



**PROPUESTA DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE FILTRACIÓN POR
MEMBRANAS PARA AGUAS OLEOSAS PROVENIENTES DE BUQUES EN
LA INSTALACIÓN PORTUARIA PUERTO PIMSA S.A. MALAMBO,
ATLÁNTICO.**

Jessyca Daniela Ruiz Duarte

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, 7 de noviembre de 2018

**Propuesta de diseño de un sistema de filtración por membranas para aguas oleosas
provenientes de buques en la Instalación Portuaria PUERTO PIMSA S.A. Malambo, Atlántico.**

Jessyca Daniela Ruiz Duarte

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Ambiental

Directora:

Yina Patricia Salamanca Blanco

Línea de Investigación:
Salud ambiental

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia
2018

Nota de Salvedad de Responsabilidad Institucional

La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velara por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia.

Agradecimientos

En primera instancia agradezco a Dios por siempre guiar mi camino durante el desarrollo de este proyecto. Agradezco a mis padres por su apoyo incondicional, esfuerzo y sabios consejos; a mi directora de trabajo de grado la profesora Yina Salamanca por su dedicación y apoyo en la realización de este proyecto y a la Ingeniera ambiental Lucelys Reyes directora de práctica empresarial por sus enseñanzas, tiempo, consejos y dedicación durante el proceso de práctica y desarrollo del trabajo de grado.

Tabla de contenido

1	Resumen.....	5
2	Palabras clave.....	5
3	Abstract	6
4	Keywords	6
5	Introducción	6
6	Planteamiento del problema	8
7	Justificación.....	9
8	Objetivos.....	10
8.1	Objetivo general	10
8.2	Objetivos específicos.....	10
9	Marco de referencia.....	11
9.1	Marco geográfico	11
9.2	Estado del arte	12
9.3	Macó conceptual.....	18
9.4	Marco teórico	25
9.5	Marco normativo	29
9.6	Marco institucional.....	32
9.7	Marco metodológico.....	33
9.7.1	Métodos e instrumentos de investigación	33
9.7.2	Enfoque	34
9.7.3	Alcance.....	34

9.7.4	Método	35
9.7.5	Unidad de análisis	35
9.7.6	Variables e indicadores	36
10	Metodología	36
10.1	Estructura metodológica.....	39
10.1.1	Primera fase.....	39
10.1.2	Segunda fase	39
10.1.3	Tercera fase	40
10.2	Metodología de cálculo y diseño.....	41
11	Cronograma de actividades.....	43
12	Resultados	46
13	Análisis de resultados.....	68
14	Conclusiones	72
15	Recomendaciones	73
16	Bibliografía	73
17	Anexos	79
17.1	Anexo 1	79

Lista de tablas

Tabla 1 Concentración de aceites y grasas en diferentes efluentes industriales	15
Tabla 2 Diferentes métodos químicos y físicos para la eliminación de aguas residuales.....	21
Tabla 3 Normatividad legal aplicable al proyecto	29
Tabla 4 Métodos e instrumentos de investigación	33
Tabla 5 Variables e indicadores	36
Tabla 6 Variables y ecuaciones de diseño	42
Tabla 7 Cronograma de actividades.....	44
Tabla 8 Caracterización de aguas oleosas Motonave Pensilvania	52
Tabla 9 Ventajas y desventajas de membrana vibratoria y cerámica	53
Tabla 10 Tipos de materiales membrana cerámica.....	55
Tabla 11 Tipos de procesos de filtración	56
Tabla 12 Parámetros de diseño para el tanque de decantación	61
Tabla 13 Dimensiones del tanque de decantación	62
Tabla 14 Parámetros de diseño para el sistema de membranas	63
Tabla 15 Dimensiones del sistema.....	64
Tabla 16 Presupuesto del proyecto	67
Tabla 17 Densidades de los componentes de la muestra de agua oleosa.....	70

Lista de ilustraciones

Ilustración 1 Ubicación de Parque Industrial Malambo Pimsa.....	11
Ilustración 2 Ubicación de la instalación portuaria PUERTO PIMSA S.A.....	12
Ilustración 3 Principio de separación por membrana.....	21
Ilustración 4 Procesos de filtración por membranas	24
Ilustración 5 Esquema de clasificación de membranas sintéticas.....	27
Ilustración 6 Organigrama PUERTO PIMSA S.A.....	32
Ilustración 7 Metodología general	38
Ilustración 8 Primera fase levantamiento de información	39
Ilustración 9 Segunda fase análisis comparativo	40
Ilustración 10 Tercera fase cálculos y diseño	41
Ilustración 11 Funcionamiento membrana cerámica	58
Ilustración 12 Tanque de decantación.....	61
Ilustración 13 Sistema de filtración por membranas de cerámica	62
Ilustración 14 Sistema integrado de filtración para aguas oleosas.....	64
Ilustración 15 Contenedor de almacenamiento	65
Ilustración 16 Plano de Instalación Portuaria PUERTO PIMSA S.A.....	66

1 Resumen

A nivel mundial, los problemas de contaminación de la hidrosfera y la atmósfera se deben principalmente a las actividades antrópicas, entre las que cabe destacar el transporte marítimo, en este caso en particular se hace referencia a las aguas oleosas generadas por los buques durante su navegación, funcionamiento, mantenimiento y operación. Los impactos ambientales se ven reflejados en las cinco esferas ambientales, pero se afectan principalmente la hidrosfera y la atmósfera, estos impactos incluyen contaminación de fuentes hídricas, pérdida de la biodiversidad marina, contaminación del aire, mareas negras y afectación las pequeñas economías dependientes de la pesca. Por lo anterior entidades como Organización Internacional Marítima, ha desarrollado estrategias y normatividades aplicables a nivel mundial, en este caso el convenio internacional MARPOL, el cual busca prevenir la contaminación que pueden causar los buques por factores de funcionamiento o accidentales como derrames de aguas oleosas, emisiones de gases contaminantes, vertimientos de aguas sucias (limpieza de bodegas, aguas domésticas), etc. Este convenio da las directrices para una adecuada disposición de las aguas oleosas generadas por buques en tierra, donde obliga a los puertos a tener disponibles servicios (o terceros) de disposición de estos contaminantes.

El objetivo de este proyecto es proponer el diseño de un sistema de filtración por membranas para aguas oleosas provenientes de buques en la Instalación Portuaria PUERTO PIMSA S.A. esto con el fin de contar con una tecnología de tratamiento de aguas oleosas disponible en puerto y así evitar contrataciones de empresas que presten el servicio de disposición final de los residuos.

Para el desarrollo de este proyecto se llevó a cabo una revisión bibliográfica de los diferentes tipos de membranas que pueden ser adecuadas para el proceso de filtración de aguas oleosas, y de los diferentes materiales de las membranas para dicho proceso. Utilizando los resultados de la caracterización del agua oleosa proveniente de la Motonave Pensilvania, Se propone utilizar una membrana de cerámica de alúmina para el proceso de filtración de las aguas oleosas y con base en este tipo de membrana se diseñó el sistema de filtración más adecuado.

2 Palabras clave

Aguas oleosas, filtración, contaminación, hidrosfera, atmósfera

3 Abstract

On the global level, the problems with contamination of hydrosphere and atmosphere can be traced to anthropogenic causes, of which maritime transport is to be highlighted, in this case particularly the oily waters that ships produce during their operation and maintenance.

The impacts of this are reflected in all of the five environmental spheres, but specifically in the hydrosphere and the atmosphere, these impacts include contamination of water sources, loss of maritime biodiversity, air pollution, oil slicks and the livelihood of small fisheries. Because of this, entities like the International Maritime Organization have developed strategies and regulations that are to be applied on a global level, in this case the international agreement MARPOL, which seeks to prevent the type of contamination that ships cause through operation or accidents, like oily water, pollutant gas emissions, waste water (either created by maintenance or waste water disposal), etc. This agreement forces harbours to provide services for water disposal either directly or by third parties.

The objective of this project is to propose the implementation of filtration systems with membranes for oily waters produced by vessels at the port facility PUERTO PIMSA S.A, with the aim of providing this service directly at the facility without the need of third party waste water removal.

Developing this project, a bibliographic revision was conducted, taking into account the different types and materials of membranes that may be suitable for oily water processing. Using the results of the water characterization from the vessel Motonave Pensilvania, it is proposed to use an aluminium ceramic membrane for processing the oily water being produced and based on this type of membrane, the most suitable system was designed.

4 Keywords

Oily water, filtration, pollution, hydrosphere, atmosphere.

5 Introducción

El transporte marítimo a nivel mundial es una actividad que genera contaminación debido a la producción de grandes volúmenes de aguas residuales con contenido de hidrocarburos, teniendo en cuenta que solo la presencia de diferentes tipos de hidrocarburos resulta ser una amenaza para el agua, los ecosistemas la salud humana y el planeta en general.

El planeta tierra está compuesto de cinco esferas que interactúan entre sí e intercambian materia y energía, estas esferas son la hidrosfera se compone del agua de la tierra, atmósfera se compone del aire, geosfera es la parte sólida de la tierra, la biosfera se compone de los organismos vivos de la tierra y la antropósfera que es la parte de la tierra habitada y construida por los humanos (Manahan, 2014) en la

cual se desarrollan actividades antrópicas que afectan de manera directa estos componentes del sistema tierra, en este caso el transporte marítimo y navegación de buques genera aguas oleosas las cuales de no ser tratadas y manejadas adecuadamente pueden causar daños irreversibles al ambiente y a la salud humana.

Todas las esferas del planeta tierra son de gran importancia debido a su interacción entre sí, a través de la atmósfera y la hidrosfera, se generan los fenómenos meteorológicos de interés en geología, como la lluvia, las condiciones climáticas y la alteración de las rocas o meteorización y a través del ciclo hidrológico, el agua cumple un papel múltiple en diferentes procesos geológicos, como la alteración de las rocas, la erosión por las corrientes, respectivamente.

Estas capas de la tierra son muy susceptibles a sufrir alteraciones y daños causados por la presencia de contaminantes en sus componentes (agua y aire), esta contaminación puede llegar al mar por derrames accidentales de hidrocarburos, vertidos ilegales de aguas oleosas o accidentes marítimos (Song A. N., 2010), los cuales causan grandes impactos ambientales a la hidrosfera como mareas negras, disminución de la biodiversidad de fauna y flora, presencia de hidrocarburos en la fauna acuática (bioacumulación) y pérdidas económicas en mercados dependientes de la pesca; en la atmósfera la presencia de cualquier contaminante que altere las condiciones fisicoquímicas del medio, tales como metales pesados y gases generados por hidrocarburos. El movimiento y almacenamiento de las aguas oleosas generadas por los buques, emanan gases que contienen componentes tóxicos como NO_x , SO_x , CO_2 , metano y otros gases que se liberan a la atmósfera destruyendo la capa de ozono e inclusive contribuyendo al calentamiento global y efecto invernadero.

El tratamiento de las aguas oleosas se puede hacer por medio de diferentes métodos basadas en el principio de separación agua aceite, durante los últimos años se han desarrollado procesos de separación, tratamiento y disposición de estos residuos, con el fin de atender a la necesidad de la disposición de ellos para no contaminar el ambiente. Una de las tecnologías empleadas actualmente es la filtración por membranas, este método consiste en una membrana que actúa como un filtro muy específico que deja pasar el agua, mientras que retiene los sólidos suspendidos y otras sustancias.

Actualmente, los puertos en Colombia no cuentan con un tratamiento propio para el manejo de las agua oleosas de los buques, tercerizando la actividad con empresas especializadas solamente en el tratamiento de recuperación a través de métodos convencionales como son la separación física y la evaporación, por esta razón en los puertos y navieras surge la necesidad de hacer un tratamiento y disposición eficientes de los residuos líquidos oleosos, un ejemplo claro de esta situación es PUERTO PIMSA S.A., ya que debe recibir y contratar a terceros que realicen una adecuada disposición de los residuos debido a su peligrosidad y las afectaciones que trae para el ambiente en general por lo que se adopta a nivel nacional el Convenio Internacional MARPOL de 1978.

El Convenio MARPOL busca prevenir la contaminación por los buques al medio marino, donde se establecen reglas y normas ambientales de prevención y control de las diversas fuentes de contaminación

provenientes de barcos como contaminación por hidrocarburos, transportes de sustancias peligrosas, manejo de aguas residuales entre otras.

A lo largo de los años el convenio internacional MARPOL ha tenido varias modificaciones y versiones, la última edición fue en el 2017, esta es una edición consolidada que tiene como objetivo proporcionar una referencia fácil y completa de todas las disposiciones actualizadas e interpretaciones unificadas de los artículos, protocolos y anexos del convenio internacional MARPOL.

PUERTO PIMSA S.A., ubicado en el municipio de Malambo, realiza actividades de cargue, descargue y almacenamiento de carga provenientes de actividades de importación y exportación de mercancías vía marítima. Durante las actividades de operación en el puerto se reciben buques que necesitan hacer la disposición de los residuos líquidos oleosos generados por la operación interna, mantenimiento, funcionamiento y navegación del buque, para la cual requieren empresas externas prestadoras de servicio de recolección y disposición final de estos residuos.

Las empresas que realizan la disposición final se encuentran en Barranquilla a 17 km de PUERTO PIMSA S.A, lo que supone que haya más desplazamiento del transporte (carrotaques) generando emisiones atmosféricas emanadas por las aguas oleosas. De esta manera se propone como objetivo principal de este proyecto proponer el diseño de un sistema de filtración por membranas para aguas oleosas provenientes de los buques que arriban a la Instalación Portuaria PUERTO PIMSA S.A.

6 Planteamiento del problema

PUERTO PIMSA S.A. se encuentra ubicado en el municipio de Malambo en el Atlántico dentro del Parque Industrial Malambo Pimsa-PIMSA, a 17 km de la ciudad de Barranquilla. El municipio Malambo no cuenta con empresas de servicios de recolección y disposición final de aguas oleosas, por este motivo la disposición de estas aguas descargadas por los buques en el muelle, debe realizarse a través de las empresas autorizadas que se encuentran en el casco urbano de la ciudad de Barranquilla.

Actualmente, las empresas que hacen este tipo de disposición son RECITRAC S.A.S., Triple A, Ecosol, Ecogreen, entre otras, todas con permisos ambientales para la realización del transporte, manejo y disposición final de los residuos líquidos de buques, por lo que el trayecto entre el Puerto y la Planta de disposición supone un alto costo en comparación a los Puertos que se encuentran en la ciudad de Barranquilla, como son Portmagdalena, Sociedad Portuaria de Barranquilla, Sociedad Portuaria Bitco, Riverport, Compas entre otros, dejando en desventaja a PUERTO PIMSA S.A. por su ubicación.

De igual manera, el transporte genera un problema latente sobre el aire, agua y suelo, ya que el transporte de aguas oleosas genera gases (liberados naturalmente por combustibles) que son emitidos al ser transportados en vehículos tipo cisternas, adicionalmente se tienen los problemas de gases emitidos por los vehículos transportadores (CO_2 , SO_x , NO_x) al realizar su trayecto hacia y desde la planta de tratamiento.

Por otra parte, las empresas encargadas de la disposición final utilizan métodos convencionales y con reducida tecnología para el tratamiento de las aguas oleosas, el cual consiste principalmente en la separación física de aceite y agua, reutilizando el residuo aceitoso en procesos que no requieren combustible de alta calidad como en el caso de las calderas, las cuales son utilizadas para la generación de energía, por empresas como QBS (Quality Bunkers Supply) ubicada dentro del Parque Industrial Malambo Pimsa.

La propuesta de diseño de un sistema de filtración por membranas para aguas oleosas provenientes de buques en la Instalación Portuaria PUERTO PIMSA S.A. busca eliminar el transporte por carrotanques tipo cisternas desde el lugar de generación hasta la planta de tratamiento y mejorar los procesos actuales reduciendo el tiempo de tratamiento en términos de la cantidad de procesos realizados para disposición final de las aguas oleosas.

7 Justificación

Según la UNESCO el Desarrollo Sostenible *“Está en manos de la humanidad asegurar que el desarrollo sea sostenible, es decir, asegurar que satisfaga las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias”* (Moreda, 2014). Este concepto tiene una de las bases sobre la cual se sustenta el Desarrollo Sostenibles es *“Reorientar la tecnología y el manejo de riesgos”*, la cual plantea que las tecnologías a utilizar se deben enfatizar en reducir el consumo material y energético, la emisión de residuos nocivos al ambiente y las condiciones de trabajo propensas a generar riesgos para la salud humana y el ecosistema o daños irreversibles en los recursos naturales (Moreda, 2014).

El desarrollo sostenible tiene 17 objetivos conocidos como objetivos mundiales enfocados en la adopción de medidas para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que todas las personas gocen de paz y prosperidad. La temática tratada en el presente trabajo está relacionada con el objetivo 14 de desarrollo sostenible: vida marina, el cual tiene como fin generar un marco para ordenar y proteger de manera sostenible los ecosistemas marinos y costas de la contaminación, además tiene como metas a corto plazo prevenir y reducir significativamente la contaminación marina de todo tipo, utilizar la investigación y los avances tecnológicos como herramientas para la protección del medio marino,

aumentar los conocimientos científicos relacionados con contaminación marina, desarrollar la capacidad de investigación y transferir tecnología marina, lo cual es uno de los más importantes debido a que la tecnología de filtración por membranas de aguas oleosas es una alternativa sostenible para su tratamiento evitando el incremento de contaminantes como hidrocarburos en los océanos, que afectan la calidad del agua marina, los ecosistemas, la fauna marina y sobre todo la economía basada en la pesca.

Por lo anterior, este proyecto se realiza con dos fines principales enfocados en la parte ambiental y social del municipio de Malambo, Atlántico. En el aspecto ambiental el proyecto está enfocado en el uso de tecnologías limpias y eficientes para el tratamiento de las aguas oleosas generadas por los buques ya que estos representan un riesgo y una amenaza para la hidrosfera, la atmósfera y la salud humana debido a su contenido de aceites e hidrocarburos. Con respecto a la calidad del aire, el sistema de tratamiento estará disponible en el puerto lo cual hace que se elimine el uso de carrotanques para el transporte de las aguas oleosas dentro del Parque Industrial Malambo y hacia las empresas que tratan estos residuos, lo cual contribuirá a mejorar la calidad del aire. Con respecto a la parte social, el proyecto contribuirá a mejorar la salud y calidad de vida de los habitantes de Malambo, pues el sistema de filtración al encontrarse dentro del Puerto hará que no se requiera del transporte de las aguas en vehículos, reduciendo el tráfico y cantidad de material particulado por este tipo de vehículo, se debe tener en cuenta que Malambo se encuentra en la vía de acceso a PIMSA (Parque Industrial Malambo Pimsa).

8 Objetivos

8.1 Objetivo general

Proponer el diseño de un sistema de filtración por membranas para aguas oleosas provenientes de buques en la Instalación Portuaria PUERTO PIMSA S.A. Malambo, Atlántico.

8.2 Objetivos específicos

- Identificar los tipos de membranas más adecuados para la filtración de aguas oleosas generadas por buques.
- Definir el tipo de membrana que será utilizado en el sistema de filtración para aguas oleosas provenientes de buques en la Instalación Portuaria PUERTO PIMSA S.A.
- Diseñar el sistema de filtración por membranas para aguas oleosas para PUERTO PIMSA S.A.

9 Marco de referencia

9.1 Marco geográfico

El Parque Industrial Malambo S.A. se encuentra localizado en el Área Metropolitana de Barranquilla, Colombia en las coordenadas 10° 50' 10.65" N 74° 44' 49,19"E a 5 km del Aeropuerto Internacional Ernesto Cortissoz, contiguo a las poblaciones de Malambo y Soledad por el Norte, y a Sabanagrande y Santo Tomás por el Sur. Su localización cuenta con tres vías de transporte Vía de la Red Nacional de Carreteras, Aeropuerto Internacional y Puerto sobre el Río Magdalena y Mar Caribe, las cuales facilitan la eficiencia de la cadena logística de las empresas (PIMSA, 2014).

El Parque Industrial Malambo S.A. -PIMSA- es un condominio industrial privado que cuenta con una completa infraestructura de servicios, orientados a garantizar reducciones en los costos a las empresas que se ubiquen en sus instalaciones. Fue el primer Parque Industrial autorizado en Colombia, mediante la resolución No. 631 de 1980, bajo los lineamientos del Decreto 2143 emitido por el Ministerio de Desarrollo en 1979, el cual creó los Parques Industriales (PIMSA, 2014).

Dentro del Parque industrial Malambo Pimsa se encuentra PUERTO PIMSA S.A. además de 35 empresas del sector industrial y productivo a nivel nacional algunas son: AJE, Colanta, SOMEX, Colombina, ACESCO, ACEROS CORTADOS, ALMASA, ÉXITO, Aceros Ferrasa, PIZANO S.A, entre otras (PIMSA, 2014). En la siguiente imagen se muestra la ubicación geográfica del Parque Industrial Malambo.



Ilustración 1 Ubicación de Parque Industrial Malambo Pimsa

Fuente Google Earth

La Empresa PUERTO PIMSA S.A. está localizada en el municipio de Malambo en el departamento del Atlántico, en el kilómetro tres vía Malambo-Sabanagrande, como se puede apreciar en la siguiente fotografía aérea (PIMSA P. , 2018).

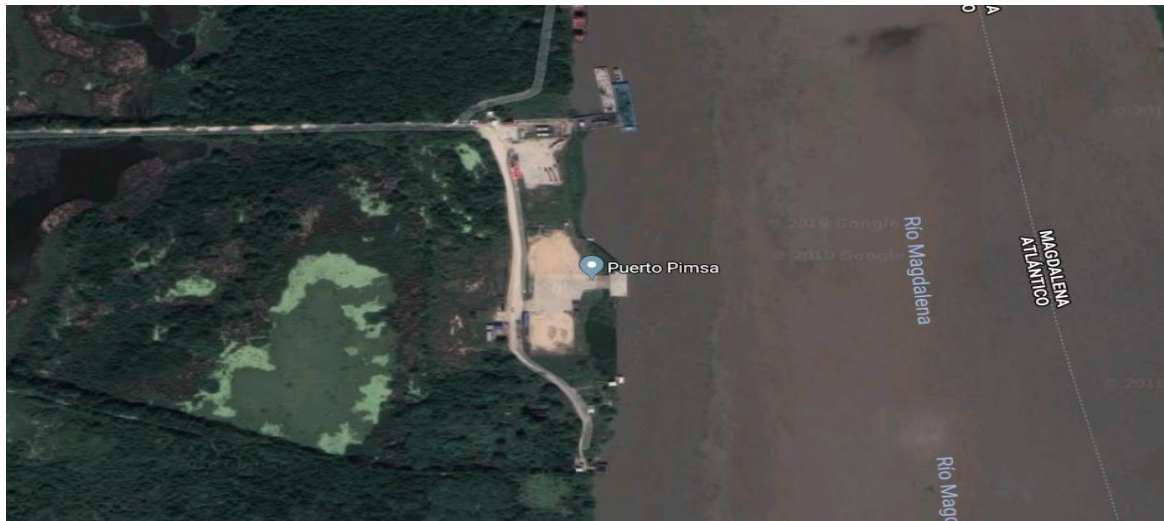


Ilustración 2 Ubicación de la instalación portuaria PUERTO PIMSA S.A.

Fuente Google Earth

La Sociedad PUERTO PIMSA S.A. es una empresa que se dedica a la operación de muelles fluviales y marítimos, el manejo de carga de importación y exportación, el desarrollo de actividades de cargue y descargue de toda clase de bienes ya sea a granel o en contenedores de todo tipo (PIMSA P. , 2018). Los servicios de puerto privado les permiten a los usuarios del parque industrial manejar sus mercancías de importación y exportación directamente en el muelle (PIMSA P. , 2018).

9.2 Estado del arte

Para realizar esta propuesta se consultó bibliografía referente al tema central de investigación que es la contaminación de la hidrosfera y atmósfera por la presencia de aguas oleosas generadas en las operaciones de los buques y filtración por membranas, la bibliografía consultada fundamenta la propuesta de este proyecto.

El Sistema de la Tierra se compone de todas las partes del planeta Tierra, estas se compone de cinco esferas las cuales interactúan entre sí e intercambian materia y energía, las esferas ambientales son hidrosfera, atmósfera, geosfera, biosfera y antropósfera, la interacción permite el desarrollo de los ciclos biogeoquímicos los cuales abarcan procesos físicos, reacciones químicas, y procesos bioquímicos (Manahan, Química Ambiental Principios Básicos de Química Ambiental en Español, 2014), por ende la alteración o contaminación de alguna de estas esferas ambientales trae grandes efectos negativos para el ambiente y la salud humana. En este caso en específico la contaminación de las esferas está asociada a las actividades marítimas y portuarias, enfocada en las aguas oleosas generadas por los buques durante su navegación, mantenimiento, operación interna y funcionamiento.

El artículo “Una comparación de Métodos del Tratamiento Convencionales y los de VSEP, un Sistema de filtración por Membranas Vibratorias” publicado por la revista *New Logic Research* en el año 2006, describe los principales usos que se le da a la tecnología de membranas vibratorias estos son tratamiento de aguas superficiales, obtención de agua de alta pureza, tratamiento de aguas residuales rechazadas de otros sistemas y filtración de agua subterránea, a partir de lo anterior el artículo debate los resultados de la prueba piloto de VSEP (membranas vibratorias) y hace comparaciones entre el uso de una membrana vibratoria y otros métodos de eliminación y rechazo de salmuera, empleados actualmente. Dentro del documento se menciona la eliminación de contaminantes en el agua entre ellos cromo (Cr^{3+}), arsénico (As^{5+}), cianuro (CN^-), selenio (Se^{4+}) y uranio (U^{3+}), los cuales están presentes en el agua a tratar con las membranas vibratorias (Greg Johnson, 2006)

El documento explica los tipos de membranas que existen, basados en el tamaño de poro o las características rechazadas de las partículas. La Microfiltración (MF) es medio más abierto, con poros de tamaños de $0.1\ \mu\text{m}$ y más grande, la Membranas de Ultrafiltración (UF) tienen poros que van en tamaño de $0.005\ \mu\text{m}$ a $0.1\ \mu\text{m}$. Estos son valorados según el mínimo peso molecular y tamaño que la membrana rechazará, la Membranas de Nanofiltración (NF) y de Ósmosis Inversa (OI) no tienen poros como tal y trabajan por difusión (Greg Johnson, 2006)

Las ventajas del uso de las membranas vibratorias se basan principalmente en la efectividad de su proceso, debido a que los sólidos suspendidos se mantienen en suspensión flotando encima de la membrana, como una capa paralela, donde pueden ser arrastrados por la corriente por un suave flujo tangencial. Otra ventaja de gran importancia está relacionado con las incrustaciones, pues este sistema inhibe la formación de incrustaciones y cristales debido a la constante vibración de la membrana (Greg Johnson, 2006)

En conclusión el sistema de membranas vibratorias es más eficiente en comparación con métodos convencionales de filtración debido a las tecnologías de vibración de la membrana en el proceso de filtración y se demuestra en la eliminación de salmuera en el agua en este caso particular, además en términos económico es más rentable debido a su costo de operación y tamaño general del sistema, pues los sistemas de gran tamaño requieren de un mayor consumo energía espacio (Greg Johnson, 2006).

El artículo científico “*Aplicación de la tecnología de membranas en el tratamiento de algunos residuos líquidos altamente peligrosos*” publicado en el año 2010 por la revista *Tecnología en Marcha de Costa Rica*, explica la efectividad y rentabilidad que tiene el método de filtración por membranas para aguas con componentes peligrosos como hidrocarburos y derivados. Los sistemas de filtración por membranas permiten la separación de especies contaminantes de las partículas en tamaño iónico y molecular donde se hace referencia a que el líquido que se desecha al final tiene concentraciones de todos los solutos iónicos (solución compuesta por cationes y aniones) mucho menores que las que puede alcanzar el método convencional, se ha demostrado que su uso es bastante eficiente en industrias que generan residuos peligrosos con alto contenido de grasas y aceites como industria mecánica, alimentaria, siderúrgica, naviera, petroquímica, entre otras que se caracterizan por la generación de residuos líquidos oleosos. Las concentraciones de grasas y aceites de estas industrias pueden variar desde 50 a 40000 mg/L dependiendo de su actividad y operación (Guillermo Calvo Brenes, 2010).

La filtración por membranas es una tecnología basada en la presión y el tamaño de las partículas a filtrar, por lo tanto el tamaño de los poros de las membranas varía al igual que el peso de los sólidos suspendidos en la mezcla agua aceite, este puede estar entre 100 y 5 μm (Guillermo Calvo Brenes, 2010). Las tecnologías que se incluyen para la filtración son: ósmosis inversa, nanofiltración, ultrafiltración y microfiltración las cuales se emplea de acuerdo a la clase de contaminantes, concentración, condiciones ambientales y volúmenes a disponer del residuo.

La metodología empleada se basó en la comparación de métodos convencionales de separación y la filtración por membranas, como principales resultados se obtuvo que la filtración por membranas es un método muy eficiente en términos de tiempo de separación, costos de operación y reducción de contaminantes en el agua a tratar, esto comparado con los métodos convencionales, ya que la filtración por membranas puede tener una eficiencia hasta de 96% (Guillermo Calvo Brenes, 2010).

Otro tipo de membranas muy utilizadas en la filtración para las aguas oleosas son las membranas de cerámica, ya que este es un material que incrementa la eficiencia de la filtración como lo demuestra el artículo científico “*Filtración cerámica para el tratamiento y reutilización de aguas aceitosas de origen industrial*” publicado por la revista *TecnoAqua*, publicado en el año 2013 fue llevado a cabo en Brasil.

Las grasas y aceites son contaminantes muy complejos para su tratamiento y disposición final debido a que están categorizados como residuos peligrosos y por sus características de densidad, viscosidad y contenido de hidrocarburos esto hace que los sistemas de filtración convencionales sean costosos e ineficientes para este tipo de aguas. Las grasas y aceites generalmente provienen de diferentes actividades industriales como: extracción de petróleo o gas, refinado de petróleo, industria metalmeccánica, industria naval, procesamiento de alimentos e industria de curtido, de acuerdo a la procedencia estas aguas cuentan con diferentes características, concentración y componentes de aceites hidrocarburos, en la siguiente tabla se muestra concentración aproximada de aceites y grasas en mg/L que pueden contener este tipo de aguas (Sempere, 2013).

Tabla 1 Concentración de aceites y grasas en diferentes efluentes industriales

Actividad Industrial	Tipología de agua residual	Aceites y grasa (mg/L)
Extracción de petróleo /gas	Agua producida	50 - 5000
Refina de petróleo	Aguas de lavado de tanques y otras etapas del proceso	20 - 3000
Industria metalmecánica	Fluidos de corte	2000 -40000
	Baños de desengrase	1000 -5000
Industria naval	Aguas de sentina	500 - 15000
Procesado de alimentos	Efluentes de industria conservera, láctea, aceites vegetales Elaboración de piensos	500 - 14000
Industria de curtido	Efluentes de los procesos de piles y curtido	500 - 40000

Fuente (Sempere, 2013).

En la tabla 1, se tiene en cuenta la concentración de grasas y aceites con contenido de 500 a 15 000 mg/L, que corresponden a la actividad en una industria naval la cual está asociada a la generación de aguas oleosas principalmente por la operación, funcionamiento y mantenimiento de los buques.

La ultrafiltración cerámica es una tecnología altamente eficiente en la eliminación de aceite y grasas en aguas residuales industriales, ya que las membranas cerámicas se caracterizan por su elevada hidrofiliidad (propiedad física de afinidad con el agua), atrayendo el agua y rechazando el aceite. Este comportamiento tiene como resultado óptimos rendimientos de la filtración con altas calidades del efluente (Sempere, 2013).

La metodología empleada en este artículo fue a partir de una planta piloto constituida por un módulo de ultrafiltración con membranas de cerámica tubulares altamente hidrofílicas, donde se realizó la filtración de agua oleosa, se utilizó un flujo tangencial cruzado y una temperatura de 45°C. Como resultados se obtuvo que la ultrafiltración con membranas de cerámica altamente hidrofílicas es un potencial interesante para la filtración y tratamiento de aguas aceitosas, dando como resultado favorable el proceso de filtración, además de una larga duración y vida útil de las membranas de cerámica (Sempere, 2013).

Dentro del contexto nacional el “Perfil toxicológico de los sedimentos del río Magdalena” realizado por la Universidad Internacional de Andalucía y publicado en el 2016, se determinó la presencia de hidrocarburos y metales pesados, esto se realizó en puntos aleatorios a lo largo del río Magdalena, en Barranquilla el punto se ubicó en el puente Pumarejo en las coordenadas 10°59'16" N y 74°47'20" E, de la muestra de sedimentos del río Magdalena tomada se analizaron tres parámetros: pH, metales e hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAPs), dentro de la metodología se calculó el coeficiente del riesgo ecológico potencial de cada metal y el coeficiente de toxicidad de cada metal y se obtuvo del punto analizado en Barranquilla los siguientes resultados, riesgo ecológico potencial de cadmio arrojó como resultado 404 que indica extremadamente contaminante y en general el Índice de Riesgo Ecológico Potencial dio como resultado un valor de 528, lo cual refleja un ambiente extremadamente contaminado (Verbel, 2016).

La presencia de estos contaminantes en los sedimentos y agua de este punto del río Magdalena están asociados a vertimientos industriales y tráfico fluvial, estas actividades generan contaminación y degradación del estado natural del agua del río Magdalena. Por lo anterior es importante contar con tecnologías eficientes de tratamiento de aguas oleosas generadas por barcos que navegan en el río Magdalena.

El “Caso de estudio: Utilización de Membranas vibrantes para tratar las aguas residuales aceitosas desde instalación desechos” publicado por la revista *New Logic Research* en el año 2016, confirma que la implementación del sistema de membranas en una empresa para la separación de aguas oleosas incrementa la eficiencia en los procesos y se obtiene un producto oleoso para su aprovechamiento como materia prima para procesos en los que se requieran como el caso de las calderas. Además, hace una comparación entre los métodos convencionales de separación el sistema de membranas vibratorias demostrando que estas membranas en la filtración aumenta la eficiencia en los procesos de separación de aguas oleosas hasta obtener un 96% (Farnham, 2016).

La comparación realizada entre los sistemas convencionales de separación como centrifugación, filtro al vacío en tambor rotatorio, flotación de aire disuelto, placa clarificadora en pendiente, tratamiento biológico, evaporadores y separación por gravedad y el sistema de separación membranas vibratorias demuestra que es el método con más bajo costo de operación de equipos en el mercado. Muestra también cuáles son los porcentajes de recuperación de cada uno de los métodos en este caso las membranas vibratorias tienen un resultado de 80 a 90% de recuperación de agua en el proceso de separación (Farnham, 2016).

La temperatura juega un papel importante en el funcionamiento de la membrana durante el proceso de separación, pues es un factor que puede incrementar el rendimiento del proceso, las temperaturas varían entre 25°C a 50°C, el cual funciona basándose en que cuanto más alta la temperatura más baja la viscosidad de la mezcla y más rápido fluye por la membrana. El sistema de membranas VSEP (Vibratory Shear Enhanced Processing) está diseñado para soportar temperaturas hasta de 120°C, disminuyendo hasta un 98% el volumen de aguas aceitosas de la mezcla (Farnham, 2016).

En conclusión el artículo muestra que el sistema más eficiente para tratar aguas oleosas es el sistema de sistema de filtración por membranas vibratorias en comparación con los demás métodos analizados en este estudio debido a su bajo costo de operación, su resistencia a altas temperaturas y su eficiencia de remoción de aceite en una mezcla oleosa.

El artículo “*Toxicity of treated bilge water: The need for revised regulatory control*” publicado por la revista *Marine Pollution Bulletin*” en el año 2017 tiene como objetivo analizar la composición química, la toxicidad y los efectos en el ecosistema marino de las aguas oleosas generadas por buques. El estudio realizó un muestreo de agua oleosas a siete buques diferentes, donde se tomaron muestras y se determinó que los principales componentes son combustible, aceites hidráulicos, aceites lubricantes, compuestos orgánicos volátiles, metales, detergentes, desengrasantes y otros productos químicos derivados de las actividades a bordo de un buque, la composición química del agua oleosa vario en cada buque con respecto a las concentraciones y tipos de hidrocarburos encontrados en cada una de las muestras analizadas, pues cada uno de ellos está diseñado para hacer actividades diferentes, las cuales implican compuestos y cantidades diferentes en las aguas oleosas. Las muestras fueron tomadas antes y después de que el agua oleosa pasará por los sistemas de separación de aceite que los buques tienen (Magnusson, 2017).

El estudio está sujeto a la normatividad MARPOL que indica que un barco puede verter aguas de oleosas al mar solo con una concentración de hidrocarburos de menos de 15 ppm y a una distancia mayor a 12 millas náuticas de la tierra, por lo que se encontró que los separadores de aceites internos de los buques no tiene la capacidad de bajar la concentración de hidrocarburos a la mezcla, para poder ser desechada al mar (Magnusson, 2017). Lo que requiere hacer una disposición final de los residuos líquidos oleosos generados por los buques cuando se encuentran en los puertos, ya sea por los mismos puertos a través de empresas que presten el servicio de disposición final.

Con respecto a la toxicidad y los efectos ecológicos de las aguas oleosas para el medio marino el estudio determinó que estas aguas son tóxicas debido a la concentración de metales pesado como Cromo (Cr), magnesio (Mn), Cobalto (Co), Níquel (Ni), cobre (Cu), Arsénico (As), Azufre (S), Cadmio (Cd), Plomo (Pb). Entre los metales mencionados las concentraciones variaron entre el 4.3% y 53% del contenido total de la muestra de agua, dentro de la metodología se hizo una prueba con animales vivos (peces pequeños), los cuales fueron sumergidos en una cantidad determinada de aguas oleosas al 10% de concentración y un factor de exposición de 48 horas, todos los animales murieron, lo que confirma la alta toxicidad el agua para la fauna y microfauna marina (Magnusson, 2017).

9.3 Maco conceptual

El Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques (MARPOL) de 1973 es el principal convenio internacional, que versa sobre la prevención de la contaminación del medio marino por los buques a causa de factores de funcionamiento o accidentales. En el Convenio se establecen reglas encaminadas a prevenir y reducir al mínimo la contaminación ocasionada por los buques, tanto accidental como procedente de las operaciones normales. Actualmente incluye seis anexos técnicos; en la mayoría de ellos figuran zonas especiales en las cuales se realizan controles estrictos respecto de las descargas operacionales (OMI, 2016).

Se denominan residuos oleosos o residuos MARPOL a todos aquellos residuos generados durante el servicio de los buques, así como en sus operaciones de mantenimiento y limpieza, incluidas las aguas residuales de los distintos cargamentos. Esta denominación procede del convenio MARPOL, conjunto de normas internacionales para la prevención de la contaminación marina por los buques, por causas operativas o accidentales (Asturias, 2014)

En general las aguas oleosas se clasifican en cuatro grupos diferentes de acuerdo a su estructura química, estos grupos son alifáticos, aromáticos, compuestos que contienen nitrógeno (N_2), azufre (S) y oxígeno (O_2) y asfáltenos. Estas sustancias son tóxicas y peligrosas debido a que los compuestos químicos alteran el estado natural del medio y cuando entran en contacto con el agua la contaminan y por ende se contamina la fauna y la flora del cuerpo de agua (Padaki, 2015).

Las aguas oleosas generadas por los buques pueden ser de tres tipos:

- **Tipo A:** residuos de petróleo crudo y agua de lastre contaminada con petróleo crudo.
- **Tipo B:** residuos de hidrocarburos y agua de lastre contaminada con productos petrolíferos distintos del petróleo crudo y con densidad menor o igual a uno.
- **Tipo C:** residuos de sentinas de cámara de máquinas o de equipos de depuración de combustible y aceites de motores (Pantoja, 2007).

Los residuos de Tipo C o aguas oleosas son los que generan todos los buques durante las operaciones y funcionamiento, estos son recogidos por las empresas autorizadas en los puertos para realizar el debido tratamiento el tipo de agua es reconocida por los componentes y características (Pantoja, 2007). En PUERTO PIMSA S.A. la empresa que realiza el servicio de recolección y tratamiento es RECITRAC S.A.S la cual es de carácter privado, cuenta con servicios e instalaciones para el transporte, recolección, tratamiento y disposición de las aguas oleosas generadas por los buques, esta empresa busca cumplir con los requerimientos de un tratamiento adecuado en pro de la protección del medio marino.

La existencia y disponibilidad de estas empresas prestadoras de servicio y de los procesos de tratamiento y disposición final de las aguas oleosas desempeñan un papel fundamental, debido a que son las encargadas de disponer el residuo y evitar que este sea vertido al mar de forma ilegal generando un impacto ambiental negativo.

La separación se define como una modificación de la forma de un cuerpo o mezcla suprimiendo la consistencia local que tenga la mezcla. Para hacer la separación de una mezcla se emplean diferentes principios de separación como: filtración, decantación, sedimentación, destilación, separación magnética entre otros, los cuales se hacen con el objetivo de modificar la mezcla y obtener los componentes aparte (Marin, 2016). Los métodos de separación convencionales son:

- **Método de centrifugación :** Este utiliza motores de gran potencia, con gran número de piezas las cuales requieren mantenimiento constante debido al movimiento de la máquina, son efectivas en la extracción de sólidos suspendidos, pero no separan los sólidos disueltos y metales pesados presentes en la mezcla (Greg Johnson, 2006).
- **Filtro de vacío en tambor rotatorio:** Es un método muy eficaz para separar grandes sólidos (materiales de gran tamaño como arena y rocas), aunque en ocasiones se debe hacer doble filtración para separar partículas de menor tamaño. Los filtros de vacío requieren de grandes superficies y tiene un alto costo (Cabrera, 2016).
- **Placa clarificadora en pendiente:** Es un sistema económico y fácil de usar, su proceso depende de la gravedad para el desprendimiento de los sólidos más densos, aunque las partículas pequeñas, sólidos disueltos y sustancias coloides no son filtradas por este método, en algunas ocasiones este proceso es combinado con sistemas de floculación donde se agregan sustancias químicas para la aglutinar sustancias coloides (Greg Johnson, 2006).
- **Tratamiento biológico:** Este proceso depende de la actividad biológica de microorganismos específicos que se encarga de digerir los sólidos y contaminantes en aguas residuales. Una limitación es la excesiva sensibilidad del sistema a cambios de temperatura y pH, además el funcionamiento de este sistema requiere de un operador calificado, el sistema ocupa mucha superficie debido al reactor biológico, el cual consiste en un sistema que mantiene un ambiente biológicamente activo, que involucra organismos o sustancias bioquímicamente activas derivadas de dichos organismos, el cual tiene como objetivo degradar los componentes de hidrocarburos de la mezcla agua aceite (Sanaa Jamaly, 2015).
- **Evaporadores:** Son sistemas usados para el tratamiento de aguas residuales, sin embargo el agua no puede ser reutilizada. Este proceso de separación por evaporación tiene altos costo de inversión, consume gran cantidad de energía ya que se debe elevar la temperatura al punto de evaporación del agua, incluso para modelos modernos y eficientes (Flores, 2017) .

Todos los métodos anteriores se rigen bajo el principio de separación de agua y aceite, el cual hace una división en dos fases del residuo oleoso (agua y aceite), estos métodos son utilizados todavía, funcionan y logran el objetivo de separación, pero presentan algunas limitaciones como eficiencia, alto consumo de energía, altos costos de inversión, mantenimiento entre otros. Actualmente existen nuevas tecnologías que son eficientes, tienen bajos costos de operación y bajo consumo de energía una de ellas es la separación por membranas.

Un método usado para el tratamiento de aguas oleosas es la filtración este es un proceso o procedimiento físico-mecánico para la separación de sustancias, es un proceso o procedimiento físico-mecánico para la separación de sustancias. Se requiere de una fuente de presión o vacío para llevar a cabo la filtración y esta fuerza crea un diferencial de presión (ΔP) a través del filtro o la membrana en este caso particular (Ambiente, 2001).

El medio filtrante es uno de los elementos fundamentales en la filtración, es el que realiza la separación de los sólidos contenidos en el fluido para su correcta elección es importante para garantizar el buen funcionamiento del proceso. El medio filtrante debe permitir el paso del fluido y retener los sólidos que se irán acumulando sobre su superficie, formando una capa de permeado (Ambiente, 2001).

Una membrana se puede definir como una interface que separa componentes de acuerdo con su estructura. Una membrana es una barrera a través de la cual los fluidos y los sólidos son transportados selectivamente cuando una fuerza impulsora es aplicada. La estructura de las membranas utilizadas se elige de acuerdo a las partículas o tamaño molecular, forma y propiedades químicas del flujo de alimentación. Las membranas también se pueden clasificar como orgánicas o sintéticas de acuerdo a su naturaleza (Font, 2007).

La tecnología de membranas es un término genérico usado para los procesos de separación donde se emplean membranas. Una membrana se define como una barrera que separa dos fases y que permite el transporte selectivo de componentes de una fase a la otra (Lenntech, 2015). La fracción que atraviesa la membrana se llama permeado y la fracción que se retiene es el rechazo como se puede apreciar en la siguiente imagen:

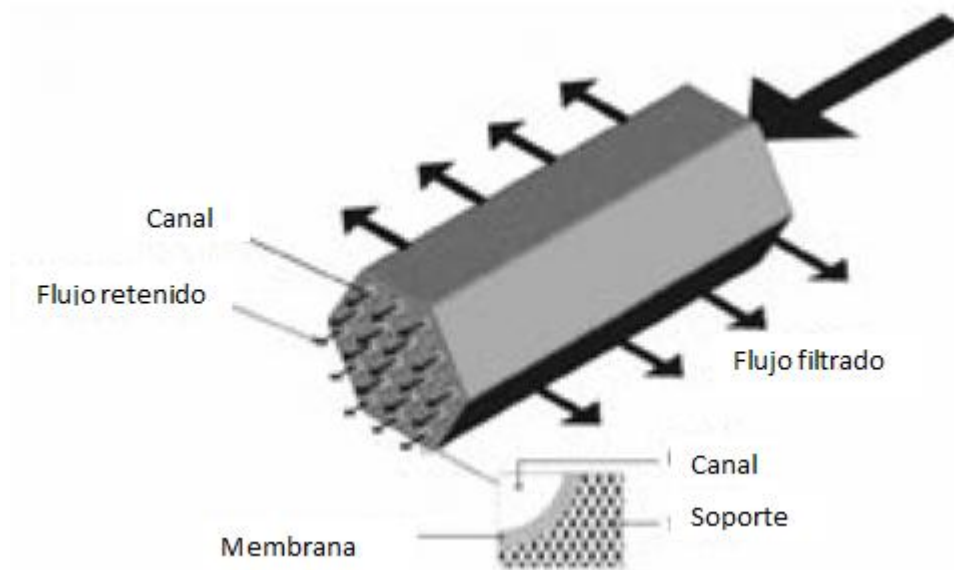


Ilustración 3 Principio de separación por membrana

(J.M. Benito, 2007)

En la imagen se muestra un segmento de membrana de cerámica, muestra las principales partes de esta, los flujos de entrada y salida de la mezcla a filtrar. Ilustra el proceso de separación del agua aceite, el agua está representado en la imagen como flujo filtrado y el aceite como flujo retenido.

A continuación, se presenta una tabla con los principales métodos de separación de aguas oleosas, este cuadro incluye otros métodos no mencionados y las principales ventajas y desventajas de cada uno.

Tabla 2 Diferentes métodos químicos y físicos para la eliminación de aguas residuales.

Método de purificación	Ventajas	Desventajas
Extracción de solventes	Método eficiente y proceso muy rápido.	Altos costos, ambientalmente inseguro (uso de productos químicos), los metales pesados no son eliminados en este proceso.

Método de purificación	Ventajas	Desventajas
Centrifugación	El sistema es fácil de utilizar, no es necesario el uso de solventes y ambientalmente seguro (no requiere uso de sustancias químicas).	Requiere grandes cantidades de energía, no viable económicamente, las moléculas de menor tamaño $0.01 \mu\text{m}$ son difíciles de decantarse.
Flotación por espuma	Fácil de aplicar y requiere menos energía.	Las aguas residuales oleosas altamente viscosas no se pueden tratar con este proceso.
Irradiación ultrasónica	Rápido y efectivo, no necesita ningún producto químico.	Alto costo de maquinaria, es incapaz de tratar metales pesados.
Irradiación de microondas	Muy rápido y eficiente y sin necesidad de agregar productos químicos.	Equipo especialmente diseñado, muy costoso y no efectivo para procesos a gran escala.
Incineración	Eliminación rápida y completa de PHCs (sustancias químicas particularmente peligrosas en lodos oleosos).	Se requiere un alto costo del equipo y un proceso alternativo para eliminar las cenizas.
Estabilización / solidificación	Rápido y eficiente para producir compuestos estabilizados de PHCs (sustancias químicas particularmente peligrosas), bajo costo y captura de metales pesados.	Pérdida de energía reciclable y menos efectivo en el proceso.
Biorremediación / compostaje	Gran capacidad de tratamiento, bajo costo, más rápido y menos área requerida para el proceso.	Aplicable en condiciones frías.

Actualmente las tecnologías de filtración para los residuos líquidos oleosos se pueden realizar por medio de diferentes métodos los cuales tiene en cuenta principalmente el tamaño de las partículas en este caso las gotas de aceite en emulsión y también la procedencia del residuo, la concentración del

contaminante, entre otros, estos procesos de filtración son realizados por membranas y serán explicados a continuación:

- **La microfiltración:** La microfiltración es un proceso de filtración por medio de una membrana microporosa que elimina los contaminantes de un fluido. El tamaño de poro de la membrana oscila desde 0.1 hasta 1 μm . La microfiltración consigue la eliminación absoluta de contaminantes de una corriente de alimentación por un proceso de separación basado en la retención de contaminantes sobre una superficie de membrana. (ICT, 2009).
- **Ultrafiltración** es un proceso de separación de membrana que permite la reducción de los sólidos suspendidos como partículas, coloides, quistes, bacterias y virus por medios mecánicos. Las membranas de ultrafiltración están construidas de plásticos livianos y los poros están hechos de diferentes materiales como polímeros orgánicos, plásticos suaves y cerámica, los cuales eliminan los sólidos suspendidos con base al tamaño de la partícula. El tamaño del poro varía ampliamente según el material, el proceso de fabricación y el uso o la aplicación deseada de la membrana específica (Pentair, 2015).
- **La nanofiltración** es el proceso mediante el cual se hace pasar un fluido a través de una membrana semipermeable (permiten el paso selectivo de ciertas sustancias) a una determinada presión de forma que se produce una separación basada en el tamaño de las moléculas que pueden atravesar dicha membrana (entre 0.001 y 0.01 mm). Se obtienen dos corrientes del fluido de entrada: el permeado, que es el fluido que ha pasado a través de la membrana y al cual se le han retirado los componentes cuyo peso molecular es mayor que el tamaño de poro de la membrana, y el concentrado, que es la que corresponde al fluido que no ha atravesado la membrana y que concentra los componentes de la corriente principal (UAT, 2014).
- **La tecnología de ósmosis inversa** es utilizada para la purificación del agua que utiliza una membrana semipermeable (permiten el paso selectivo de ciertas sustancias) para eliminar iones, moléculas y partículas más grandes en el agua potable. Para lograr la ósmosis inversa se aplica una presión para vencer la presión osmótica, que es una propiedad coligativa producida por diferencias de potencial químico del solvente, un parámetro termodinámico. La ósmosis inversa puede eliminar muchos tipos de elementos suspendidos en el agua, incluyendo bacterias, y está utilizada tanto en procesos industriales como para la producción de agua potable (Rodríguez, 2014).

En la siguiente imagen se ilustran los diferentes procesos de filtración, esta tiene cuatro procesos: microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa, se muestran cuáles son las partículas que la membrana es capaz de retener y cuales deja fluir, en este caso se ven tres tipos de partículas disueltas en el fluido sales, macromoléculas y sólidos suspendidos.

De forma general se puede ver que ninguno de los procesos deja fluir los sólidos suspendidos de la membrana y a la vez todas las membranas dejan fluir el agua, el proceso con la membrana más permeable es la microfiltración ya que deja fluir por la membrana las sales y las macromoléculas (tamaño de partícula entre 0.1 y 4 μm), el proceso con la membrana menos permeable es la ósmosis inversa pues este deja pasar únicamente el agua y retiene todas las otras partículas contenidas en la mezcla.

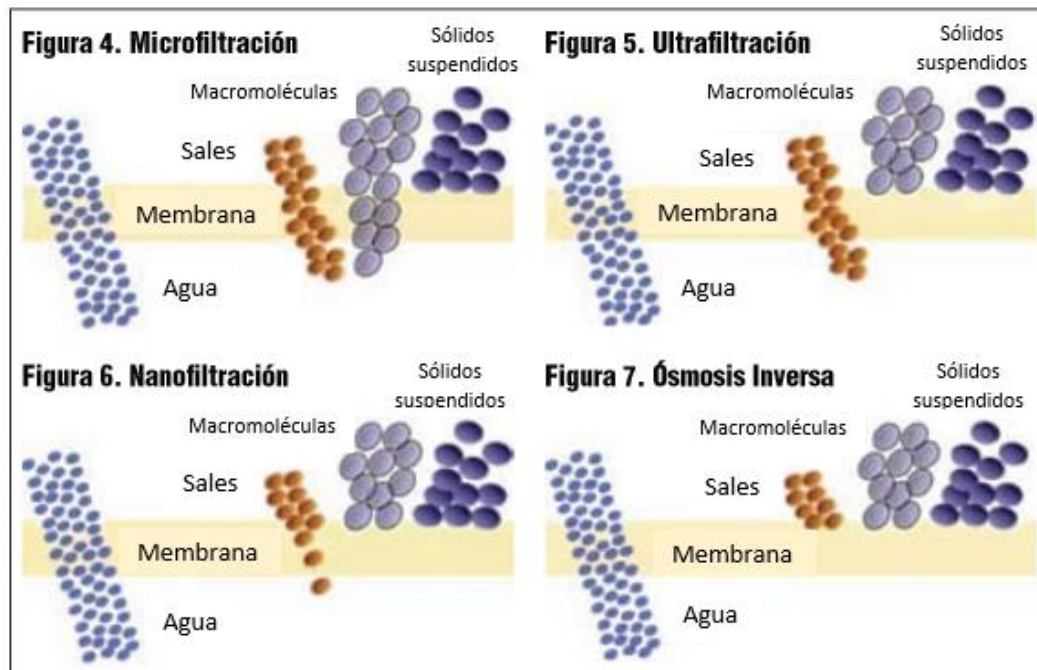


Ilustración 4 Procesos de filtración por membranas

(Sánchez, 2014)

La variedad de dispositivos de filtración o filtros es tan extensa como las variedades de materiales porosos disponibles como medios filtrantes y las condiciones particulares de cada aplicación sin embargo hay parámetros y variables que intervienen de forma directa en el proceso de filtración y los resultados que se obtiene de este. Para la eficiencia de la filtración se tienen en cuenta parámetros como temperatura del agua oleosa al filtrar, pH, densidad entre otras.

Como parámetros más relevantes para la realización de este proyecto se tiene en cuenta el aumento de temperatura de la mezcla: agua aceite la cual conduce a una eficiencia mayor ya que la mezcla se hace menos densa y la velocidad de filtración tiende a aumentar cuando ingresa a la membrana, pues se tiene un aumento de energía termodinámica (energía liberada en forma de calor) en las partículas del agua y, consecuentemente, la difusión se vuelve un mecanismo importante cuando se tienen partículas suspendidas menores de un micrómetro. Por otro lado, la disminución de la viscosidad facilita la acción del mecanismo de sedimentación de partículas mayores de un micrómetro (Yactayo, 2015).

El pH influye en la capacidad de intercambio iónico entre las partículas suspendidas y los granos del medio filtrante. Para valores de pH inferiores a 7.0, disminuye el intercambio de cationes y aumenta el intercambio de aniones sobre las superficies positivas; mientras que, para valores de pH superiores a 7.0, se produce un aumento en el intercambio de cationes y una disminución en el intercambio de aniones sobre las superficies negativas (Yactayo, 2015).

Cuando hay concentración de partículas suspendidas en el afluente, el medio filtrante se encuentra limpio, la eficiencia de remoción depende de la concentración de partículas suspendidas en el afluente. Después de algún tiempo de filtración, la eficiencia de remoción aumenta con el aumento de la concentración de las partículas suspendidas en el afluente, pues las partículas retenidas hacen de colectoras de otras partículas suspendidas (Yactayo, 2015).

9.4 Marco teórico

El desarrollo a nivel mundial está dando lugar a nuevas e innovadoras formas de analizar, organizar y mejorar los procesos de producción con el objetivo de minimizar o eliminar la contaminación ambiental y asegurar un mejor desempeño de las de las actividades en lo competente a la parte ambiental. Lo anterior apunta claramente hacia un desarrollo sostenible, enfocado hacia lo estipulado en los 17 objetivos de desarrollo sostenible, que para este proyecto estarían involucrados el objetivo 6 agua limpia y saneamiento básico, el cual garantiza un gestión sostenible del agua, el objetivo 9 industria, innovación e infraestructura que busca construir infraestructura sostenible e innovadora y el objetivo más relacionado con esta propuesta es el objetivo 14 vida submarina cuyo fin es conserva y utilizar de forma sostenible los océanos y mares.

Lo anterior que implica un proceso de cambio en los modelos actuales industriales, para así implementar mejores prácticas en este caso en el sector del transporte marítimo, principalmente enfocada en la generación de residuos líquidos oleosos, ya que generan grandes impactos ambientales, salud humana y economía mundial.

La actividad marítima y las operaciones portuarias son actividades económicas que mueven el mercado mundial por medio de la importación y exportación de todo tipo de productos, durante la navegación, operación, funcionamiento y mantenimiento los buques generan residuos oleosos que por sus características físicas y químicas es considera un RESPEL por el alto contenido de hidrocarburos grasa y aceites las cuales son almacenadas en bodegas o tanques ubicadas en la parte inferior de los buques.

Las aguas oleosas generadas por los buques son almacenadas en tanques especiales en el mismo buque, solamente hasta cuando atracan en los puertos son entregadas a las empresas autorizadas para su disposición y tratamiento, ya que estas aguas representan una gran amenaza para el recurso agua, aire y

la salud humana, el agua puede ser contaminada con este RESPEL por causas accidentales como un derrame o por vertimientos ilegales por parte de los buques (Song A. K., 2010). Ahora en términos de emisiones alto contenido de hidrocarburos que tiene estas aguas, el almacenamiento y las altas temperatura se produce evaporación, la cual genera gases contaminantes y de efecto invernadero que deterioran y afectan el estado del aire.

Por lo anterior es de gran importancia utilizar tecnologías eficientes y limpias para la disposición y tratamiento de las aguas oleosas, ya que la presencia de estos en el agua y en el aire, pueden no solo afecta al ambiente sino también a la salud humana y algunas actividades económicas dependientes de mares y ríos (Song A. K., 2010).

El marco teórico está basado en tres fundamentos que son la base para la realización de este proyecto, las cuales describen los principios de filtración por membranas, filtración por membranas vibratorias y filtración por membranas de cerámica. Estos dos tipos de membranas fueron propuestos debido a las características del residuo que se va a filtrar, como son la concentración, porcentaje de humedad, viscosidad, temperatura, entre otras, ya que en muchas ocasiones la proporción de agua es mayor que el mismo residuo oleoso.

El proceso de filtración por membranas puede definirse como una operación donde una corriente de alimentación está dividida en dos: un permeado conteniendo el material que ha pasado a través de la membrana y un retenido que contiene las especies que no la atraviesan. Los procesos de filtración por membrana pueden utilizarse para concentrar o purificar una solución o una suspensión (solvente soluto o separación de partículas) y para fraccionar una mezcla (separación soluto-soluto) (Gómez, 2006).

Debido a la gran variedad de membranas que existen actualmente, su clasificación tiene en cuenta a diferentes parámetros. En primer lugar, se puede distinguir entre membranas biológicas y sintéticas. Las membranas sintéticas son simples en su estructura o función, pero existe asimismo una gran diversidad, diferenciándose por el material con el que se han elaborado, su estructura, su porosidad, su geometría, el proceso en el cual intervienen (Ayza, 2017).

Si se atiende a su estructura, la membrana puede ser simétrica (la estructura es constante en la sección transversal de la membrana) o asimétrica (la estructura varía a lo largo de la sección transversal de la membrana). Las membranas simétricas pueden ser porosas u homogéneas; las membranas asimétricas también pueden ser porosas o compuestas (partes densas y porosas). Los materiales utilizados en la preparación de la membrana pueden ser polímeros, cerámicas, vidrios, metales o líquidos. Además, pueden ser neutros o cargados eléctricamente, por ejemplo, con iones anclados. La geometría de la membrana puede ser plana, tubular, espiral, en forma de fibras huecas, etc (Ayza, 2017). En la siguiente imagen se muestra un mapa de clarificación de membranas

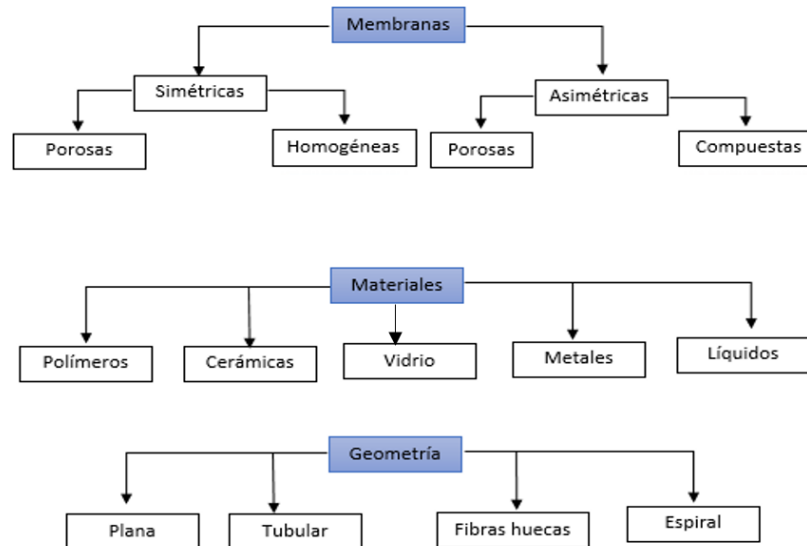


Ilustración 5 Esquema de clasificación de membranas sintéticas

(Ayza, 2017)

La fuerza principal de la tecnología de membrana es el hecho de que trabaja sin la adición de productos químicos, con un uso relativamente bajo de la energía y conducciones de proceso fáciles. Las membranas se utilizan cada vez más a menudo para la creación de agua tratada procedente de aguas subterráneas, superficiales o residuales. Actualmente las membranas son competitivas para las técnicas convencionales. El proceso de la separación por membrana se basa en la utilización de membranas semi-permeables (Lenntech, 2015).

El principio es bastante simple: la membrana actúa como un filtro muy específico que dejará pasar el agua, mientras que retiene los sólidos suspendidos y otras sustancias. Hay varios métodos para permitir que las sustancias atraviesen una membrana. La filtración de membrana se puede utilizar como una alternativa a la floculación, las técnicas de purificación de sedimentos, la adsorción (filtros de arena y filtros de carbón activado, intercambiadores iónicos), extracción y destilación (Lenntech, 2015).

Entre las **ventajas del proceso de filtración** por membrana se evidencia que:

- Es un proceso que puede ocurrir a baja temperatura. Es importante porque permite el tratamiento de los materiales sensibles al calor.

- El proceso de operación y tratamiento tiene un costo más bajo en comparación con los métodos convencionales.
- Es un proceso de bajo coste energético. La mayor parte de la energía requerida es la necesaria para bombear los líquidos a través de la membrana. La cantidad total de energía utilizada es mínima comparada con las técnicas alternativas como evaporación (Lenntech, 2015).

Para la separación de aguas aceitosas son utilizadas las membranas de cerámicas, que son las membranas inorgánicas más desarrolladas y utilizadas en la actualidad. Una membrana de cerámica se puede definir como un material policristalino consolidado, hecha en compuestos que contienen elementos de los grupos III a VI de la tabla periódica, donde la estructura, la porosidad y el tamaño de poros están directamente determinados por el método utilizado para transformarlas. Los procesos capilares, fenómenos de adsorción y la carga superficial de estas membranas juegan un papel importante en las retenciones y separaciones (Domínguez, 2014).

Las membranas cerámicas tienen diferentes características en procesos de separación por nanofiltración, la más importante es la estabilidad química, térmica y mecánica en comparación con las membranas orgánicas, lo que hace posible operar en ocasiones a altas temperaturas (hasta 500°C) y con valores extremos de pH (pH 1-14). Las membranas se pueden limpiar con productos químicos agresivos, disolventes orgánicos o con vapor de agua caliente. Ello hace posible una limpieza severa y eficaz, alargando la vida operativa de las membranas. Las membranas cerámicas reúnen potencialmente las características adecuadas para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados.

Para finalizar las membranas vibratorias son usadas en la separación de las aguas oleosas utilizan una vibración de torsión de la membrana, la cual crea una deformación lateral que se produce por una fuerza externa. También llamado corte, cortadura en la superficie de la membrana que reduce la acumulación de grasas y aceites y polarización de la misma. La vibración reduce esta acumulación, no se requiere el uso de un pretratamiento químico. Además, los ratios de flujo son 5-15 veces más altos (en galones/pies cuadrados/día) comparado con otros sistemas de filtración por membrana (Michele Monroe, 2016).

Las membranas vibratorias oscilación una torsión a 50 Hz en la superficie de la membrana, para inhibir la polarización de difusión de estos coloides suspendidos. Como resultado aparece en la detención de los sólidos suspendidos sobre la membrana como una capa paralela donde el flujo cruzado los arrastra. (Michele Monroe, 2016).

En el caso de aceite de desecho, se concentran por lotes los tanques de almacenaje llenos del aceite de desecho antes de reducir el volumen al 80%, rechazando el 20% con forma viscosa y espesa que se puede utilizar también como combustible (rechazo) (Michele Monroe, 2016).

9.5 Marco normativo

La disposición, tratamiento, transporte y manejo de las aguas oleosas se rige bajo una normatividad aplicable en un marco legal a nivel nacional e internacional compuesto de decretos, leyes, convenios y resoluciones explicadas a continuación.

En la siguiente tabla se hace una breve descripción de la normatividad vigente aplicable nacional e internacional a la protección y manejo del medio marino y costero Colombia con respecto a la contaminación generada por los buques y sus actividades

Tabla 3 Normatividad legal aplicable al proyecto

Norma	Descripción	Autoridad	Ámbito
Constitución Política de Colombia de 1991	Hace referencia el derecho de gozar de un ambiente sano, protección de los recursos culturales y naturales del país.	Presidencia de la República	Nacional
Decreto 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.	República de Colombia	Nacional
Ley 99 de 1993	Por la cual se crea el MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental –SINA y se dictan otras disposiciones	Congreso de Colombia	Nacional

Norma	Descripción	Autoridad	Ámbito
Decreto 1874 de 1979	Da las directrices acerca de la protección y prevención de la contaminación del medio marino en el país.	Dimar	Nacional
Resolución número 1207 de 2014	Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas.	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Nacional
Ley 12 de 1981	Se aprueba la "Convención Internacional para la Prevención de la Contaminación por Buques", firmada en Londres el 2 de noviembre de 1973 y autorizase al Gobierno Nacional para adherir al mismo, cuyo texto es: "Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques 1973".	El Congreso de Colombia	Nacional
Resolución 0883 de 2018	Se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales en cuerpos de aguas marinas.	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Nacional
Convenio Internacional MARPOL 1973	Busca prevenir la contaminación por los buques, es el principal convenio internacional que versa sobre la prevención de la contaminación del medio marino por los buques a causa de factores de funcionamiento o accidentales.	Organización internación marítima	Internacional

A continuación, se hace una descripción más detallada de cada una de las normas misionada anteriormente

Dentro de marco normativo nacional como eje principal está la **Constitución Política de Colombia de 1991** en donde en el **Título II** de los derechos, las garantías y los deberes en el Capítulo 3 sobre los derechos colectivos y del ambiente en los **artículos 78 -82** se hace referencia el derecho de gozar de un ambiente sano, protección de los recursos culturales y naturales del país, la conservación de una ambiente sano, conservación y preservación del ambiente (Colombia C. p., 1991)

Un decreto de gran importancia a nivel nacional es el **decreto 2811 de 1974** por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, en donde los **artículos 164, 165 y 166** hace referencia a la protección y conservación del medio marino y costero del país por medio de la prevención de contaminación (Colombia R. d., 1974)

La **Ley 99 de 1993** es la ley general ambiental Colombia, en su **artículo 16** se refiere a las entidades científicas de investigación del Ministerio de Ambiente como el INVEMAR, en el **artículo 18** dicta que el INVEMAR tiene como objetivo principal la investigación ambiental básica y aplicada de los recursos naturales renovables y el medio ambiente y los ecosistemas costeros y oceánicos de los mares adyacentes al territorio nacional y emitirá conceptos técnicos sobre la conservación y aprovechamiento sostenible de los recursos marinos, y prestará asesoría y apoyo científico y técnico al Ministerio, a las entidades territoriales y a las Corporaciones Autónomas Regionales (Colombia E. c., 1993)

La normatividad colombiana acerca del medio marino y costero es bastante amplia, una de las entidades regulatorias importantes a nivel nacional es DIMAR (Dirección General Marítima), esta es la Autoridad Marítima Colombiana encargada de ejecutar la política del gobierno en esta materia, la cual hace parte del Ministerio de Defensa Nacional (Dimar, Dirección General Marítima, 2014). Algunos de los decretos vigentes aplicables son:

- **Decreto 1874 de 1979:** Da las directrices acerca de la protección y prevención de la contaminación del medio marino en el país (Dimar, Dirección Nacional Marítima, 1979).
- **Decretos 1875/76 de 1979:** En ellos se define el concepto de contaminación marina y se dictan normas de protección (Dimar, Dirección Nacional Marítima, 1979).
- **Resolución 645 de 2014 (DIMAR):** Por la cual se implementan algunas disposiciones sobre el Manejo Integrado de Desechos generados por Buques (Dimar, Dirección General Marítima, 2014).

Para realizar un reúso de agua es necesario cumplir con la **resolución 1207 de 2014** por la cual adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. Esta resolución define el reúso como la utilización de las aguas residuales tratadas cumpliendo con los criterios de calidad requeridos, además, en su artículo 6° establece el uso para agua residual tratada entre ellos está el riego de vías para el control de material particulado.

La normatividad internacional aplicable se basa principalmente en El convenio internacional MARPOL de 1973, este es un Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques, es el principal convenio internacional que versa sobre la prevención de la contaminación del medio marino por los buques a causa de factores de funcionamiento o accidentales, fue adoptado el 2 de noviembre de 1973 en la sede de la OMI. El Protocolo de 1978 se adoptó en respuesta al gran número de accidentes de buques tanque ocurridos entre 1976 y 1977 (Omi, 1977).

En el Convenio figuran reglas encaminadas a prevenir y reducir al mínimo la contaminación ocasionada por los buques, tanto accidental como procedente de las operaciones normales, y actualmente incluye seis anexos técnicos. En la mayoría de tales anexos figuran zonas especiales en las que se realizan controles estrictos respecto de las descargas operacionales (Omi, 1977)

9.6 Marco institucional

La actividad comercial de la empresa PUERTO PIMSA S.A. es la operación de muelles fluviales y marítimos. Los servicios que presta la empresa tiene un amplio campo y hace que sea necesario utilizar insumos, equipos, mano de obra y recursos (agua, energía), según la actividad a realizar como operaciones portuarias, cargue, descargue almacenamiento de mercancías y servicios portuarios.

Por lo anterior la empresa PUERTO PIMSA S.A, cuenta con departamentos encargados del manejo y coordinación de cada área de la empresa. En el siguiente organigrama se muestra la estructura organizacional de la empresa.

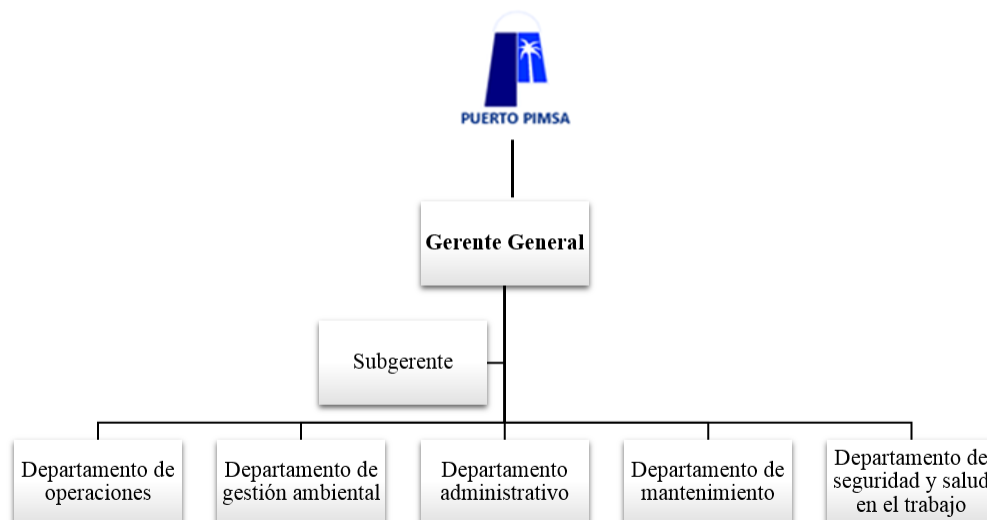


Ilustración 6 Organigrama PUERTO PIMSA S.A.

(PUERTO PIMSA, 2018)

9.7 Marco metodológico

El marco metodológico comprende las herramientas, instrumentos y métodos de investigación utilizados para desarrollar la metodología de este trabajo.

9.7.1 Métodos e instrumentos de investigación

Para la realización y desarrollo de las actividades de este proyecto es necesario tener en cuenta técnicas, métodos e instrumentos que guíen y faciliten la investigación, a continuación, se presenta una tabla donde se muestran los instrumentos utilizados en la metodología basada en los tres objetivos específicos planteados al inicio del documento.

Tabla 4 Métodos e instrumentos de investigación

Objetivo general	Objetivos específicos	Actividad	Técnica	Instrumento
Proponer el diseño de un sistema de filtración por membranas para aguas oleosas provenientes de buques en la Instalación Portuaria PUERTO PIMSA S.A. Malambo, Atlántico.	Identificar los tipos de membranas más adecuados para la filtración de aguas oleosas generadas por buques.	Revisión bibliográfica enfocada en los fundamentos y principios de las membranas utilizadas para la filtración de residuos oleosos.	Análisis documental de la información consultada.	Análisis de contenido e información de cada documento consultado.
	Definir el tipo de membrana que será utilizada en el sistema de filtración para aguas oleosas provenientes	Relacionar la caracterización de las aguas oleosas con las características de las membranas.	Comparación de los diferentes tipos de membranas.	Fichas y notas comparativas con la información más relevante.

Objetivo general	Objetivos específicos	Actividad	Técnica	Instrumento
	de buques en la Instalación Portuaria PUERTO PIMSA S.A.			
	Diseñar el sistema de filtración por membranas para aguas oleosas para PUERTO PIMSA S.A.	Aplicar procesos de medición en campo para obtener de datos de área de estudio.	Calcular las dimensiones de cada uno de los componentes del sistema de filtración.	Diseñar del modelo en planos del sistema de filtración.

9.7.2 Enfoque

El enfoque de este proyecto es de tipo cualitativo ya que se hizo una revisión bibliográfica a través del análisis y recolección de varios documentos relacionados con la temática planteada, los cuales son de ayuda para el desarrollo de la propuesta. La observación hace parte importante del enfoque de tipo cualitativo, por lo cual se realizó una visita técnica de observación a los sistemas de tratamiento utilizados por la empresa de disposición RECITRAC, ya que esta es la empresa contratada por PUERTO PIMSA S.A. para hacer la disposición final de las aguas oleosas generados por los buques, esta visita apporto información para el desarrollo del proyecto. En cuanto a la generación de la propuesta se describe el método y técnica utilizada para implementar en la zona de estudio.

9.7.3 Alcance

El alcance del proyecto es correlacional y exploratorio, es correlacional debido a que compara dos variables dentro de un contexto y establece una influencia basada en la interacción de aspectos sociales, ambientales y económicos de la región. Además, relaciona como una variable puede tener efectos sobre otra en este caso las aguas oleosas generadas por los buques durante su funcionamiento, operaciones y mantenimiento, como afectan el sistema tierra y las cinco esferas que lo componen, en específico la atmósfera e hidrosfera, ya que son las más afectadas por la problemática planeada al inicio del documento. El proyecto se relaciona con un alcance exploratorio debido a que el tema de investigación

“filtración de aguas aceitosas por medio de membranas” es poco estudiado en Colombia, además investiga e identifica conceptos o variables con escasa investigación frente al problema planteado.

9.7.4 Método

La investigación que se realiza tiene en primer lugar el método inductivo, el cual es el razonamiento mediante el cual, a partir del análisis de hechos singulares, pretende adaptarse a una situación en específico. Es decir, se parte del análisis de ejemplos concretos que se descomponen en partes para posteriormente llegar a una conclusión. Las investigaciones científicas representan la síntesis de estudios relacionados con la temática planteada en este proyecto, a lo largo de las cuales se van estableciendo conclusiones generales sobre determinados conocimientos; permite analizar casos particulares a partir de

los cuales se extraen conclusiones de carácter general (Maya, 2014). En este caso, la contaminación que genera las aguas oleosas producidas por los buques, hace posible determinar una conclusión general sobre la problemática actual, la cual es la base para establecer la investigación de ¿Cómo es el proceso de la disposición de las aguas oleosas y ¿cuál es una viable solución sobre la problemática?

Para este tipo de investigación también aplica el método analítico, en donde se define como aquel que distingue las partes de un todo y procede a la revisión ordenada de cada uno de los elementos por separado. Este método es útil cuando se llevan a cabo trabajos de investigación documental, que consisten en revisar en forma separada todo el material necesario para la investigación. En esta investigación, se analiza la principal causa de la contaminación que se genera en el lugar de estudio, se analiza la disposición de las aguas oleosas y se analizan posibles soluciones para dicha disposición (Maya, 2014).

9.7.5 Unidad de análisis

El proyecto está enfocado en una sola unidad de análisis el cual es el diseño de un sistema de filtración por membranas para aguas oleosas generadas por buques para la instalación portuaria PUERTO PIMSA S.A. Se realizará una búsqueda bibliográfica de información, enfocada en los efectos ambientales que trae la generación aguas oleosas por buques sobre el ambiente principalmente sobre las esferas atmósfera e hidrosfera y los tratamientos tecnológicos más adecuados para este tipo específico de aguas.

9.7.6 Variables e indicadores

Durante el desarrollo del proyecto se identificaron variables e indicadores referentes a la calidad del agua oleosa generada por buques. A continuación, se muestra una tabla donde se explica la dimensión, el indicador, tipo de indicador y el método empleado para la obtención de los datos.

Tabla 5 Variables e indicadores

Dimensión	Variable	Aspecto	Indicador	Tipo	Técnica
Ecológica	Agua oleosa	Calidad	Turbiedad	Físico-químico	Caracterización de una muestra de agua realizada por un laboratorio
			pH		
			Viscosidad		
			Temperatura		
			Sólidos Suspendidos totales		

10 Metodología

Para el diseño de un sistema de filtración por membranas para aguas residuales oleosas provenientes de los buques que llegan a la Instalación Portuaria Puerto Pimsa, se establece la metodología del proceso paso a paso de la investigación desde la recolección de información hasta el planteamiento final de la propuesta a desarrollar.

En primer lugar, se hizo una revisión bibliográfica del área de estudio. En este caso el municipio de Malambo, El Parque Industrial Malambo (Pimsa) y Puerto PIMSA S.A, consultándose información geográfica, socio económica y organizacional, luego se realizó una identificación de la problemática principal del Puerto enfocada en las aguas oleosas generadas por los buques y sus efectos ambientales en el área de influencia de la zona de estudio, para este caso Malambo. De acuerdo a lo encontrado en la problemática se inició una búsqueda bibliográfica general acerca de los principales componentes de las aguas oleosas de los buques, tratamientos y disposición final al igual que las tecnologías aplicadas para la separación de este residuo, almacenamiento y transporte del mismo.

De forma más específica se realizó un levantamiento de información en campo sobre los procesos actuales de disposición de aguas oleosas generadas por los buques que llegan a los puertos de los municipios de Malambo y Barranquilla, la búsqueda incluyó principalmente las empresas que realizan el

tratamiento, manejo y disposición final de este tipo de residuos, su ubicación, tarifas de disposición, tratamientos y procesos utilizados. El levantamiento de esta información se realizó con una visita técnica a la empresa RECITRAC, la cual es actualmente la que presta el servicio de tratamiento y disposición final de aguas oleosas generadas por los buques que llegan a Puerto PIMSA S.A, se hizo un recorrido por las instalaciones de la planta, se realizaron preguntas pertinentes sobre el tema en general y se hizo un registro fotográfico del sistema de tratamiento utilizado para este tipo de tratamientos.

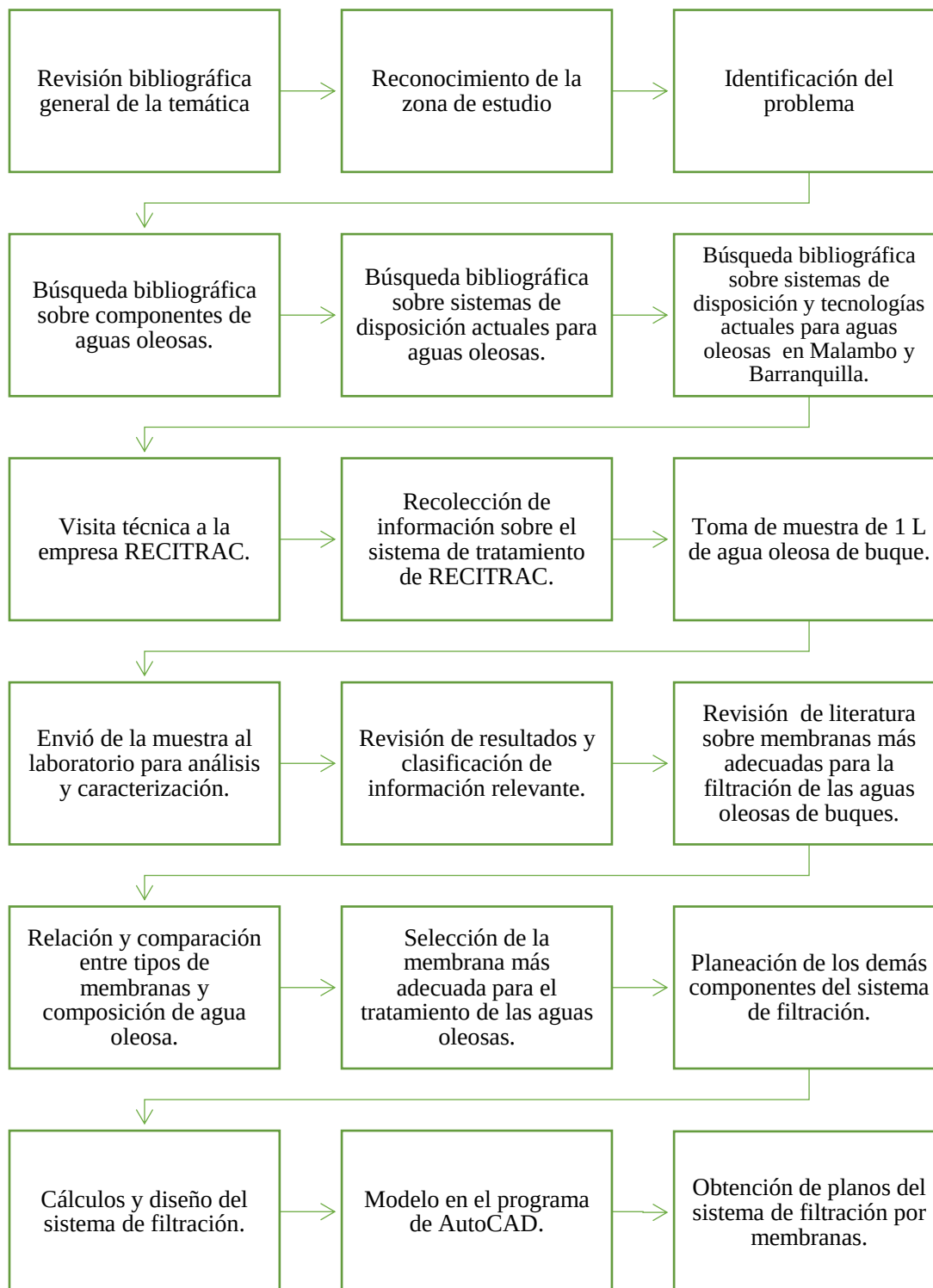
Para tener un concepto más detallado de los componentes y características del agua oleosa se realizó un análisis del agua, para esto se tomó una muestra de 1 L de agua oleosa de la Motonave Pensilvania, la cual fue enviada al laboratorio interno del Parque Industrial Malambo PIMSA, los resultados de los análisis fueron revisados y comparados con la normatividad nacional o internacional vigente para así poder tomar decisiones. Con los resultados obtenidos en los análisis realizados a las aguas oleosas de la Motonave Pensilvania y la bibliográfica consultada sobre los componentes, se inició una nueva revisión acerca de cuáles son las membranas más adecuadas para la filtración de las aguas oleosas generadas por buques, durante la revisión se compararon variables como material de la membrana, eficiencia de filtración, tratamiento y diseño del sistema.

Teniendo en cuenta las características de las aguas oleosas y los tipos de membranas se procedió a seleccionar de la membrana más adecuada para el respectivo tratamiento. Con la membrana seleccionada se hizo una planeación de los demás componentes del sistema de filtración, en este caso tanques, tuberías, bombas de presión y accesorios necesarios para el funcionamiento general del sistema.

Con toda la información se hicieron los cálculos para el diseño del sistema de filtración, la metodología empleada fue una base de cálculos en Excel programada con la guía “*Biological Wastewater Treatment Processes III: MBR Processes*” (Harlan H. Bengtson, 2015), la cual contiene los cálculos y fórmulas para el diseño de todas las partes del sistema, como el tanque de decantación, la membrana y es almacenamiento del agua y el aceite que salen del sistema. Teniendo los cálculos y el diseño del sistema, se hace el modelo en el programa de AutoCAD versión 2016 para obtener los planos en planta finales del sistema de filtración por membranas para aguas oleosas generadas en la Instalación Portuaria Puerto PIMSA S.A, en esta fase se dibujan los planos del sistema de filtración.

Se plantea un diagrama de la metodología anteriormente mencionada, donde se establece el paso a paso de lo desarrollado durante el proyecto.

Ilustración 7 Metodología general



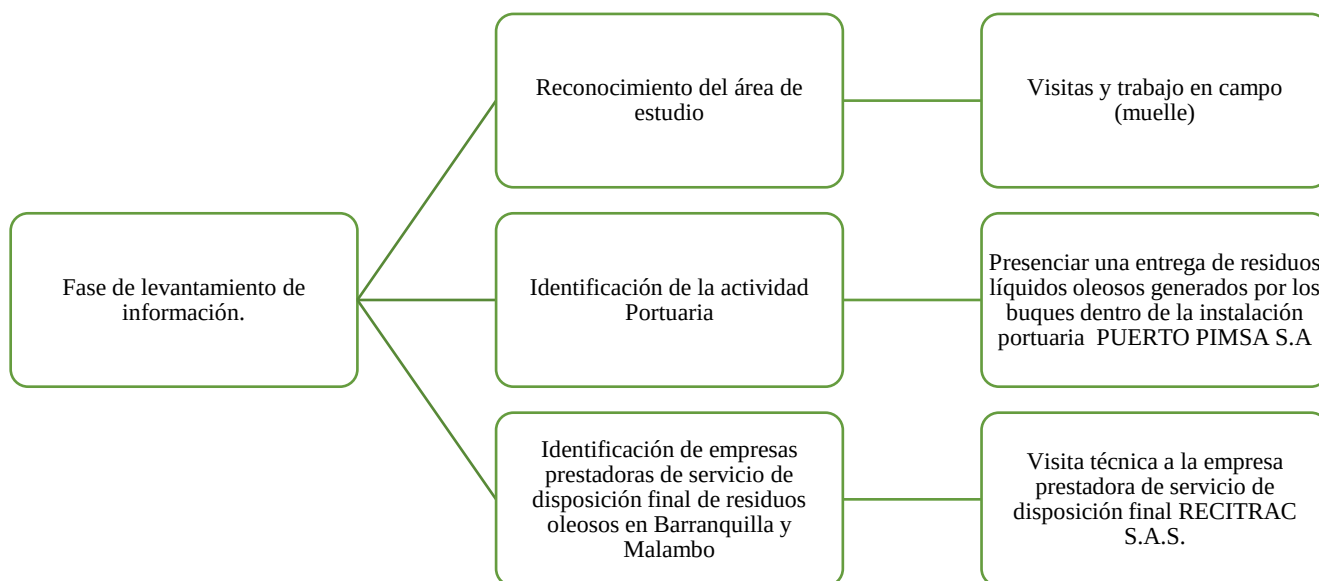
10.1 Estructura metodológica

La metodología comprende los procedimientos empleados para desarrollar la investigación, la cual se describe en los siguientes esquemas de forma más específica, los cuales están divididos en fases de acuerdo a cada objetivo específico planteado para este proyecto.

10.1.1 Primera fase

Esta primera fase está asociada con el primer objetivo específico de este proyecto y se basa en el levantamiento de información en campo sobre el área de estudio, los tipos de separación y los tipos de membranas utilizadas para el tratamiento de aguas oleosas generadas por buques.

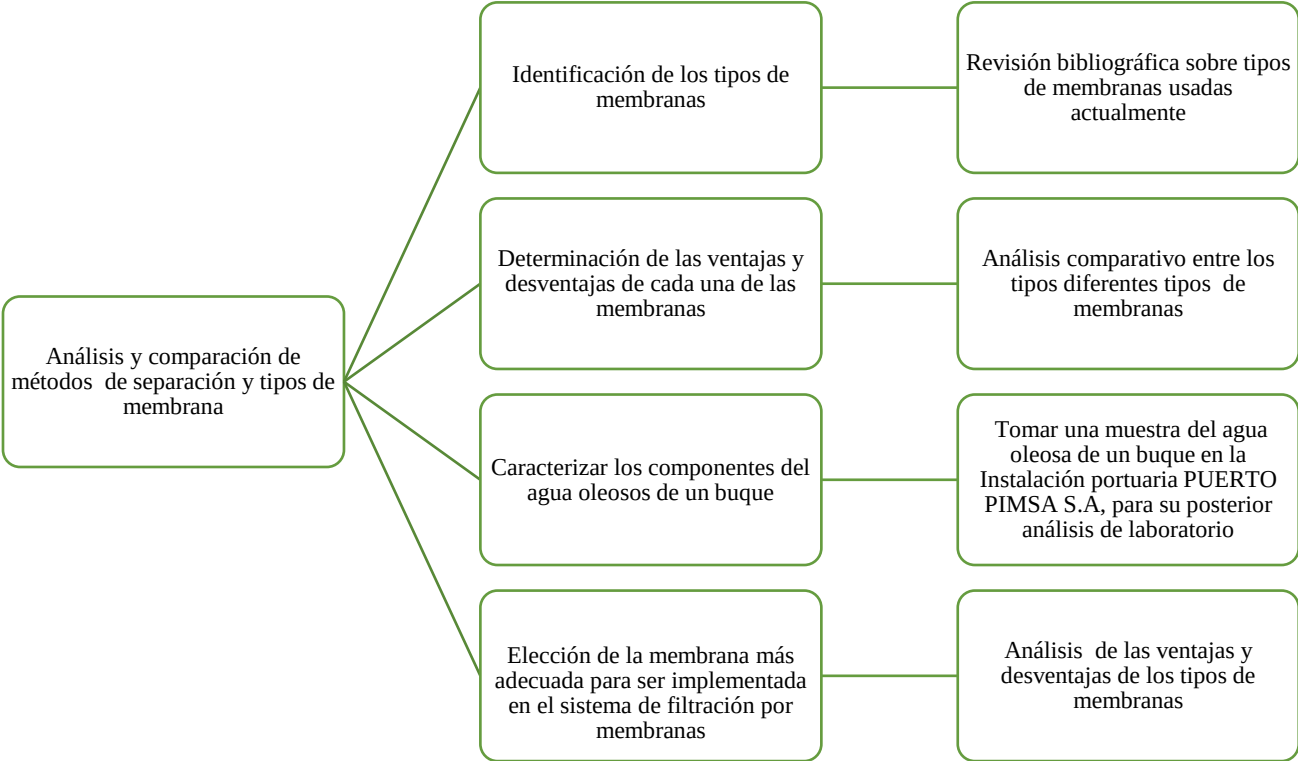
Ilustración 8 Primera fase levantamiento de información



10.1.2 Segunda fase

La segunda fase del proyecto se basa en el segundo objetivo específico, el cual es definir el tipo de membrana más adecuado para el sistema de filtración de aguas oleosas generadas por buques, en esta etapa se hace el uso de análisis comparativos entre los diferentes tipos de membranas, esto teniendo en cuenta los componentes del agua oleosas a tratar y las características, ventajas y desventajas de cada tipo de membrana.

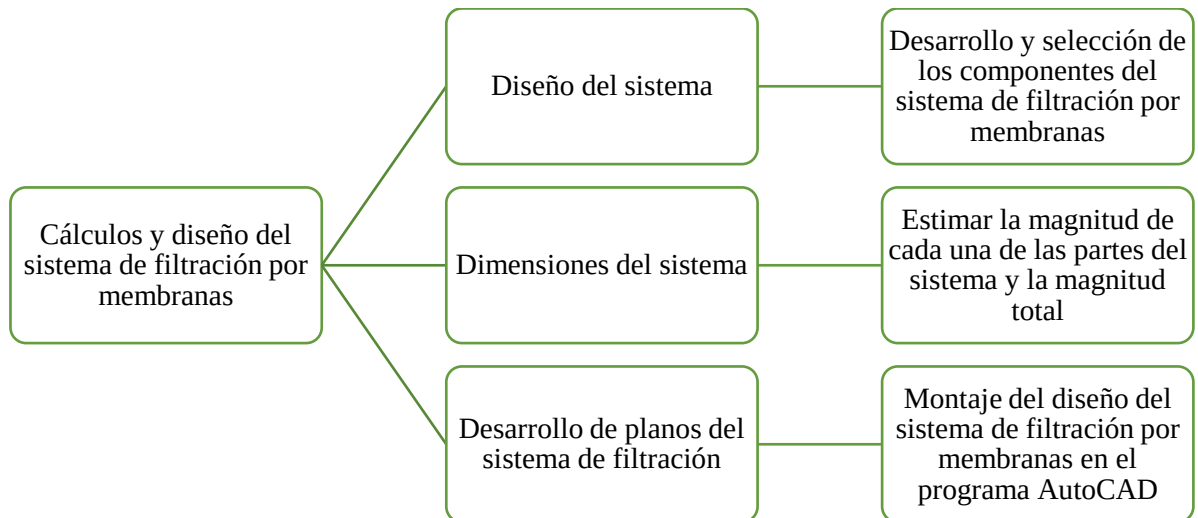
Ilustración 9 Segunda fase análisis comparativo



10.1.3 Tercera fase

La última fase del proyecto está basada en el tercer objetivo específico del proyecto, el cual es el diseño y cálculo del modelo del sistema de filtración por membranas, el cual se hace por medio de una metodología consultada y establecida, en esta etapa también se hace el diseño de los planos del sistema de filtración como resultado final del proyecto.

Ilustración 10 Tercera fase cálculos y diseño



10.2 Metodología de cálculo y diseño

Para el diseño y los cálculos del sistema de filtración por membranas para aguas oleosas generadas por buque se utilizó como base la Guía “*Biological Wastewater Treatment Processes III MBR Processes*” (Harlan H. Bengtson, 2015). Esta guía proporcionó los elementos necesarios para el desarrollo de los cálculos y diseño del sistema de filtración planteado en este proyecto. El documento de Excel se obtuvo a partir de la guía y base de cálculos presentada en el documento citado anteriormente, se utilizaron las fórmulas de acuerdo a las partes requeridas para el diseño el sistema como: tanque de decantación, área, volumen, demanda, flujo y otras variables necesaria para el diseño el sistema de filtración.

A continuación se muestra una tabla con las variables utilizadas para los cálculos de diseño con sus respectivas formulas y unidades.

Tabla 6 Variables y ecuaciones de diseño

Tanque de decantación			
Variable	Símbolo	Unidad	Ecuación
Caudal	Q	m ³ /día	N/A
Volumen	V	m ³	L ³
DBO	DBO	mg/L	N/A
Lado	l	m	N/A
Ancho	a	m	N/A
Profundidad	h	m	N/A
Sistema de membranas			
Variable	Símbolo	Unidad	Ecuación
Flujo de entrada	Fe	m ³ /día	N/A
Flujo promedio permeado	Fp	L/h/m ²	Datos que proporcionan los fabricantes de membrana.
Densidad de embalaje de membrana	De	m ² /m ³	Datos que proporcionan los fabricantes de membrana.
Demanda específica de Aire	Da	m ³ /h/m ²	Datos que proporcionan los fabricantes de membrana.
Área de Membrana Requerida	Am	m ²	Am =(Flujo de entrada/Flujo promedio permeado) * 41.67
Volumen Módulo de membrana	V _m	m ³	V _m = área de membrana requerida/densidad de embalaje de membrana

11 Cronograma de actividades

A continuación se muestra una tabla con las actividades a realizar en el proyecto y las fechas de realización

Tabla 7 Cronograma de actividades

Objetivos específicos	Meses	Julio				Agosto				Septiembre				Octubre				Noviembre	
	Semanas	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
	Actividades																		
Identificar los tipos de membranas más adecuados para la filtración de aguas oleosas generadas por buques	Revisión bibliográfica																		
	Visita técnica RECITRAC																		
	Análisis de información recolectada																		
Definir el tipo de membrana que será utilizado en el sistema de filtración para aguas oleosas provenientes de buques en la Instalación Portuaria PUERTO PIMSA S.A.	Revisión bibliográfica																		
	Toma de muestra del agua oleosa																		
	Caracterización del agua oleosa																		
	Interpretación de los resultados																		
	Revisión bibliográfica																		

Objetivos específicos	Meses	Julio				Agosto				Septiembre				Octubre				Noviembre	
	Semanas	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
	Actividades																		
	Diseñar el sistema de filtración por membranas para aguas oleosas para PUERTO PIMSA S.A.																		
	Cálculos del sistema de filtración																		
	Diseño del sistema																		
	Planos del sistema																		
	Presupuesto																		

12 Resultados

La primera fase de este proyecto está basada en el levantamiento de información bibliográfica acerca de las aguas oleosas generadas por buques, los tipos de tratamiento actuales, las tecnologías de disposición de residuos oleosos, tipos de membranas de filtración, componentes de las aguas oleosas producidas por buques. La segunda parte consistió en un levantamiento de información en campo, donde se realizó una visita técnica a la empresa RECITRAC S.A.S, la cual está autorizada para hacer la gestión y disposición final de las aguas oleosas de buques.

En la revisión bibliográfica realizada se encontraron artículos científicos de revistas relacionados con la temática como en la revista *Desalination* publicado en año 2007 el artículo científico “*Development of a new high porosity ceramic membrane for the treatment of bilge water*” las aguas oleosas generadas por los buques pueden ser tratadas eficientemente por medio de procesos de ultrafiltración con membranas de cerámica, este tipo de membranas están diseñadas para aumentar la eficiencia del proceso de filtración debido a su capacidad de recibir flujos de permeado. Se han probado membranas con alta porosidad hasta de un 70% y se ha demostrado alta eficiencia hasta de un 96%. Como metodología se utilizó agua de sentina o agua oleosa con dos hidrocarburos: combustible y diésel, esta mezcla fue filtrada por dos tipos de membranas, el sistema 1 se utilizó con un tamaño de poro de 100 μm y el sistema dos con un tamaño de poro 6 μm , cada una de éstas membranas trabajo con presiones de 0.2 y 0.7 Mpa y 0.2 y 0.5 Mpa respectivamente. Como resultado se obtuvo que la membrana que logró reducir la concentración de hidrocarburos hasta lo permitido por la norma internacional MARPOL (15 ppm) fue la membrana del sistema dos debido al tamaño del poro, lo cual hace que las partículas sean separadas más fácilmente (J.M. Benito, 2007).

En la región ártica se realizó un estudio llamado “*Environmental impacts of shipping in 2030 with a particular focus on the Arctic region*” el cual fue publicado por la revista *Atmospheric Chemistry and Physics* en el año 2013. En este estudio se cuantificaron los cambios en concentración de ciertos contaminantes atmosféricos de vida corta como NO_x , SO_x , CO, NMVOCs (compuestos orgánicos volátiles distintos del metano). Por medio de un inventario de emisiones enfocado a las que son generadas por buques en la zona ártica evaluada de forma regional, el estudio se realiza desde el año 2004 haciendo estimaciones hacia el 2030 de acuerdo al incremento de tráfico de buques en la zona Ártica. Durante el estudio se determinó que las emisiones de buques son altamente contaminantes y de impacto potencial por contenido de hidrocarburos.

El estudio demuestra que la concentración de contaminantes en la atmósfera ha aumentado proporcionalmente al tiempo debido al incremento del tráfico de buques en esta zona, por

ejemplo el ozono en Europa occidental ha tenido un aumento de 6%, en océanos tropicales su incremento está por encima de 10%, el SO₂ ha incrementado su concentración en un 10% a 15%, produciendo efectos ambientales y climáticos en la zona ártica (Dalsren, 2013).

Es de gran importancia contar con métodos eficientes para el control de los residuos y emisiones de buques, pues son un medio de transporte de gran importancia a nivel mundial y su actividad necesita de normativas y tecnologías para evitar efectos negativos en el ambiente y la salud humana. El estudio concluye que el incremento en el tráfico de buques en la zona de estudio es proporcional al aumento de los contaminantes, pues se hizo la comparación entre dos variables el tráfico de buques y la concentración de contaminantes los cuales presentaron aumento de manera relacionada.

Las aguas oleosas por su contenido de aceites e hidrocarburos se consideran peligrosas para el ambiente y necesitan ser tratadas adecuadamente, el artículo “*Recent improvements in oily wastewater treatment: Progress, challenges, and future opportunities*” publicado por la revista *Journal of Environmental Sciences* en el año 2015, muestra las diferentes alternativas y métodos de tratamientos adecuados para el tratamiento de este tipo de aguas oleosas como proceso electroquímico, filtración de membrana, tratamiento biológico, tecnologías híbridas, uso de biosurfactantes, tratamiento a través de radiación ultravioleta al vacío y desestabilización de emulsiones mediante el uso de zeolitas y otros minerales naturales. Todos los métodos evaluados tienen resultados eficientes ya que cumplen el objetivo de la separación agua aceite. De los métodos más costosos de implementar está la desestabilización de emulsiones, debido a que se requieren compuesto químicos como el uso de zeolitas, y otros minerales naturales, de igual manera, el tratamiento electroquímico resulta costoso debido a que los compuestos químicos que se deben utilizar a la mezcla de agua aceitosas para lograr su separación como parte del proceso usado en el estudio, los métodos que tiene más alto rendimiento con respecto a los demás métodos son filtración de membrana y tratamiento biológico ya que tiene un eficiencia hasta del 96%.

En conclusión, existe una creciente necesidad de diseñar nuevos enfoques sostenibles para el tratamiento de aguas residuales oleosas que se orienten hacia el ahorro económico y la preservación del medio ambiente, ya que la mayoría de los métodos anteriores son demasiado costosos para ser implementados a escala comercial o requieren grandes huellas ambientales. Es importante hacer el adecuado tratamiento de estas aguas debido a su peligrosidad para el ambiente y la salud humana, pues los derrames accidentales y la acumulación de estos componentes tóxicos en el agua, el aire y el suelo pueden traer grandes efectos ambientales, sociales y económicos (Sanaa Jamaly, 2015).

La filtración por membranas vibratorias es un método que actualmente es muy utilizado para el tratamiento de aguas oleosas de buques como comprueba el artículo científico “*Treatment of oily waste water by PVP grafted PVDF ultrafiltration membranes*” publicado

por la revista *Chemical Engineering Journal* en el año 2015 .En este caso en particular se hizo una comparación entre dos tipos de membranas vibratorias la PVDF y PVP, Las membranas PVDF están fabricadas con polímero de polivinildenedifloride (PVDF) son de naturaleza hidrofílica y tienen una alta resistencia a la temperatura, mientras que las PVP están fabricadas de polisulfona.

Además de un proceso de defluoración (reducir parcialmente el contenido de fluoruros en la mezcla de agua aceite) en las membranas con el objetivo de modificar los poros de las membranas y obtener un mejor resultado y eficiencia en la separación de las aguas oleosas. Como resultado se obtuvo que la membrana más eficiente para este proceso de filtración fue PVP, removiendo el 90% de hidrocarburos la mezcla de agua oleosa, su eficiencia está asociada al tipo de material de fabricación (Lia, 2015).

El tráfico de embarcaciones comerciales a través del Estrecho de Bering está aumentando. Esta región tiene una gran importancia biológica y cultural, para la cual el transporte comercial, el artículo “*Vessels, risks, and rules: Planning for safe shipping in Bering Strait*” realizado en el estrecho de Bering publicado por la revista *Marine Policy* en el año 2015 muestra los principales riesgos generados por el tráfico de buques entre ellos el ruido, contaminación crónica y derrames de petróleo. Varias poblaciones aseguran verse afectadas por el tráfico constante de buques en el Estrecho de Bering, como principales efectos de esto, se encuentra impacto y desplazamiento de la fauna, amenaza a la seguridad alimentaria por presencia de hidrocarburos como petróleo diésel y gasolina en el agua, enfermedades en la población por emisiones generadas por los buques, aumento de personas que pasan por la costa y afectaciones al patrimonio cultural de la zona (Stetson, 2015).

Todas estas afectaciones son generadas por todo tipo de buques y actividades portuarias como buques portacontenedores, carga general, buques gubernamentales, servicio de aprisionamiento de petróleo y gas, servicios de disposición, buques de suministro, buques de pasajeros, buques tanque y remolcadores y barcos pesqueros, los cuales transitan por el estrecho de Bering generando diferentes tipos de contaminación (Stetson, 2015).

Para dar solución y controlar las afectaciones que genera el tráfico marítimo en el Estrecho de Bering, se han implementado más políticas ambientales y normas de prohibición, control y prevención de situaciones que ponen en riesgo la población, la salud humana y el ambiente, las cuales están enfocadas a restricciones de velocidad, control de emisiones, prevención de derrames de petróleo, planes de contingencia y gestión social, todo lo anterior con el objetivo de minimizar los impactos generados por el tráfico de buques (Stetson, 2015).

Las aguas oleosas por su contenido de aceites e hidrocarburos se consideran peligrosas para el ambiente y necesitan ser tratadas adecuadamente, el artículo “*Recent improvements*

in oily wastewater treatment: Progress, challenges, and future opportunities” publicado por la revista *Journal of Environmental Sciences* en el año 2015, muestra las diferentes alternativas y métodos de tratamientos adecuados para el tratamiento de este tipo de aguas oleosas como proceso electroquímico, filtración de membrana, tratamiento biológico, tecnologías híbridas, uso de biosurfactantes, tratamiento a través de radiación ultravioleta al vacío y desestabilización de emulsiones mediante el uso de zeolitas y otros minerales naturales. Todos los métodos evaluados tienen resultados eficientes ya que cumplen el objetivo de la separación agua aceite. De los métodos más costosos de implementar está la desestabilización de emulsiones, debido a que se requieren compuestos químicos como el uso de zeolitas, y otros minerales naturales, de igual manera, el tratamiento electroquímico resulta costoso debido a que los compuestos químicos que se deben utilizar a la mezcla de agua aceitosas para lograr su separación como parte del proceso usado en el estudio, los métodos que tiene más alto rendimiento con respecto a los demás métodos son filtración de membrana y tratamiento biológico ya que tiene una eficiencia hasta del 96%.

En conclusión, existe una creciente necesidad de diseñar nuevos enfoques sostenibles para el tratamiento de aguas residuales oleosas que se orienten hacia el ahorro económico y la preservación del medio ambiente, ya que la mayoría de los métodos anteriores son demasiado costosos para ser implementados a escala comercial o requieren grandes huellas ambientales. Es importante hacer el adecuado tratamiento de estas aguas debido a su peligrosidad para el ambiente y la salud humana, pues los derrames accidentales y la acumulación de estos componentes tóxicos en el agua, el aire y el suelo pueden traer grandes efectos ambientales, sociales y económicos (Sanaa Jamaly, 2015).

La filtración por membranas vibratorias es un método que actualmente es muy utilizado para el tratamiento de aguas oleosas de buques como comprueba el artículo científico *“Treatment of oily waste water by PVP grafted PVDF ultrafiltration membranes”* publicado por la revista *Chemical Engineering Journal* en el año 2015. En este caso en particular se hizo una comparación entre dos tipos de membranas vibratorias la PVDF y PVP, Las membranas PVDF están fabricadas con polímero de polivinildenedifloride (PVDF) son de naturaleza hidrofílica y tienen una alta resistencia a la temperatura, mientras que las PVP están fabricadas de polisulfona.

Además de un proceso de defluoración (reducir parcialmente el contenido de fluoruros en la mezcla de agua aceite) en las membranas con el objetivo de modificar los poros de las membranas y obtener un mejor resultado y eficiencia en la separación de las aguas oleosas. Como resultado se obtuvo que la membrana más eficiente para este proceso de filtración fue PVP, removiendo el 90% de hidrocarburos la mezcla de agua oleosa, su eficiencia está asociada al tipo de material de fabricación (Lia, 2015).

El tráfico de embarcaciones comerciales a través del Estrecho de Bering está aumentando. Esta región tiene una gran importancia biológica y cultural, para la cual el transporte comercial, el artículo “*Vessels, risks, and rules: Planning for safe shipping in Bering Strait*” realizado en el estrecho de Bering publicado por la revista *Marine Policy* en el año 2015 muestra los principales riesgos generados por el tráfico de buques entre ellos el ruido, contaminación crónica y derrames de petróleo. Varias poblaciones aseguran verse afectadas por el tráfico constante de buques en el Estrecho de Bering, como principales efectos de esto, se encuentra impacto y desplazamiento de la fauna, amenaza a la seguridad alimentaria por presencia de hidrocarburos como petróleo diésel y gasolina en el agua, enfermedades en la población por emisiones generadas por los buques, aumento de personas que pasan por la costa y afectaciones al patrimonio cultural de la zona (Stetson, 2015).

Todas estas afectaciones son generadas por todo tipo de buques y actividades portuarias como buques portacontenedores, carga general, buques gubernamentales, servicio de aprisionamiento de petróleo y gas, servicios de disposición, buques de suministro, buques de pasajeros, buques tanque y remolcadores y barcos pesqueros, los cuales transitan por el estrecho de Bering generando diferentes tipos de contaminación (Stetson, 2015).

Para dar solución y controlar las afectaciones que genera el tráfico marítimo en el Estrecho de Bering, se han implementado más políticas ambientales y normas de prohibición, control y prevención de situaciones que ponen en riesgo la población, la salud humana y el ambiente, las cuales están enfocadas a restricciones de velocidad, control de emisiones, prevención de derrames de petróleo, planes de contingencia y gestión social, todo lo anterior con el objetivo de minimizar los impactos generados por el tráfico de buques (Stetson, 2015).

Como parte también del primer objetivo el día 28 de julio de 2018 se realizó la visita técnica a las instalaciones de la empresa RECITRAC S.A.S (ver anexo1), la cual está dedicada a tratar los residuos líquidos oleosos principalmente los generados por buques. Durante la visita se realizó un recorrido por la planta, se hizo un registro fotográfico y se hicieron preguntas pertinentes sobre el proceso de tratamiento de los residuos. RECITRAC S.A.S está ubicada en el centro de Barranquilla, cuenta con una planta de tratamiento de aguas oleosas. Su proceso inicia desde la recolección del residuo en el lugar de generación, transporte de este hasta la planta y por último tratamiento y disposición final.

De forma más específica el proceso de tratamiento de las aguas oleosas, cuenta con cuatro subprocesos que tienen como objetivo hacer una separación total de la mezcla agua-aceite.

El primer proceso que se realiza es la decantación. Según información suministrada por la empresa RECITRAC S.A.S la mezcla agua-aceite que se descarga de los buques tiene por lo general un contenido de 60% aceite y 40% agua, la separación física de agua-aceite se hace

en un tanque sedimentador, donde se deposita la mezcla, se deja decantar por un tiempo de retención específico y se obtiene como resultado la separación parcial de la mezcla donde se logra decantar el 40% del contenido total de aceite de mezcla. El aceite decantado es almacenado en un tanque de aceite recuperado.

El volumen de agua y aceite que no se logró separar en el primer proceso, pasa a un segundo tratamiento el cual consiste en utilizar una máquina de centrifugación, la cual utiliza movimientos giratorios para hacer la separación agua-aceite, este segundo proceso tiene como resultado la separación de 90% del contenido de aceite ingresado a la máquina centrifugadora. El aceite que sale de este proceso es almacenado en el tanque de aceite recuperado.

La mezcla restante de agua y aceite que sale de la máquina centrifugadora pasa por un tercer proceso para la remoción total del aceite, este es un proceso de bombas de burbujas, el cual consiste en la inyección de burbujas de aire a la mezcla, para que las trazas de aceite se adhieran a las burbujas y así reducir la densidad aparente de la mezcla. El aceite que sale de este proceso es almacenado en el tanque de aceite recuperado, este proceso logra separar el 97% del contenido de aceite en el agua.

Para finalizar el agua que sale del tercer proceso tiene un contenido aproximado de 3% de aceite, este entra a un proceso final donde se adiciona unos productos emulsionantes específicos con el fin de hacer una remoción total de agua y el aceite. Las salidas del proceso total de tratamiento son agua y aceite completamente separados.

El aceite es almacenado en un tanque de aceite recuperado, el cual después es comercializado y vendido a empresas o terceros que tengan procesos donde utilicen aceites que no exijan una calidad tan alta, en este caso es vendido a canteras cercanas a la ciudad de Barranquilla. El agua que sale del proceso esta es vertida directamente al alcantarillado de la ciudad, pues la empresa RECITRAC S.A.S cumple con los parámetros para vertimientos al igual que con las licencias ambientales respectivas para el tratamiento y manejo de residuos peligrosos y el vertimiento directo al alcantarillado.

Con la visita realizada se observó el proceso convencional de tratamiento de aguas oleosas, su funcionamiento, características y procesos, además permitió hacer una comparación con lo planteado en este proyecto, basada principalmente en la eliminación de procesos de separación adicionales como centrifugación, inyección de burbujas de aire y adición de emulsionantes por medio de la implantación de una membrana en el sistema. La membrana logra la reducción en los tiempos de tratamiento hasta un 40% pues la membrana sustituye los demás procesos.

Como parte también de la primera fase el proyecto se realizó una caracterización del agua oleosa generada por buques, esto se hizo con el objetivo de trabajar con información real y no teórica de los componentes y concentraciones del agua oleosa de un buque.

La caracterización del agua se realizó partir de toma de una muestra de 1L de agua oleosa de la motonave Pensilvania, en PUERTO PIMSA S.A., esta muestra fue llevada y analizada en el laboratorio interno del Parque industrial Malambo. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos del análisis de la muestra.

Tabla 8 Caracterización de aguas oleosas Motonave Pensilvania

Caracterización de aguas oleosas			
Código: Motonave Pensilvania			
Fecha: 15 agosto 2018			
Volumen analizado: 1 L			
Resultados			
Parámetro	Unidades	Resultados	Apariencia
DBO ₅	mg/L	373	*
DQO	mg/L	681.3	*
Grasas y aceites	mg/L	705	Brillante
Sólidos suspendidos totales	mg/L	181.7	Turbia
Sólidos sedimentables	mL/L	1.5	*
pH	Unidades de pH	9	*
Temperatura	° C	28.6 °C	*
Densidad	kg/m ³	838	*

La tabla anterior muestra los resultados de la caracterización del agua oleosa generada por la motonave Pensilvania, donde se observa el contenido de DBO₅, DQO, grasas y , aceites, sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables, pH, temperatura y densidad, cada uno con sus unidades respectivas, concentración y apariencia del agua. Como parámetros más importantes y de interés para este proyecto se tienen en cuentas las grasas y aceites debido a que estas son las que van a ser eliminadas y tratadas por el sistema de filtración por membranas, la temperatura y pH debido al material y tipos de membrana a utilizar en el proceso de filtración, la densidad ya que de esta depende la velocidad de filtración y por último los sólidos ya que intervienen en la velocidad de decantación de la mezcla. La presencia de DBO y DQO indica probadamente que los desechos de cocinas y baños de la

motonave fueron depositados dentro del tanque del almacenamiento de aguas oleosas, lo cual incrementa la presencia de materia orgánica en la mezcla de aguas oleosas.

En el segundo objetivo del proyecto se plantó llevar a cabo un análisis comparativo para hacer la selección de la membrana más adecuada para el sistema de filtración por membranas para aguas oleosas generadas por buques. En esta parte del proyecto se hacen tablas comparativas de los diferentes tipos de membranas, tipos de materiales de membranas y tipos de filtración.

De acuerdo a la revisión bibliográfica realizada en artículos publicados por empresas fabricantes de membranas como VESEP, ProMinent Colombia S.A.S, AUXIAGUA entre otras, se encontró que los dos tipos de membranas más adecuados para la filtración de aguas oleosas son las membranas de cerámica y las membranas vibratorias. En la siguiente tabla se muestra las ventajas y desventajas de cada tipo de membrana.

Tabla 9 Ventajas y desventajas de membrana vibratoria y cerámica

Tipo de membrana	Ventaja	Desventaja
Membrana vibratoria	• La vibración evita el taponamiento de la membrana. • El agua no necesita un pre-tratamiento. • Soporta temperaturas hasta de 78°C. • Reduce DBO, DQO, sólidos suspendidos totales y sólidos suspendidos disueltos. • Bajo costo de operación. • Cuenta con tecnologías de flujo cruzado (cross-flow) para evitar la colmatación de la membrana. • Eficiencia e filtración del 96%.	• Alto costo de implementación • Alto costo energético.
Membrana de cerámica	• El agua no necesita un pre tratamiento químico. • Largo tiempo de vida de la membrana. • Diseñada para tratar agua con alto contenido de grasas y aceites. • Resistencia química, mecánica y térmica.	• No reduce la carga de DBO Y DQO de la mezcla. • Mantenimiento de la membrana de forma regular.

Tipo de membrana	Ventaja	Desventaja
	• Cuenta con tecnologías de flujo cruzado (cross-flow) para evitar la colmatación de la membrana. • Eficiencia de filtración 97%. • Elimina la carga de sólidos suspendidos. • Bajo costo de implementación. • Filtra los metales pesados contenidos en la mezcla agua-aceite • Soporta temperaturas hasta de 500° C. • Altamente hidrofílica.	

En la tabla anterior se observan las principales ventajas y desventajas de las membranas que son más adecuadas para la filtración de aguas con contenido de aceite. Estas dos membranas trabajan de forma similar y bajo el mismo principio, sin embargo tiene grandes diferencias, la membrana de cerámica realiza el proceso de filtración de agua oleosa dando como resultado dos fases, el agua clara y el permeado que lo retiene la membrana, a esta membrana se le debe hacer una limpieza periódica para evitar su colmatación (esta depende del contenido de aceite de la mezcla), mientras que las membranas vibratorias basan su tecnología en la vibración con el objetivo que las partículas retenidas por la membrana no se acumulen en ella y así pueda retener de forma más eficiente, aunque también es necesario hacer un mantenimiento y limpieza de la membrana lo cual genera costos fijo de mantenimiento.

Con respecto a los resultados obtenidos de DBO y DQO, la membrana vibratoria tiene la capacidad de remover parte de la carga orgánica contenida en la mezcla agua-aceite mientras que la membrana de cerámica no filtra la con demanda biológica de oxígeno (DBO) y demandando química de oxígeno (DQO), esto es debido al tipo de tecnología y material del que está compuesto cada una de las membranas. El contenido de DBO Y DQO en las aguas oleosas está asociado a la descarga de aguas provenientes de cocinas y sistemas del buque. Lo anterior indica que el agua filtrada por cualquiera de las dos membranas va a contener carga orgánica, lo que implica hacer un tratamiento de pulimento para remover este contenido de agua y poder realizar un reúso.

Las membranas de cerámica son fabricadas de diferentes materiales que permiten hacer una mejor filtración de acuerdo al agua que se desea tratar algunos de estos son: alúmina, circonita, titanio, nitrato de silicio, entre otros. A continuación, se muestra una tabla en donde

se comparan los diferentes tipos de materiales con los cuales fabrican las membranas de cerámica.

Tabla 10 Tipos de materiales membrana cerámica

Tipo de material	Formula química	Descripción
Alúmina	Al_2O_3	- Es el material más utilizado en la obtención de membranas cerámicas, debido a la estabilidad de sus propiedades en procesos de filtración en ambientes químicamente agresivos y a altas temperaturas. - Tiene facilidad de limpieza a pesar del pequeño tamaño del poro. - Tiene una baja resistencia a elevados pH.
Circona	ZrO_2	- Está hecha a base de óxido de circonio. - Soporta altas temperaturas y altos pH. - Se utiliza en la separación de emulsiones de aceite en agua.
Titanio	TiO_2	- Trabaja con tamaños de poro inferiores a $1.5 \mu\text{m}$. - Se emplean para la retención de solutos de bajo peso molecular.
Nitruro de silicio	Si_3N_4	- Se utiliza para la obtención de membranas cerámicas. - Tiene alta resistencia mecánica.

Con la información de la tabla anterior es posible deducir que los materiales más adecuados para la membrana de cerámica son alúmina y circona, debido a que están diseñados para la filtración de aguas oleosas, soportan altas temperaturas, sin embargo, el material alúmina por sus características y fácil limpieza se postula como el mejor material a ser utilizado en la membrana de cerámica para el sistema de filtración de aguas oleosas generadas por buques. (Ayza, 2017)

La membrana de cerámica también tiene otras ventajas sobre otros tipos de membranas como, la distribución del tamaño de poro, pues al ser más estrecha y bien definida puede lograr una mayor selectividad principalmente en agua o aceites emulsionados; tiene lata

estabilidad térmica y para la limpieza no es necesario utilizar productos químicos lo que asegura el rendimiento y duración de la membrana.

Los procesos de separación de las membranas son de diferentes tipos y estos dependen de la fuerza impulsora, el tamaño de las partículas a filtrar y el tipo de membrana ya que son el principal factor que determina su uso, en este caso se muestran en una tabla comparativa los procesos de microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa, la cual servirá para seleccionar el tipo de proceso que será utilizado en el sistema de filtración por membranas propuesto en este proyecto.

Tabla 11 Tipos de procesos de filtración

Proceso	Descripción	Aplicación en la industria	Tamaño de partículas μm	Intervalo de presiones (bar)
Microfiltración	- Se emplea cuando el tamaño de las partículas a retener es superior a 100 μm. - Presenta baja resistencia hidrodinámica y elevada permeabilidad.	Se utiliza para retener sólidos suspendidos y puede emplearse en clarificación (vinos y cerveza), esterilización (productos farmacéuticos) o concretar productos (cultivo de células).	0.1 - 4 μm	0.1 – 2.0
Ultrafiltración	- Separan macromoléculas de una solución acuosa. - Presenta alta resistencia hidrodinámica. - Necesita aplicar altas presiones.	- Tiene numerosas aplicaciones para concentrar o purificar en la industria láctea. - Es muy utilizada en el tratamiento de emulsiones aceite-agua (Industria automotriz, naval, mecánica).	0.006 – 0.2 μm	1.0 – 5.0
Nanofiltración	Realiza una separación basa	Se aplica principalmente para eliminar las sales de calcio del agua	0.008 – 0.01 μm	5.0 – 20

Proceso	Descripción	Aplicación en la industria	Tamaño de partículas μm	Intervalo de presiones (bar)
	en el tamaño de partículas. Tiene capacidad de eliminar metales pesados del agua a tratar.	(ablandamiento del agua). Recuperación de solventes y en los tratamientos de aguas residuales, eliminando moléculas de pequeño tamaño, como proteínas, enzimas, antibióticos, colorantes, herbicidas, pesticidas, insecticidas, etc.		
Ósmosis inversa	- Se utiliza con un tamaño de poro muy reducido. - Se necesita de grandes presión elevados - Baja permeabilidad.	Su aplicación se centra especialmente en la desalinización de aguas marinas y salobres, a producción de agua ultra pura para la industria electrónica, la concentración de zumos, azúcares y leche y en tratamiento de aguas residuales.	0.0001 – 0.002 μm	10 – 100

La tabla anterior muestra las principales características de cada uno de los procesos de filtración, cada uno de ellos está diseñado para un sector específico de la industria, en este caso el proceso que aplica para este sistema de filtración planteado es la ultrafiltración ya que este se especializa en la filtración de aguas con contenido de aceite (Borràs, 2012). En este caso en particular la ultrafiltración es capaz de retener las partículas de aceite contenidas en la mezcla y dejar pasar a través de la membrana el agua libre de aceite (Borràs, 2012).

En esta parte del proceso de filtración el tamaño de las partículas es muy importante, las grasas presentes en el agua pueden encontrarse en tres estados, que se diferencian en el tamaño de las gotas de aceite estos son: los aceites libres, las emulsiones aceite-agua inestables, y las emulsiones aceite-agua altamente estables. Así, los aceites libres se caracterizan por tamaños de gota superiores a 150 μm , los aceites dispersos presentan tamaños en el rango de 20-150 μm y los aceites emulsionados se corresponden con tamaños inferiores a 20 μm .

En este caso en particular el agua a tratar tendrá un tamaño de partícula menor a 20 μm debido a que es una mezcla emulsionada agua-aceite ya que una emulsión es una dispersión

inestable de dos o más líquidos inmiscibles o parcialmente miscibles. Los diámetros de las gotas líquidas que se encuentran dispersas se encuentran en el rango de 0.1 y 20 μm .

En la siguiente imagen se muestra de manera gráfica el proceso de ultrafiltración por membranas de cerámica.

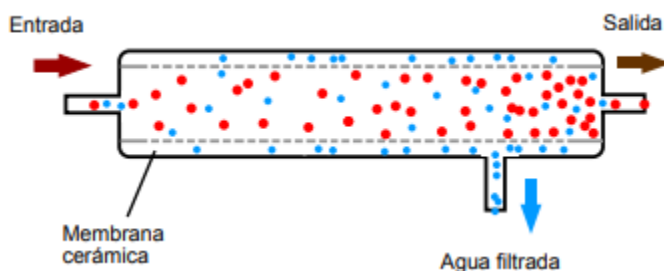


Ilustración 11 Funcionamiento membrana cerámica

(Borràs, 2012)

El sistema tiene una entrada, esta es una emulsión agua aceite, en la imagen está representada como puntos azules el agua y puntos rojos el aceite, la parte inferior y superior representa la membrana de cerámica la cual retiene el agua y deja pasar el aceite. El sistema de filtración tiene dos salidas, la primera es el agua que la membrana de la pasar a través de ella que es agua filtrada y la segunda es la salida del aceite que es lo que la membrana rechaza por su permeabilidad.

Como resultado final del desarrollo del segundo objetivo de este proyecto se determinó que la membrana más adecuada para tratar las aguas oleosas generadas por los buques es la membrana de cerámica de alúmina utilizando un proceso de ultrafiltración. Esta selección se hizo a partir de las ventajas y desventajas de cada tipo de membrana, del tamaño y características del agua oleosa a filtrar basada en la caracterización y análisis y por último en el costo de cada membrana, el uso de energía para el funcionamiento del sistema y mantenimiento.

El tercer objetivo de este proyecto consiste en el cálculo y diseño del sistema de filtración por membranas para aguas oleosas generadas por buques, el sistema está dividido en tres partes entrada, proceso y salidas. La entrada del proceso inicia con un tanque receptor de aguas oleosas, el cual recoge el residuo bombeado desde la parte interna del buque. El residuo líquido oleoso que entra al sistema está compuesto de grasas y aceites, DBO₅, DQO, sólidos

suspendidos totales, pH 9 y temperatura 29°C, las cuales fueron obtenidos en la caracterización realizada (ver tabla 8) y son tomadas como condiciones iniciales o de entrada de la mezcla al sistema de filtración.

El proceso del sistema de filtración inicia con el almacenamiento por un tiempo de retención determinado hasta obtener dos fases separadas, en la parte superior del tanque queda retenido el aceite y en la parte inferior queda retenida el agua, esto es debido a la separación física por diferencia de densidades entra agua y aceite. El aceite retenido en la parte superior es retirado de manera manual y depositado en el tanque de aceite recuperado.

La segunda fase de tratamiento después de la separación física es la separación por la membrana, el agua que almacena la parte inferior del tanque receptor es bombeada a una presión específica hacia la membrana, donde es filtrada por el proceso de ultrafiltración, en esta fase a través de la membrana de cerámica alúmina pasa el agua y a través de los túbulos pasa el aceite que la membrana retiene (ver imagen 8).

El sistema de filtración por membranas tiene dos salidas, la primera es para el aceite filtrado por la membrana de cerámica, que se basa principalmente en la remoción de aceite contenido en las aguas oleosas del buque, sin embargo, la segunda salida que contiene el agua residual cuenta con un contenido de DBO₅, y DQO, que se tratarán con un proceso de cloración para bajar la carga orgánica y poder hacer reúso de la salida de agua del sistema.

La segunda salida del sistema es el aceite recuperado, este es almacenado en tanques, después de la remoción manual del primer proceso de tratamiento, este aceite sale sin presencia de agua, ya que esta fue filtrada por la membrana. La salida de aceite del sistema de filtración por membrana está separada de la salida del primer proceso de tratamiento, por ende, al final se unen los dos volúmenes de aceite recuperados en un solo tanque de almacenamiento temporal.

Como parte del desarrollo del proyecto para las salidas del sistema de filtración por membranas agua y aceite se propone hacer uso ambientalmente sostenible. Para el aceite recuperado se propone hacer una venta de este para su reutilización, este generalmente es comercializado a empresa o terceros que en sus procesos requieren una materia prima que no exija alta calidad algunos ejemplos de esto son las calderas para la generación de energía, asfalto para recubrimiento de las carreteras y uso como combustible industrial, aprovechando su poder calorífico en centrales térmicas de generación eléctrica, cementeras, ladrilleras e incineradores. También se puede someter a un proceso de reciclado, siendo válido para producir otros materiales como betún asfáltico que luego se usa para telas impermeabilizantes, pinturas, tintas, fertilizantes o arcillas expandidas (Ambiente, 2017).

El agua del sistema sale con una carga orgánica, la cual no es eliminada por las membranas, lo que hace necesario realizar un tratamiento de pulimento del agua para eliminar el DBO₅,

DQO, este proceso se hace por medio de la cloración, en donde se usan dosis específicas de hipoclorito, ya que es un potente oxidante. Es capaz de oxidar y corroer la materia orgánica y los microorganismos, elimina patógenos más variados y en menos tiempo en comparación con otros métodos de desinfección (Jiménez, 2015).

La cloración se hace con el fin de hacer un reúso de agua dentro de la instalación portuaria, esta se aplica principalmente durante las operaciones portuarias de movimiento de carga suelta o granel como sal, arena y fosfato, el reúso se hace por medio de la humectación o riego de agua en las vías en la instalación portuaria durante la operación, con el objetivo de dar manejo de aportes de material particulado a la atmósfera, además de reducir el consumo de agua suministrado por el acueducto del Parque industrial Malambo (PIMSA). Este reúso de agua se implementa bajo la normatividad nacional actual aplicable, la resolución 1207 de 2014 expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, donde se establecen las disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas.

Representación gráfica el sistema

Para el diseño del sistema se tuvieron en cuenta las condiciones críticas de trabajo, es decir se tomó un volumen máximo de aguas oleosas que un buque requiere disponer, los valores utilizados en el diseño fueron obtenidos a partir de los resultados de la caracterización de aguas oleosas realizadas a una muestra de agua tomada en la motonave Pensilvania. De acuerdo a lo anterior se diseñó el sistema de filtración.

Para el diseño del sistema se tuvieron en cuenta las condiciones críticas de trabajo, es decir se tomó un volumen máximo de aguas oleosas que un buque requiere disponer, los valores utilizados en el diseño fueron obtenidos a partir de los resultados de la caracterización de aguas oleosas realizadas a una muestra de agua tomada en la motonave Pensilvania. De acuerdo a lo anterior se diseñó el sistema de filtración.

El sistema de filtración por membranas está compuesto por tres partes, decantación, filtración por membranas cerámicas de alúmina y almacenamiento y cloración. A continuación, se muestra una descripción de cada una de las partes del sistema.

Para hacer la representación gráfica se tomaron prototipos de sistemas de filtración por membranas ya implementados y en funcionamiento, las imágenes fueron obtenidas del fabricante de sistemas de filtración por membranas VESEP (Techonologies, 2009).

Decantación

Este proceso se realiza con un tanque de decantación de concreto y forma cúbica, el agua que ingresa al tanque tiene un tiempo de retención de una hora, luego de esto la remoción de las grasas y aceites en la parte superior del tanque se hace por una tubería conectada a un

tanque de almacenamiento de aceite recuperado. En la siguiente imagen se muestra el tanque de decantación.

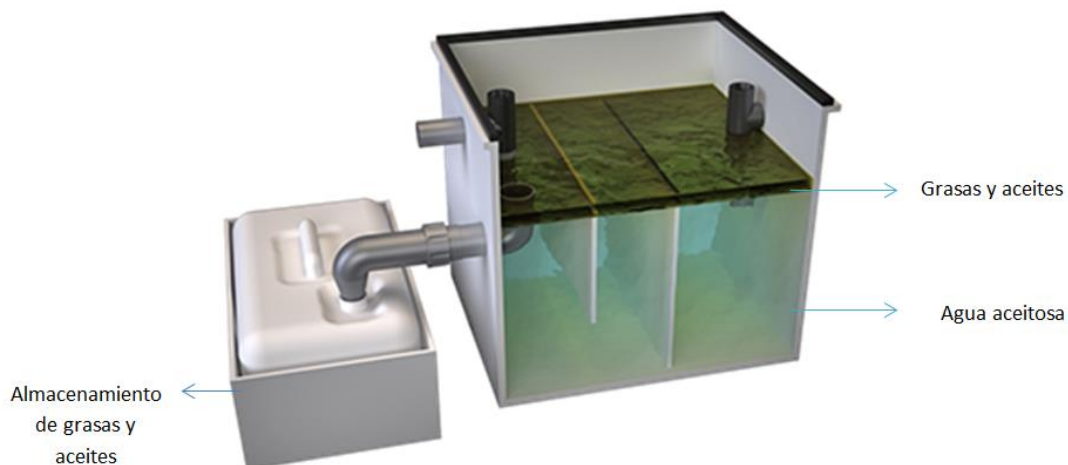


Ilustración 12 Tanque de decantación

(Techonologies, 2009).

Tanque de decantación

Para el diseño y dimensionamiento del tanque de decantación se utilizaron los siguientes parámetros de diseño.

Tabla 12 Parámetros de diseño para el tanque de decantación

Variable	Valor	Unidades
Caudal por tanque	50	m ³ /día
DBO	377	mg/L
Volumen del tanque	50	m ³

Como resultado se obtuvo un tanque de las siguientes dimensiones.

Tabla 13 Dimisiones del tanque de decantación

Variable	Valor	Unidades
Profundidad	3	m
Área	16.67	m ²
Ancho	4.1	m
Largo	4.1	m

Filtración por membranas cerámicas de alúmina

El agua aceitosa es bombeada del tanque de decantación al sistema de filtración, dentro del sistema pasa el agua oleosa, las membranas retienen el aceite y a través de ellas pasa el agua sin aceite, las fases resultantes de la filtración (agua-aceite) son almacenadas por separado en unos cubitanques de 1m³ de capacidad, cuando cumplen su capacidad de almacenamiento son transportados y almacenados. En la siguiente imagen se muestra el sistema de filtración.

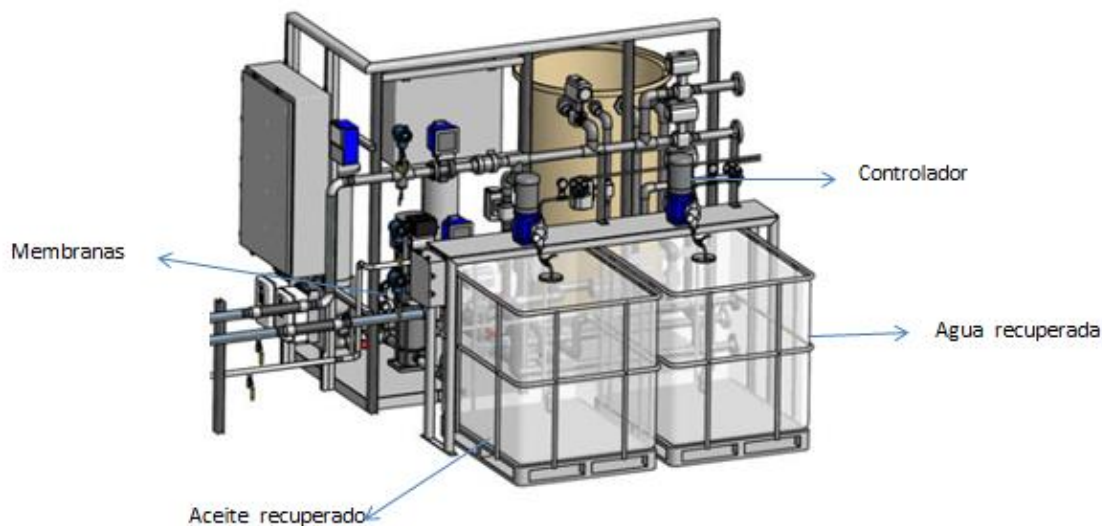


Ilustración 13 Sistema de filtración por membranas de cerámica

(Techonologies, 2009).

Sistema de filtración por membranas

Para el diseño de sistema de filtración por membranas se utilizó una malla de Excel programada y se obtuvieron los siguientes datos de funcionamiento.

Tabla 14 Parámetros de diseño para el sistema de membranas

Variables	Unidades	Valores
Flujo de entrada ($\text{m}^3/\text{día}$)	$\text{m}^3/\text{día}$	50
Flujo promedio permeado	L/h/ m^2	12
Densidad de embalaje de membrana	m^2/m^3	120
Demanda específica de Aire	$\text{m}^3/\text{h/ m}^2$	0.3
Área de Membrana Requerida	m^2	174
Volumen Módulo de membrana	m^3	1

En la tabla anterior se muestran los parámetros de diseño empleados por la membrana para la filtración del agua oleosa. Estos valores son los que se emplean para el funcionamiento del sistema de filtración por membranas para las aguas oleosas. Estos valores fueron calculados por medio de un simulador de Excel diseñado para el dimensionamiento de sistema de membranas.

Sistema filtración por membranas de cerámica alúmina

En la siguiente imagen se muestra el sistema completo de filtración con las dos partes de tratamiento, la decantación y el sistema de membranas.

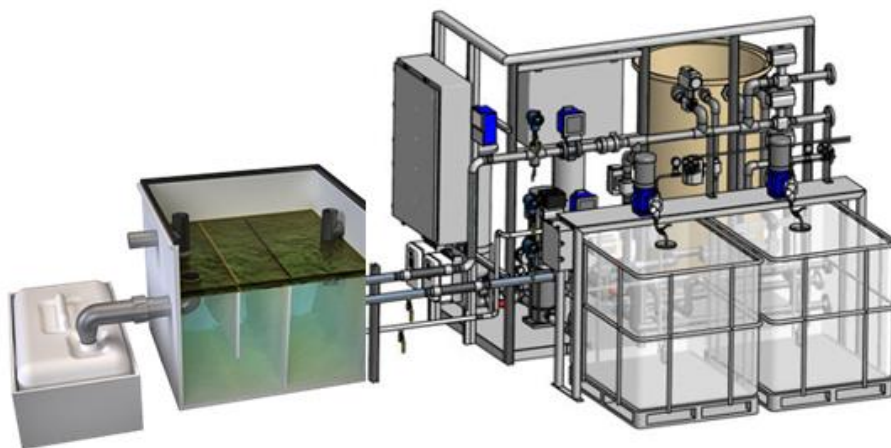


Ilustración 14 Sistema integrado de filtración para aguas oleosas

(Techonologies, 2009).

Dimensiones del sistema

En la siguiente tabla se muestra las dimensiones del sistema, el área total que va a ocupar dentro de la instalación portuaria es de 255 m², tendrá una forma rectangular y estará ubicado encima de una capa de concreto de 0.2 m de espesor, la cual será suficiente para soportar el peso y funcionamiento del sistema.

Tabla 15 Dimensiones del sistema

Variable	Valor
Largo	15.0 m
Ancho	7.0 m
Área	255 m ²
Espesor	0.20 m

Almacenamiento y cloración

Los cubitanques con agua y aceite son ubicados en una zona de almacenamiento temporal, para venta, este almacenamiento está diseñado para proteger el residuo de la luz solar, es una estructura metálica (contenedor), demarcada con los respectivos pictogramas de seguridad.

El servicio de cloración del agua será suministrado por el Parque Industrial Malambo PIMSA.



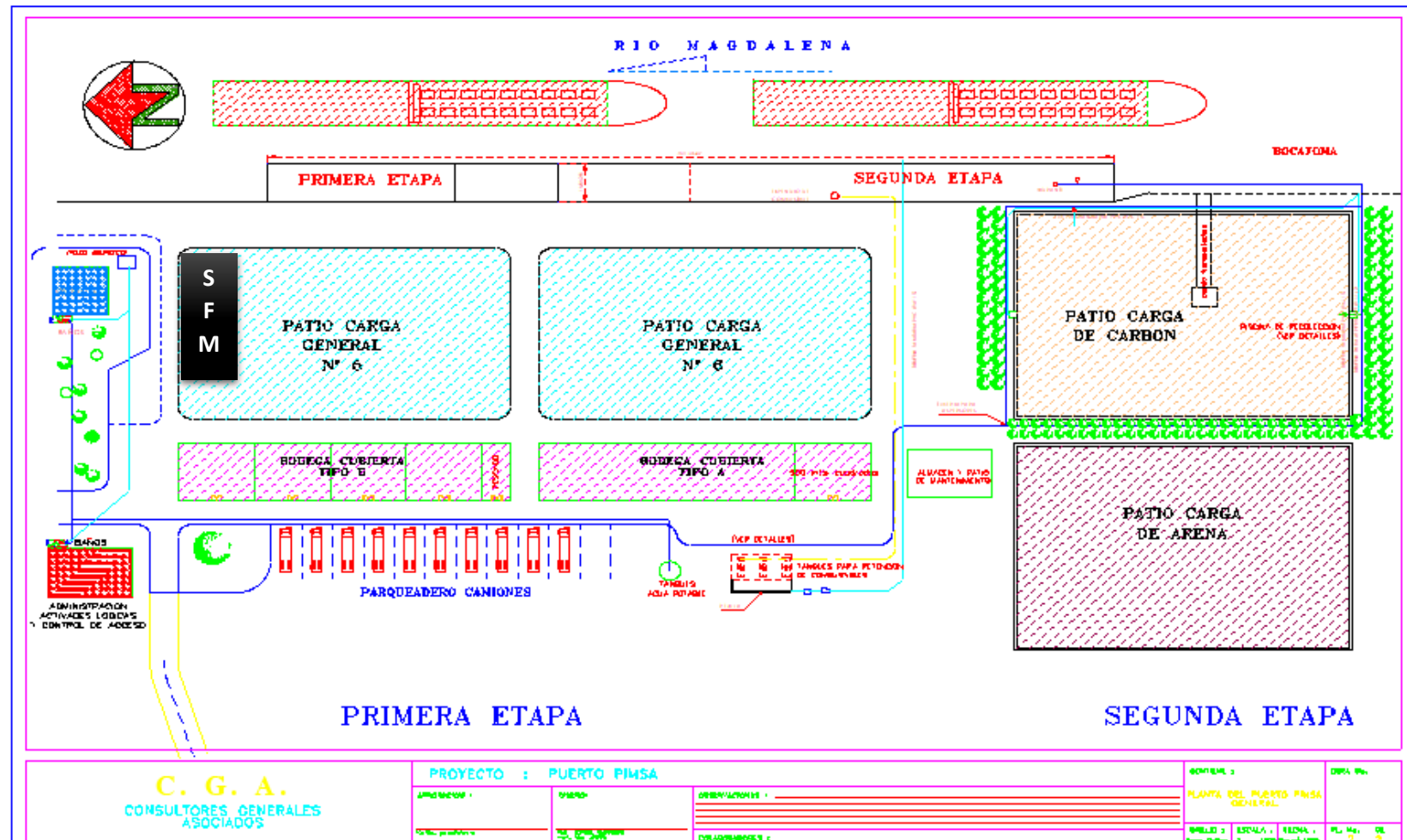
Ilustración 15 Contenedor de almacenamiento

(Solidaria, 2015)

Plano muelle PUERTO PIMSA S.A

La siguiente imagen muestra el plano en planta de la instalación portuaria PUERTO PIMSA S.A, en la parte superior izquierda se observa un recuadro de color negro con las siglas SFM (sistema de filtración por membranas), es allí donde estará ubicado el sistema, este lugar fue propuesto debido a que los buques atracan en sentido Norte-Sur, es decir que la popa (parte trasera del buque) se ubica hacia el Norte. Por la popa es la parte del buque por donde se extraen las aguas oleosas, el lugar propuesto está cercano a la popa lo que facilita la conexión buque- sistema de filtración.

Ilustración 16 Plano de Instalación Portuaria PUERTO PIMSA



Presupuesto

El presupuesto fue planteado con base en información suministrada por empresas que comercializan e implementan plantas de tratamiento de aguas residuales y empresas internacionales especializadas en la fabricación de filtros con membranas de diferentes tipos y materiales. Dentro del presupuesto se incluye la instalación completa del sistema de filtración, el costo de la adecuación del espacio en el muelle para la instalación del sistema, también se incluye un costo para adecuar un laboratorio para hacer pruebas de entrada y salida del agua oleosa con el fin de monitorear la calidad y eficiencia de los procesos del sistema de filtración por membranas. Además de los costos del sistema de filtración, construcción e instalación, se incluye un costo asociado al plan de contingencia y control de riesgo ya que se hace necesario debido a que el fluido a manejar es considera como un residuo peligroso y cabe la posibilidad de algún derrame durante la operación de descargue del residuo líquido oleosas del buque a tierra.

Tabla 16 Presupuesto del proyecto

Item	Descripción	Cant.	v/u	v/t
1	Construcción, transporte e instalación de tanques.	1	\$ 9.800.000	\$ 9.800.000
2	Construcción de bases en concreto y área de patio del sistema de filtración.	1	\$17.500.000	\$ 17.500.000
3	Sistema de cloración.	1	\$ 5.600.000	\$ 5.600.000
4	Almacenamiento de aceite recuperado	1	\$ 4.500.000	\$ 4.500.000
6	Válvula de accesorios de 2" y 4"	1	\$ 6.800.000	\$ 6.800.000
7	Tubería de interconexión carbono	1	\$ 4.900.000	\$ 4.900.000
8	Suministro e instalación Alfa Laval	1	\$51.600.000	\$51.600.000
9	Adecuación laboratorios	1	\$29.800.000	\$29.800.000
10	Sistema de membranas cerámicas de Alúmina	1	\$90.000.000	\$90.000.000

Item	Descripción	Cant.	v/u	v/t
11	Suministro e instalación sistema control de riesgo	1	\$72.000.000	\$72.000.000
Subtotal				\$292.500.000
Imprevisto				\$20.000.000
IVA 19%				\$59.375.000
Total				\$371.875.000

13 Análisis de resultados

Como resultados en la primera fase de este proyecto se reunió información por medio de búsqueda bibliográfica y trabajo realizado en campo, como resultado principal del primer objetivo se obtuvo información primaria sobre los tratamientos y procesos realizados por la empresa RECITRAC S.A.S para hacer el tratamiento y disposición final de las aguas oleosas generadas por los buques.

El proceso de la empresa RECITRAC S.A.S está basado en el uso de cuatro métodos de separación para el tratamiento de las aguas oleosa, los cuales son tecnologías convencionales, los cuales son separación física, centrifugación, bombas de burbujas y adición de químicos para remoción total de aceites. La empresa está enfocada en hacer una remoción total del aceite contenido en el agua, siendo la comercialización de aceites recuperados la principal actividad económica de la misma. El agua que es recuperada durante el proceso de separación es vertida directamente al acueducto de la ciudad de Barranquilla, a esta agua no se le da ningún tipo de uso. La empresa cuenta con los permisos de vertimientos correspondientes y cumple con los parámetros de calidad para hacer el vertimiento.

En comparación con el sistema de filtración por membranas propuesto en este proyecto, el uso de sistemas de separación y remoción de aceites convencionales hacen que el proceso y el tiempo de separación aumente con respecto a los sistemas y tecnologías modernos, pues el uso de membranas en la filtración y tratamiento de aguas oleosas reemplaza los procesos de centrifugación y bombas de burbujas, ya que las membranas de cerámica cuenta con la tecnología de filtración especializada en retener las partículas de aceite y deja pasar el agua a través de la membrana.

Con respecto a las salidas del proceso de separación (agua y aceite) en este proyecto se propone hacer un uso del aceite recuperado de igual manera que lo hace la empresa

RECITRAC S.A.S. A diferencia del agua que es filtrada y recuperada por el sistema de filtración en este proyecto se propone hacer un reúso, el cual consiste en hacer riego de vías para el control de material particulado el cual es generado durante las operaciones de carga y descarga de granel suelto como arena, sal y fosfato; mientras que el uso final del agua que RECITRAC S.A.S es el vertimiento al alcantarillado de Barranquilla. En ambos casos se requiere de un permiso ambiental y el cumplimiento de parámetros para vertimiento y reúso de agua.

En este caso el reúso de agua representará un ahorro económico para PUERTO PIMSA S.A, pues se disminuiría el consumo de agua para riego y humectación de vías y zonas de operación portuaria, el cual es captado directamente del acueducto del Parque Industrial Malambo PIMSA. Con el agua recuperada y cumpliendo con la norma de reúso de agua Resolución 1207 de 2014, emitida por el Ministerio de Ambiente, se hará un almacenamiento adecuado para hacer uso de ella, durante las operaciones de granel suelto.

La caracterización de aguas oleosas generadas por la motonave Pensilvania fue realizada con el objetivo de contar con información real de los componentes y concentraciones de este tipo de agua además de hacer una comparación con los parámetros establecidos por el Convenio Internacional MARPOL. El análisis de la muestra arrojó como resultados los principales componentes y concentraciones del agua oleosa, los parámetros evaluados fueron: DBO₅, DQO, grasas y aceites, sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables, pH, temperatura y densidad, cuales fueron expresados en su unidad de medida correspondiente.

Con respecto a la presencia de DBO₅, DQO en este tipo de aguas, es importante resaltar que es debida a la mezcla de los residuos de cocina y baños del buque, pues son aguas residuales cuyo vertimiento está conectado a los tanques de almacenamiento de las aguas oleosas del buque. Este tipo de vertimientos tiene una alta carga de materia orgánica, pues proviene de la preparación de alimentos y de los sanitarios utilizados por los tripulantes del buque.

El parámetro de grasas y aceites determinado en la caracterización y análisis realizado a la muestra de agua es el más relevante para este proyecto, la concentración obtenida en la muestra fue de 705 mg/L (ver tabla 8), esta concentración está compuesta por grasas y aceites provenientes de las instalaciones sanitarias del buque, la cocina, el lavado de los tanques de almacenamiento interno, mantenimiento de maquinaria, operaciones, residuos de combustible, entre otros procesos donde esté involucrado el uso de aceites. De acuerdo a lo anterior se confirma que el tipo de residuo oleoso que se va a tratar en el sistema de filtración por membranas es de tipo C ya que están compuestos principalmente de residuos de sentinas de cámara de máquinas o de equipos de depuración de combustible y aceites de motores.

La densidad determina en la caracterización fue de 838 kg/m^3 (ver tabla 8), este valor resulta de la mezcla de diferentes componentes entre ellos agua, grasas y aceites, sin embargo, el contenido más alto de grasas y aceites está dado por los hidrocarburos, diésel, gasolina y aceites de motores que resultan de las operaciones, el mantenimiento, limpieza y funcionamiento de la motonave. Los valores de densidad encontrados en el laboratorio fueron agua pura, diésel y gasolina (ver tabla 16) esto con el objetivo de obtener la densidad del agua oleosa de la muestra.

Tabla 17 Densidades de los componentes de la muestra de agua oleosa

Compuesto	Temperatura °C	Densidad kg/m^3
Agua	29.0	996
Diésel	29.0	840
Gasolina	29.0	680
Agua oleosas (muestra)	28.6	838

(Carl Schaschke, 2013)

Los sólidos suspendidos totales hacen referencia al material particulado que se mantiene en suspensión en las corrientes de agua superficial y residual, en este caso provienen de las descargas de las baterías sanitarias y cocina del buque; la concentración de sólidos sedimentables es de 1.5 mg/L (ver tabla 8) la cual es baja en comparación con la de los sólidos totales suspendidos 181.7 mg/L , ya que esta es toda materia que en el agua residual que no permanece en suspensión durante un período predeterminado, su origen se debe a impurezas en los combustibles. Los parámetros de pH, temperatura fueron medidos y analizados para comprobar que la membrana cerámica de Alúmina si pueda resistir este tipo de agua con las características encontradas.

Ahora bien con respecto a la parte económica este proyecto tiene grandes ventajas, debido a que la instalación portuaria PUERTO PIMSA S.A se encuentra dentro del complejo Parque industrial Malambo Pimsa y además hace parte del grupo de empresas pertenecientes al mismo representante legal, esto hace referencia a que en cuanto a la financiación del proyecto este tendrá el apoyo por parte de las empresas asociadas dentro del parque, pues los proyectos son desarrollados en común y participan en ellos las empresas que se benefician directamente, además todas las empresas cuentan con un presupuesto anual de inversión en al área ambiental del Parque Industrial.

Dentro del Parque industrial Malambo Pimsa se encuentran empresas como ACESCO, ALMASA, FERRASA, Aceros Cortados, Willard, entre otras que hacen parte del sector metalúrgico y generan residuos oleosos. Con el desarrollo de este proyecto las empresas harán uso del servicio de tratamiento y disposición final de aguas oleosas ubicado en la instalación portuaria PUERTO PIMSA S.A. lo cual representa una oportunidad de negocio enfocada al uso y beneficio común de un servicio de tratamiento de residuos dentro de Parque Industrial. El proyecto presentará ingresos para PUERTO PIMSA S.A, pues se hará la prestación de servicios de disposición y tratamiento de las aguas oleosa, lo cual ayudará a suplir los gastos de mantenimiento y operación del sistema de filtración.

Con respecto a la parte ambiental, este proyecto trae múltiples impactos positivos en el ambiente, se logrará eliminar el uso de carrotanques que transportan los residuos, desde el lugar de generación hacia el sitio de disposición, contribuyendo a la mejora de calidad del aire con respecto a la emisión de material particulado por el transporte. Todo lo anterior enfocado a la protección y cuidado de la atmósfera e hidrósfera que se ven afectadas por la generación de aguas oleosas y la actividad marítima y portuaria.

Este proyecto aporta de manera significativa a objetivos de desarrollo sostenible debido a su enfoque social, ambiental y económico, sin embargo el objetivo más relacionado con este proyecto es objetivo 14 vida submarina, esto es debido a que se plantea una alternativa tecnológica de tratamiento de agua oleosas generadas por buques, con el fin de minimizar proteger sosteniblemente los ecosistemas marinos y costeros para evitar efectos adversos importantes además de prevenir y reducir significativamente la contaminación marina de todo tipo, basándose en un marco legal internacional de medidas de prevención y control MARPOL.

14 Conclusiones

Para la identificación de los tipos de membranas y sistemas de filtración de aguas oleosas se hizo una revisión bibliográfica y una visita técnica a RECITRAC S.A.S una planta de tratamiento de aguas oleosas ubicada en Barranquilla. Esta visita aportó información para el desarrollo de este proyecto debido a que conoció el funcionamiento de un sistema de tratamiento de aguas oleosas y se obtuvo información primaria la cual fue utilizada en parte en los cálculos y diseño de un sistema de filtración por membranas propuesto en este proyecto.

Actualmente el uso de tecnologías para la disposición final de las aguas oleosas generadas por buques ha ido abarcando el mercado mundial, una de las más usadas es la filtración por membranas, las empresas fabricantes ofrecen gran variedad de membranas de diferentes tipos, tamaños de poro y materiales, dando así usos específicos de filtración, algunas están diseñadas para filtrar sustancias y mezclas específicas. Además, estos sistemas son muy utilizados por su bajo costo de operación, alta eficiencia y fácil operación, en comparación con los métodos convencionales de separación de aguas oleosas.

La membrana cerámica de alúmina fue elegida debido a la combinación entre cerámica y alúmina, pues esta combinación es la más adecuada para hacer la filtración de aguas oleosas con alto contenido de aceites, debido a sus características hidrofilia (afinidad con el agua) deja pasar el agua a través de la membrana y retiene el aceite demostrando eficiencia hasta del 96%. El sistema de membranas de cerámica también fue seleccionado debido al costo de implementación y construcción, pues el costo es menor comparado con el sistema de membranas vibratorias.

El sistema de filtración por membranas fue planteado bajo una “guía de diseño”, en las que se tuvieron en cuenta condiciones críticas de funcionamiento como el volumen máximo de agua oleosa a tratar generados por los buques que llegan al puerto, temperatura máxima del agua oleosa, tiempo de bombeo de buque – sistema, principales componentes del agua oleosa, entre otros. Para el proceso de diseño se utilizaron dos herramientas, Excel donde fue programada la hoja de cálculos bajo la guía de diseño *Biological Wastewater Treatment Processes III: MBR Processes* y el programa de diseño AutoCAD versión 2016 para generar los planos y dimensiones del sistema. El sistema de filtración por membranas se resume en tres partes la fase de decantación, fase de filtración y fase de almacenamiento de agua y aceite como resultado de la filtración

Este proyecto brinda beneficios a nivel ambiental y económico debido a que tiene un alcance de uso común para las empresas dentro del Parque industrial Malambo Pimsa, generando ingresos económicos para PUERTO PIMSA S.A. El proyecto mantiene un enfoque de conservación de la hidrosfera y atmósfera por medio del uso de tecnologías de membranas para tratar aguas oleosas generadas por buques.

15 Recomendaciones

Actualmente existen sistemas de filtración con membranas que traen incorporados, birreactores los cuales están diseñados para bajar y eliminar la carga orgánica del agua por medio de procesos químicos que involucra organismos o sustancias bioquímicamente activas derivadas de dichos organismos. El diseño de este sistema de filtración por membranas podría ser una alternativa recomendada para implementar en la Instalación Portuaria, como un sistema adicional a lo ya propuesto. Se recomienda hacer una evaluación económica y de viabilidad para el diseño e implementación de este sistema combinado, el cual tiene como objetivo eliminar el proceso de cloración propuesto en este proyecto

16 Bibliografía

- Ambiental, U.-P. P. (1989). Unesco. Recuperado el 2018, de Programa Internacional de Educación Ambiental: <http://unesdoc.unesco.org/images/0008/000855/085533SB.pdf>
- Ambiente, C. P. (marzo de 2001). Cómo realizar inspecciones sanitarias en pequeños sistemas de agua. CEPIS. Recuperado el 2018, de Universidad Autónoma Metropolitana: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/fulltext/inspecciones/lec6.pdf>
- Ambiente, M. d. (2016). Ministerio de Ambiente. Obtenido de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/mitigacion/reporte-corporativo-voluntario-de-huella-de-carbono>
- Ambiente, M. d. (2017). *Sistema de gestión de aceites industriales usados España*. Barcelona.
- Asturias, G. d. (2014). Red ambiental de Asturias. Recuperado el marzo de 2018, de Gobierno del principado de Asturias: <http://movil.asturias.es/portal/site/medioambiente/menuitem.1340904a2df84e62fe47421ca6108a0c/?vgnextoid=426bbc41b8db9410VgnVCM10000098030a0aRCRD&vgnnextchannel=8f19001054db9410VgnVCM10000098030a0aRCRD&i18n.http.lan g=es>

- Ayza, M. M. (2017). Membranas de cerámicas de bajo coste para el tratamiento de aguas residuales. *Universidad Jaume de Catelló*.
- Cabrera, D. J. (08 de junio de 2016). Operación óptima de un filtro rotativo de vacío. Obtenido de Tecnológico Nacional de México:
<https://dspace.itcolima.edu.mx/jspui/bitstream/123456789/939/1/TITUTLACI%C3%93N%20INTEGRAL%20Operaci%C3%B3n%20%C3%B3ptima%20de%20un%20filtro%20rotativo%20de%20vac%C3%ADo.pdf>
- Carl Schaschke, I. F. (2013). Density and Viscosity Measurement of Diesel Fuels at Combined High Pressure and Elevated Temperature . *Chemical and Biological Process Engineering* , 1-22.
- Colombia, C. p. (1991). Corte Constitucional. Recuperado el 2018, de <http://www.corteconstitucional.gov.co/inicio/Constitucion%20politica%20de%20Colombia.pdf>
- Colombia, E. c. (1993). Alcaldía de Bogotá. Recuperado el 2018, de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=297>
- Colombia, R. d. (1974). Ministerio de Ambiente. Recuperado el 2018, de Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente: http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto_2811_de_1974.pdf
- Dalsren, B. H. (2013). Environmental impacts of shipping in 2030 with a particular focus on the Arctic region. *Atmos. Chem. Phys.* Volumen (13), 1941–1955.
- Dimar. (1979). Dirección Nacional Marítima. Obtenido de Ministerio de defensa Nacional: <https://www.dimar.mil.co/sites/default/files/Dec1874de1979.pdf>
- Dimar. (2014). Dirección General Marítima. Obtenido de Ministerio de Defensa Nacional: https://www.dimar.mil.co/sites/default/files/res06452014_0.pdf
- Dimar. (19 de Agosto de 2016). Dirección General Marítima. Obtenido de <https://www.dimar.mil.co/sites/default/files/res05092016.pdf>
- Domínguez, A. J. (2014). Universidad de Cádiz. Recuperado el 2018, de Caracterización de membranas cerámicas de nanofiltración: eliminación de metales pesados: <http://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/18956/Guerrero%20Dom%C3%ADnguez%20Antonio%20J.Tes%3%ADs%20m%C3%A1ster.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Farnham, K. (2016). New Logic Research. Recuperado el 2018 de Febrero de 26, de Utilización de Membranas vibrantes para tratar las aguas residuales aceitosas desde

- una instalación de desechos:
<http://www.vsep.com/local/spanish/Estudio.de.Caso.Agua.Aceitosa.pdf>
- Flores, M. L. (2017). Métodos de separación - Complemento 2017. Obtenido de Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco:
<http://www.fcn.unp.edu.ar/sitio/farmacognosia/wp-content/uploads/2017/03/COMPL-TEORICO-UNIDAD-2-M%C3%A9todos-de-Separaci%C3%B3n-2017-FARGNOSI-FCN-UNPSJB.pdf>
- Font, F. S. (2007). Universidad Politécnica de Catalunya Barcelona Tech. Recuperado el 2018, de Estudio y diseño de una planta de producción de membranas cerámicas de coste reducido:
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/4333/Memoria.pdf>
- Gómez, W. R. (2006). Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Obtenido de consideraciones básicas y viabilidad de procesos de membranas de ósmosis inversa y nanofiltración como alternativa para el tratamiento de agua en Colombia:
<http://bdigital.unal.edu.co/1924/1/williamramirezgomez.2006.pdf>
- Greg Johnson, L. (2006).
Una comparación de Métodos del Tratamiento Convencionales y los de VSEP, un Sistema de Filtración por Membranas Vibratorias. Emeryville:
New Logic Research. Recuperado el 2018 de Febrero de 26
- Guillermo Calvo Brenes, J. M. (2010). Universidad de la Rioja. Tecnología en marcha, 94-106. Obtenido de Universidad de la Rioja:
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4835858.pdf+&cd=2&hl=es-419&ct=clnk&gl=co>
- Harlan H. Bengtson, P. P. (2015). *Biological Wastewater Treatment Processes III: MBR Processes*. Texas: CED Engineering PDH for the professional .
- ICT, I. C. (2009). Instrumentación Científico Técnica. Obtenido de Microfiltración:
<http://www.ictsl.net/downloads/filterlab2009microfiltracion.pdf>
- INVEMAR. (2016). INVEMAR. Obtenido de Diagnóstico y Evaluación de la Calidad de las Aguas Marinas y Costeras en el caribe y Pacifico Colombianos 2016:
<http://www.invemar.org.co/documents/10182/14479/Informe+REDCAM+2016.pdf/b21d50f5-cd2d-4926-a016-b321cc9659e7>
- J.M. Benito, M. S. (2007). Development of a new high porosity ceramic membrane for the treatment of bilge water. *Desalination* , volumen (214) ,91-101

- Jiménez, C. d. (2015). Cloración en los procesos de tratamiento de aguas residuales urbanas. *Aguasresiduales.info*, 17-22.
- Kerstin Magnussona, J. P. (2018). Risk assessment of bilge water discharges in two Baltic shipping lanes. *Mar. Pollut. Bull. Volumen (126)*, 575-584
- Lenntech. (Febrero de 2015). Lenntech. Obtenido de <https://www.lenntech.es/tecnologia-de-membrana.htm>
- Lia, X. H. (2015). Treatment of oily waste water by PVP grafted PVDF ultrafiltration membranes . *CEJ – Chem. Eng. J.*, Volumen (273), 421-429
- Magnusson, P. T. (2017). Toxicity of treated bilge water: The need for revised regulatory control. *Mar. Pollut. Bull, Volumen (114)*, 860-866.
- Manahan, S. E. (2014). Química Ambiental Principios Básicos de Química Ambiental en Español. En S. E. Manahan, *Química Ambiental Principios Básicos de Química Ambiental en Español* (págs. 8- 18). Columbia, MO: Reverté S.A.
- Marin, J. (2016). Instituto de tecnología PCE. Recuperado el 2018, de <http://www.pce-iberica.es/instrumentos-de-medida/instrumentos-laboratorios/tecnicas-separacion.htm>
- Maya, E. (2014). *Universidad Nacional Autónoma de México*. Obtenido de http://arquitectura.unam.mx/uploads/8/1/1/0/8110907/metodos_y_tecnicas.pdf
- Michele Monroe. (2016). Vival Water technologies. Recuperado el 2018, de Caso de estudio Recuperación de Aceites con Membranas: <https://vwt.jimdo.com/folleto-general/membranas-vibratorias-vsep/recuperaci%C3%B3n-de-aceites/>
- Moreda, D. B. (2014). Cambio climático y desarrollo sostenible Bases conceptuales para la educación en Cuba . En D. C. Gutiérrez, *III. El desarrollo sostenible: conceptos básicos, alcance y criterios para su evaluación*. (págs. 96-113). La Habana : Educación Cubana.
- Omi. (1977). Organización Internacional Marítima. Obtenido de [http://www.imo.org/es/about/conventions/listofconventions/paginas/international-convention-for-the-prevention-of-pollution-from-ships-\(marpol\).aspx](http://www.imo.org/es/about/conventions/listofconventions/paginas/international-convention-for-the-prevention-of-pollution-from-ships-(marpol).aspx)
- OMI, O. M. (2016). Dimar. Obtenido de Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques (MARPOL): <https://www.dimar.mil.co/content/convenio-internacional-para-prevenir-la-contaminacion-por-buques-1973-y-su-protocolo-de-19-0>

- Padaki, R. S. (2015). Membrane technology enhancement in oil–water separation. A review. *Desalination*, volumen (357), 197-207.
- Pantoja, J. L. (2007). Escuela de Organización Industrial. Recuperado el 2018, de Desechos generados por buques y residuos de carga: <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:N8MqTTiZ5N8J:https://www.eoi.es/es/file/18544/download%3Ftoken%3D0f3LKpuN+&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=co>.
- Peintar. (2015). Water Purificación. Obtenido de Guía de soluciones de ultrafiltración f reshpoint: <http://waterpurification.pentair.com/Files/KnowledgeBase/ItemDownload/en/42680-s.pdf>
- PIMSA. (2014). PIMSA. Recuperado el 28 de 07 de 2018, de Parque Industrial Malambo Pimsa: <http://www.pimsa.com.co/informacion-corporativa/>
- PIMSA, P. (Julio de 2018). Plan de gestión integral de residuos sólidos. Barranquilla.
- PNUMA. (1984). PUMA. Recuperado el 2018, de http://www.pnuma.org/deat1/pdf/geoamazonia_spanish_FINAL.pdf
- Rodriguez, M. (2014). Sistemas de ósmosis inversa. Ionic Systems, 25-27. Obtenido de <https://www.ionicsystems.com/es/reverse-ósmosis/>
- Sanaa Jamaly, A. G. (2015). Recent improvements in oily wastewater treatment: Progress, challenges, and future opportunities. *J. Environ. Sci.* Volumen (37), 15-30.
- Sempere, E. M. (2013). Filtración cerámica para el tratamiento y reutilización de aguas aceitosas de origen industrial. *Tecnoagua*, 64-69.
- Song, A. K. (2010). The environmental impacts of pollutants generated by routine shipping operations on ports. *Ocean & Coastal Management*. Volumen (53) 301-311
- Solidaria, F. d. (2015). *Manual de gestion integral de residuo peligrosos* . Bogotá .
- Stetson, H. P.-P. (2015). Vessels, risks, and rules: Planning for safe shipping in Bering Strait. *Marine Policy*. volumen (51), 119-127
- Uat(2014). *Sistemas de Nanofiltración*. Obtenido de http://www.uatteam.com/residencial_nanofiltracion.html

Verbel, L. P. (2016). *Perfil toxicológico de los sedimentos del Río Magdalena usando como modelo biológico Caenorhabditis elegans*. Sevilla: Unión de Editoriales universitarias Españolas.

Yactayo, V. M. (2015). *Capítulo 9*. Recuperado el 2018, de Manual I: filtración:
<http://www.ingenieroambiental.com/4014/nueve.pdf>