment	;Flujo incompresible y viscoso.
Comment	;Propiedades uniformes en cada seccion donde el flujo cruza el VC.
Satisfied	$v1=VD/D$
Comment	;Calculo de la velocidad en cada tramo.
Comment	;Calculo de perdidas por tuberias.
Comment	;Tramo 1:
Satisfied	$Re1=(4*Q)/(3,1416*d1*v1)$
Satisfied	$ktub1=(f1*L1/d1)$
Satisfied	$hl1=(ktub1+kg1)*V1^2/(2*g)$
Comment	;Calculo de perdidas por tuberias.
Comment	;Tramo 2:
Satisfied	$Re2=(4*Q)/(3,1416*d2*v1)$
Satisfied	$f2=f1$
Satisfied	$ktub2=(f2*L2/d2)$
Satisfied	$hl2=(ktub2+8*kcod2+kcv2)*V2^2/(2*g)$
Satisfied	$htotal=hl1+hl2$
Satisfied	$Hp=htotal+\Delta Z$

Figura A.9. ventana de inicio del *Tksolver* .

Fuente: Programa *Tksolver* .

Anexo: 11

Tabla A.3: Ficha de costo de Productos químicos para la PTR.

MINISTERIO DE FINANZAS Y PRECIOS MINISTERIO DE ECONOMÍA Y PLANIFICACION PLAN 2012			
FICHA PARA PRECIOS Y SU COMPONENTE EN PESOS CONVERTIBLES.			
EMPRESA: E.C.C.MATANZAS		CODIGO:105-0-4904	
Organismo: MINBAS		Plan de Producción: 480 M3/d	Capac. Instalada:240
Producto o Servicio: Recogida de Agua Oleosa		% de utilización de capacidad:	
Código Prod. o Serv.:	UM:M3	Produc. Period. Anterior:	
Concepto de gastos	Fila	Total unitario	De ello : CUC
1	2		4
Materia Prima y Materiales (Ver anexos)	1	5,04	4,69
Materia Prima y materiales fundamentales	1.1	3,39	3,04
Combustibles y lubricantes	1.2		
Energía eléctrica	1.3	1,64	1,64
Agua	1.4	0,01	0,01
Sub total (Gastos de elaboración)	2	2,51	0,00
Otros Gastos directos	3	1,90	0,00
Depreciación	3.1	1,90	
Arrendamiento de equipos	3.2		
Ropa y calzado (trabajadores directos)	3.3		
Gastos de fuerza de trabajo	4	0,44	0,00
Salarios	4.1	0,30	
Vacaciones	4.2	0,03	
Impuesto por la utilización de la Fuerza de trabajo	4.3	0,07	
Contribución a la seguridad Social	4.4	0,04	
Estimulación en pesos convertibles	4.5	0,00	0,00
Gastos indirectos de producción	5	0,17	0,00
Depreciación	5.1		
Mantenimiento y reparación	5.2	0,17	
Gastos generales y de administración	6	0,00	0,00
Combustible y lubricantes	6.1		
Energía eléctrica	6.2		
Depreciación	6.3		
Ropa y Calzado (trabaj. indirectos correspondientes)	6.4		
Alimentos	6.5		
Otros (Ver Anexo)	6.6		
Gastos de Distribución y Ventas	7	0,00	0,00
Combustible y lubricantes	7.1		
Energía eléctrica	7.2		
Depreciación	7.3		
Ropa y Calzado (trabaj. indirectos correspondientes)	7.4		
Otros	7.5		
Gastos Bancarios	8		
Gastos Totales o Costo de producción	9	7,55	4,69
Margen utilidad S/ base autorizada	10	0,38	
PRECIO SEGÚN LO ESTABLECIDO POR EL MFP	11	7,93	
% Sobre el gasto en divisas (aplicado el 10 %)	12		0,47
COMPONENTE TOTAL EN PESOS CONVERTIBLES	13		5,16
Aprobado por: Adelfa M Cáceres Pérez	Firma:	Cargo:Directora Contable Financiera	Fecha:17/08/2012
Aprobado por:	Firma:	Cargo:Unión Cupet	Fecha:17/08/2012
Total a cobrar por M3		MN 2,77	MLC 5,16

Cálculo por 10 toneladas según la ficha de costo
Tarifas según documento recibido de Cupet por 10 toneladas del año 2003

27,71
40,50

51,59
109,50

Fuente:Departamento de Economía (2019)