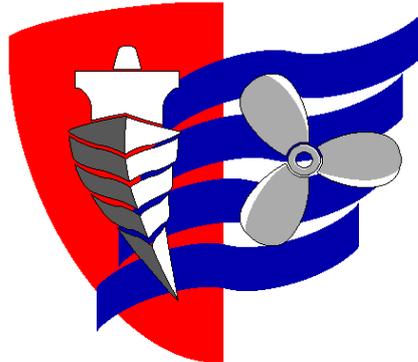


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**TRATAMIENTO Y VERTIDO DE AGUAS
RESIDUALES POR BUQUES EN ZONAS
ESPECIALES: GESTIÓN DE LODOS
GENERADOS POR EL PROCESO**

*TREATMENT AND DISCHARGE OF WASTEWATER FROM
SHIPS IN SPECIAL AREAS: MANAGEMENT OF SLUDGE
GENERATED DURING THE PROCESS*

Para acceder al Título de Grado en

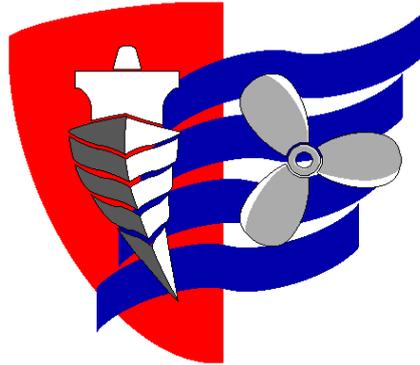
INGENIERÍA MARÍTIMA

Autor: Iván Santiago Díaz

Directora: Belén Río Calonge

Marzo - 2017

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**TRATAMIENTO Y VERTIDO DE AGUAS
RESIDUALES POR BUQUES EN ZONAS
ESPECIALES: GESTIÓN DE LODOS
GENERADOS POR EL PROCESO**

***TREATMENT AND DISCHARGE OF WASTEWATER FROM
SHIPS IN SPECIAL AREAS: MANAGEMENT OF SLUDGE
GENERATED DURING THE PROCESS***

Para acceder al Título de Grado en

INGENIERÍA MARÍTIMA

Marzo - 2017

Resumen	7
Palabras clave	7
Summary	8
Keywords.....	8
1 Planteamiento del problema	10
1.1 Concepto de aguas residuales de los buques. Tipos	11
1.1.1 Aguas grises	12
1.1.2 Aguas negras.....	12
1.2 Aspecto	12
1.2.1 Aguas residuales frescas.....	12
1.2.2 Aguas residuales sépticas	13
1.2.3 Aguas residuales estabilizadas	13
1.3 Composición del agua residual. contaminantes aguas residuales .	13
1.3.1 Características físicas.....	14
1.3.2 Características químicas.....	14
1.3.3 Características biológicas	15
1.4 Principales características a controlar en las aguas residuales	15
1.4.1 Recuento estándar de coliforme totales (Coli).....	16
1.4.2 Sólidos suspendidos totales (TSS).....	16
1.4.3 Demanda biológica de oxígeno (BOD/BOD ₅)	17
1.4.4 Demanda química de oxígeno (COD)	17
1.4.5 pH	18
1.4.6 Cloro o sus compuestos	18
1.4.7 Nitrógeno total	19
1.4.8 Fosforo total.....	19
1.5 Legislación marítima aplicable a las aguas residuales	20

1.5.1	Convenios internacionales.....	20
1.5.1.1	Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques.....	21
1.5.1.2	Anexos convenio MARPOL 73/78.....	22
1.5.2	Convenios regionales	26
1.5.2.1	Ártico	26
1.5.2.2	Antártico	27
1.5.2.3	Código internacional para los buques que operan en aguas polares (Código polar).....	28
1.5.2.4	DE 57/11/14	28
1.5.3	Convenios nacionales.....	28
1.5.3.1	Estados Unidos (excepto Alaska)	29
1.5.3.2	Alaska.....	31
1.5.3.3	Canadá.....	33
1.5.4	Leyes locales	35
1.5.4.1	California	36
1.5.4.2	Maine.....	36
1.5.4.3	Washington, Hawái y Florida	37
1.5.5	Cuadro resumen sobre los requisitos de vertido adecuados para cada legislación	38
2	Metodología	41
2.1	Tecnologías de tratamiento de aguas residuales usadas en los buques	41
2.1.1	Acumulación y gestión de aguas residuales.....	42
2.1.2	Pretratamiento de aguas residuales	42
2.1.3	Oxidación de las aguas residuales	43
2.1.3.1	Tratamiento químico	43

2.1.3.2	Tratamiento biológico	43
2.1.4	Clarificación y filtración de aguas residuales	44
2.1.5	Desinfección de aguas residuales	45
2.1.6	Tratamiento de lodos	45
2.2	Unidades de tratamiento de agua residual en los buques	46
2.2.1	Sistemas convencionales de tratamiento biológico (sistema de lodos activos)	47
2.2.1.1	Zona biológica	47
2.2.1.2	Zona de sedimentación de decantación	48
2.2.1.3	Zona de tratamiento	48
2.2.2	Sistemas de tratamiento físico-químico	49
2.2.2.1	Electro-cloración	49
2.2.2.2	Coagulación-floculación	50
2.2.3	Sistemas avanzados de tratamiento de agua residual (AWS)	51
2.2.3.1	Reactor biológico de membrana- MBR (membrane bioreactor)	52
2.2.3.2	Reactor biológico de lecho móvil- MBBR (moving bed biofilm reactor)	55
2.2.3.3	Tratamientos terciarios	56
3	Desarrollo	61
3.1	Objetivo del estudio	61
3.1.1	Cálculo de la caudal de agua residual sin tratar que se produce	62
3.1.2	Determinación del valor de BOD ₅ de agua residual sin tratar	63
3.1.3	Determinación de la producción total de lodos	66
3.1.3.1	Cálculo de lodos para un sistema convencional de tratamiento biológico de lodos activos	67

3.1.3.2	Cálculo de lodos para un reactor biológico de membran-MBR	68
3.1.3.3	Cálculo de lodos para un reactor biológico de lecho móvil – MBBR.....	70
3.2	Gestión de los lodos producidos por los procesos	71
3.2.1	Espesado	72
3.2.2	Estabilizado	73
3.2.3	Deshidratado	74
3.2.4	Secado térmico	75
3.2.5	Eliminación de los lodos (incineración).....	77
3.2.5.1	Anexo VI del convenio MARPOL 73/78. Regla 16.....	78
3.2.5.2	Incinerador	78
4	Conclusiones	81
5	Referencias bibliográficas.....	85
5.1	Legislación	85
5.2	Webgrafía	87

RESUMEN

Es ampliamente conocida la capacidad de depuración del mar para cierto tipo de contaminantes, lo cual ha hecho que el mar sea utilizado como un elemento de tratamiento de las aguas residuales, naturalmente esa utilización del mar como parte de un sistema de tratamiento de las aguas residuales constituye un uso del dominio público creándose un conflicto con otros usos que se vienen realizando de este, cuya demanda van aumentando cuanto más nos acerquemos a la línea de costa, además de representar un riesgo para el ecosistema de la zona. Estas razones han ocasionado la necesidad de crear una legislación que someta al vertido a ciertas restricciones.

La legislación existente trata de regular los vertidos que se realizan en el mar, tanto los vertidos procedentes desde tierra, como los producidos por los buques, limitando o prohibiendo el vertido si el efluente no cumple unas características determinadas, aunque existen diferencias entre la legislación marina y terrestre que hacen que no siempre coinciden en los valores límite del efluente, aunque se vierta en la misma zona marina. Para evitar dichas diferencias, algunos países han promovido que se creen o creado legislaciones especiales más restrictivas para las áreas marítimas de su influencia, las cuales reducen los valores límite que las legislaciones marítimas internacionales existentes aplican.

La aplicación de valores de vertido más restrictivos ha generado la necesidad de mejorar los sistemas de tratamiento que se venían utilizando para cumplir las condiciones de vertido anteriores. Dichas mejoras implican la utilización de nuevas técnicas o tecnología las cuales modifican parcial o total de los sistemas anteriores de tratamiento de aguas.

Todos los tratamientos de las aguas residuales generan un residuo final denominados lodos, cuya cantidad esta generada por las concentraciones de los afluentes y las necesidades de vertido del efluente, lo cual genera que contra más restrictivo sea el vertido, mayor será la cantidad de lodos producidos para un mismo afluente. Los lodos producidos generan la necesidad de una gestión eficaz que minimice o elimine los problemas de eliminación y espacio que ocupan, las cuales se trataran de buscar en este trabajo.

PALABRAS CLAVE

Aguas residuales, planta tratamiento agua residual, lodos, MARPOL73/78 anexo IV, incinerador

SUMMARY

The sea treatment capacity of different pollutants is widely known. This fact has made sea water an essential element in the treatment of sewage. By all means, the use of sea water as part of a treatment system of sewage falls within the category of public domain, creating a conflict with other traditional uses of the sea, whose demand is more pressing as we approach the coastline, apart from posing a risk for the ecosystem of the area. These reasons have created the need for a legislation to make sewage subject to certain restrictions.

The current legislation tries to regulate sea sewage, both waste coming from the land and from the ships, limiting or prohibiting the sewage if the effluent does not comply with certain characteristics, although there are differences between sea and land legislation. This makes that sometimes effluent limit values do not always coincide although sewage is poured in the same marine zone. In order to avoid these differences, some countries have promoted the creation of special and more restricted legislation for the marine zones of their influence, which reduce the limit values applied by the international maritime legislation.

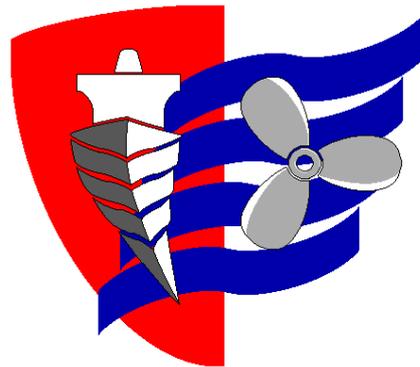
The use of more restricted sewage values has generated the need to improve the treatment systems which were traditionally used to fulfil the former sewage conditions. These improvements mean the use of new techniques or technologies, which partly or completely modify the former systems of water treatment.

Every sewage treatment generates a final waste, known as mud, whose amount is produced by the concentrations of the effluents and the pouring needs of the effluents. This means that the more restrictive the pouring is, the bigger the amount of mud produced by the same affluent. Produced mud generates the need for an efficient management to minimize or eliminate the disposal and space problems. The measures to achieve that effective management of produced mud will be studied in our work.

KEYWORDS

Sewage water, sewage treatment plant, sludge, MARPOL73/78 annex IV, incinerator

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a la superficie y profundidad de los océanos, desde la antigüedad se ha creído que podrían ser utilizados como vertedero de basuras y sustancias químicas en cantidades ilimitadas sin que esta acción tuviera repercusiones de importancia, sustentando sus argumentos en la dilución de la contaminación en el medio marino.

En la actualidad se ha demostrado que dicha política de dilución ha contribuido a generar graves problemas de contaminación en algunas zonas del planeta, las cuales ponen en peligro la supervivencia del ecosistema de dichas áreas. Claros ejemplos son las islas de plásticos que recorren los océanos y siguen creciendo, con los consiguientes riesgos que generan dichos residuos y la descomposición de estos al ecosistema e incluso al ser humano como consumidor final de pescado.

Dicha contaminación constante ha generado una degradación importante especialmente en las zonas costeras, la cual se ha incrementado notablemente en los últimos tres siglos debido al aumento de la actividad industrial, agraria y las poblaciones costeras. Esta contaminación es producida principalmente por plaguicidas, herbicidas, fertilizantes químicos, detergentes, hidrocarburos, aguas residuales, plásticos y otros sólidos.

Como solución al problema de la insostenibilidad de la filosofía de la dilución se han venido creando muchas leyes y protocolos nacionales e internacionales que prohíben o regulan el vertido de sustancias nocivas en el mar, con la finalidad de mantener los ecosistemas marinos y las áreas cercanas a la costa en un estado de conservación adecuado.

Una parte de las leyes y protocolos creados para prevenir dicha contaminación del mar afectan directamente a los buques y artefactos marinos, ya que desde estos se genera una parte importante de los vertidos que se realizan al mar. Dichos vertidos pueden ser de diferente naturaleza dependiendo de cuál sea la causa que los produce, pudiendo ser producidos por la tripulación y/o el pasaje, por limpiezas de los tanques de carga, emisiones o fugas de las máquinas del buque, etc., por lo que se hace

necesario una diversificación de la legislación dependiendo el tipo de vertido que se quiera controlar.

Uno de los vertidos a los que la legislación presta atención es el vertido de aguas residuales generadas por la tripulación y pasaje de los buques, las cuales tienen una carga contaminante importante que debe de gestionarse de un modo adecuado para evitar que generen un riesgo de contaminación. Esta legislación es especialmente restrictiva en los vertidos que se pueden realizar en ciertas zonas sensibles o especiales, exigiendo que los vertidos que se realizan cumplan unos requisitos más severos, e incluso exigiendo a cierto tipo de buques la descarga de las aguas residuales a plantas especializadas en la que se realice una gestión adecuada de las aguas residuales.

Los tratamientos requeridos para adecuar el vertido a las exigencias requeridas por la legislación generan un residuo producido por la depuración del agua el cual debe ser gestionado de un modo adecuado, debido a que no se puede verter al mar. Durante este trabajo se intentará ver los diferentes sistemas de tratamiento que existen en el mercado, ver las cantidades de residuos que generan y buscar una solución adecuada para dichos residuos.

1.1 CONCEPTO DE AGUAS RESIDUALES DE LOS BUQUES. TIPOS

Las aguas residuales se pueden definir como aquellas aguas que por uso del hombre representan un peligro y deben ser desechadas, debidos a que contienen gran cantidad de sustancias y/o microorganismos. Las aguas residuales de los buques son las generadas por el normal funcionamiento de la actividad en la habilitación de un buque, las cuales se podrían asimilar a cualquier sistema de saneamiento urbano y dentro de estas se pueden dividir en dos tipos o categorías: aguas grises y aguas negras, las cuales provienen de fuentes diferentes.

1.1.1 Aguas grises

Aguas grises son aquellas aguas generadas a partir de actividades domésticas tales como lavandería, lavavajillas y baño. Las fuentes de aguas grises en un buque son:

- Fregaderos - de fregaderos de cocinas y lavabos de cabinas de tripulación, pasaje y aseos.
- Duchas - de duchas de la acomodación de la tripulación y el pasaje.
- Lavandería - de lavado de ropa

1.1.2 Aguas negras

Aquella agua residual que contiene material fecal y/o orina se denomina aguas negras. Las fuentes de aguas negras en un buque son:

- Fecales o servidas - de la acomodación de los tripulantes y el pasaje, o de animales vivo que transporten
- Médicas - del hospital enfermería del buque.

1.2 ASPECTO

El aspecto de las aguas residuales difiere según las condiciones o estado en el que se encuentre, de esta forma, podemos distinguir entre:

1.2.1 Aguas residuales frescas

Como su nombre indica, son las aguas residuales en su estado inicial, inmediatamente después de que se hayan agregado los sólidos al agua. Contienen el oxígeno disuelto presente en el agua y permanecen frescas mientras haya oxígeno suficiente para mantener la descomposición aeróbica. Estas aguas son turbias, con sólidos en suspensión y flotando, de color grisáceo y tienen un olor mohoso no desagradable.

1.2.2 Aguas residuales sépticas

Este término describe a las aguas residuales en las que se ha agotado completamente el oxígeno disuelto, de manera que los sólidos han entrado en descomposición anaeróbica con la consiguiente producción de ácido sulfhídrico y de otros gases. Tales aguas se caracterizan por su color negruzco, su olor fétido y desagradable, y por tener sólidos suspendidos y flotantes de color negro.

1.2.3 Aguas residuales estabilizadas

Son aquellas aguas en las que los sólidos han sido descompuestos hasta sólidos relativamente inertes que no están sujetos a descomposiciones posteriores, o que son descompuestos muy lentamente. El oxígeno disuelto está nuevamente presente por haber sido absorbido de la atmósfera; su olor es ligero o nulo, y tiene pocos sólidos suspendidos.

1.3 COMPOSICIÓN DEL AGUA RESIDUAL. CONTAMINANTES AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales de un buque tienen una composición más o menos uniforme, lo cual facilitará los procesos de tratamiento, aun así la composición varía influenciada por algunos factores como son los hábitos alimentarios, consumos de agua, productos de limpieza, etc.

La composición, al igual que la cantidad de agua residual, sufre variaciones respecto al tiempo. Varía en el transcurso de las distintas horas del día, en función de los días de la semana y se presentan variaciones estacionales (Espigares y cols., 1985).

Tres grupos de caracteres se pueden tener en cuenta para los diferentes componentes del agua residual:

- Físicos
- Químicos
- Biológicos

1.3.1 Características físicas

Las características principales que definen a las aguas residuales son:

- Temperatura
- Turbidez
- Color
- Sólidos
- Olor
- Densidad

1.3.2 Características químicas

Hay una serie de parámetros que sirve para describir composición de las aguas residuales, los cuales se pueden subdividir dependiendo del tipo de materia que los produce (Espigares y cols.,1985).

- Materia orgánica
 - ❖ Demanda biológica de oxígeno (DBO-)
 - ❖ Demanda química de oxígeno (DQO)
 - ❖ Carbono orgánico total (COT)
 - ❖ Demanda total de oxígeno (DTO)
 - ❖ Demanda teórica de oxígeno (DTeO)
- Materia inorgánica
 - ❖ pH

- ❖ Cloruros
- ❖ Alcalinidad
- ❖ Nitrógeno
- ❖ Fósforo
- ❖ Azufre
- ❖ Compuestos tóxicos

- ❖ Metales pesados

- ❖ Gases
 - Oxígeno disuelto
 - Sulfuro de hidrógeno
 - Metano

1.3.3 Características biológicas

Las aguas residuales debidas a su naturaleza pueden contener un gran número de organismos, donde la temperatura y el pH influyen que tipos de organismo se desarrolla o proliferan más en detrimento de otros (Espigares y cols., 1985). Los principales grupos de organismos que se pueden encontrar en el agua residual son:

- Bacterias
- Virus
- Algas
- Protozoos
- Hongos

1.4 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS A CONTROLAR EN LAS AGUAS RESIDUALES

Aunque como se ha descrito anteriormente existe un número importante de factores que pueden ayudar a caracterizar a las aguas residuales, se seleccionan algunos valores para conocer el potencial contaminante de las

aguas residuales y poder así establecer valores de referencia adecuados (Aejjelts et al., 2012).

1.4.1 Recuento estándar de coliforme totales (Coli)

Se denomina genéricamente coliformes a un conjunto de especies de bacterias que tienen una relevancia importante como indicadores de la contaminación del agua y los alimentos. Normalmente los coliformes presentes en las aguas residuales son de origen fecal, aunque existen algunos de otra naturaleza.

La medición de la cantidad de coliformes en las aguas residuales indica de un modo proporcional el grado de contaminación del vertido, y su ausencia asegura un vertido bacteriológicamente seguro.

Una vez realizado el análisis para conocer la cantidad de coliformes, el resultado se expresa como UFC/100mL (unidades formadoras de coloniasX100mL de muestra).

1.4.2 Sólidos suspendidos totales (TSS)

Este parámetro indica la cantidad de sólidos que se encuentran en suspensión en el agua residual y que pueden ser separados del agua por medio de medios mecánicos (filtros, separadores centrífugos, etc.) y evaporada el agua que puedan contener, la cantidad total es la suma de los sólidos fijos y de los sólidos volátiles, estos últimos son los que desaparecen después de someter la muestra a 550°C de temperatura durante un periodo de tiempo. La medida de SST se expresa en mg/L.

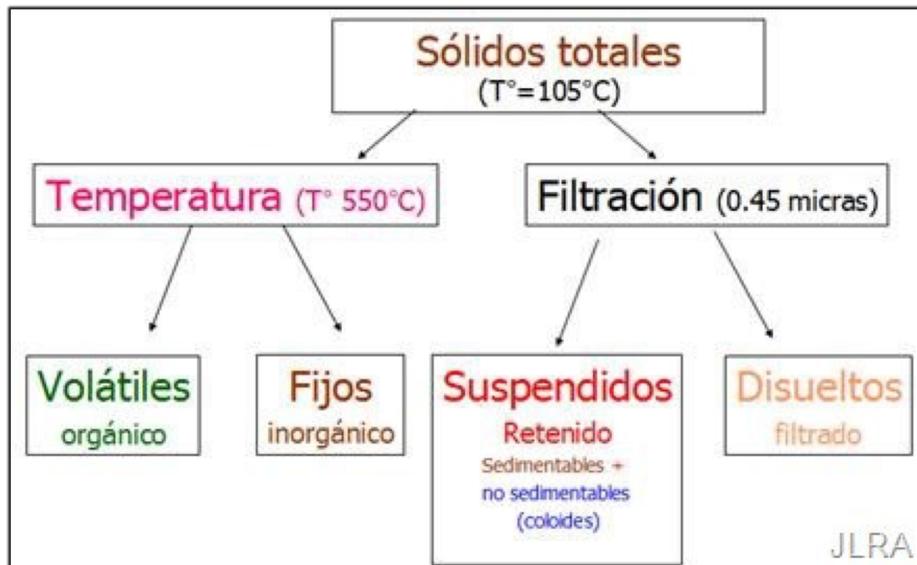


Figura 1. Clasificación de los sólidos en suspensión totales (Triple enlace, 2016)

1.4.3 Demanda biológica de oxígeno (BOD/BOD₅)

Es un parámetro que mide la cantidad de oxígeno que necesitan los organismos presentes en el agua residual para biodegradar la materia orgánica que contiene dicha agua, de este modo se puede conocer la cantidad de materia que puede ser consumida u oxidada biológicamente.

La prueba que se realiza para calcular dicha demanda biológica de oxígeno dura 3 o 5 días, por lo que se expresa como BOD (3 días) y BOD₅ (5 días) y los valores que se desprenden de dicha prueba se expresan en mgO₂/L.

1.4.4 Demanda química de oxígeno (COD)

Es un parámetro que mide la cantidad de materia disuelta en suspensión en el agua residual que puede ser oxidado por medios químicos, es otro indicador para conocer el grado de contaminación que posee el agua residual. Aunque sirve para conocer la concentración de materia orgánica que hay en el agua,

ésta no es precisa ya que también se oxidan por acción de los productos químicos otras sustancias inorgánicas.

Siempre el valor obtenido de demanda química de oxígeno es superior a la demanda biológica de oxígeno (aproximadamente el doble), ya que con este método se oxidan también las sustancias no biodegradables. Las unidades en las que se expresa COD son mgO₂/L.

1.4.5 pH

El pH (potencial de hidrógeno) sirve para medir la acidez o alcalinidad de una disolución. El pH nos indica la concentración de iones de hidrógeno (H)⁺ que están presentes en cualquier disolución.

En las disoluciones acuosas los valores de pH varían desde 0 a 14, siendo ácidas las disoluciones con valores menores de 7 y alcalinas o básicas las de pH superiores a 7. Una disolución neutra es aquella que tiene un pH igual a 7.

Las aguas residuales se deben de mantener dentro de unos valores de pH de 6,5 a 8,5, ya que unos valores fuera de este rango pueden afectar a la vida biológica de la zona donde se vierta, además de que es más difícil tratar dicho agua residual por medio de tratamientos biológicos.

1.4.6 Cloro o sus compuestos

El cloro es un desinfectante cuyo uso está muy extendido para el tratamiento de aguas residuales ya que elimina gran parte de los organismos presentes en estas aguas al ser éstos inactivados mediante la oxidación de la materia celular. Es una tecnología cuyo uso está muy extendido debido a que es muy eficiente en relación calidad/costo respecto de otras tecnologías utilizadas para la desinfección de aguas residuales.

Por el contrario, la utilización de cloro para la desinfección, hace que una parte de éste (cloro residual) puede permanecer en el efluente de agua residual prolongando el efecto de desinfección aun después de haber sido vertido al mar, este cloro aun en concentraciones muy bajas es tóxico para los organismos acuáticos, por esta razón se deben de tomar medidas para evitar que el efluente tenga unas concentraciones perjudiciales por medio de la descloración o el uso de otras tecnologías de desinfección (ozono, radiaciones ultravioleta, etc.).

1.4.7 Nitrógeno total

El nitrógeno es un elemento de importancia en el tratamiento biológico de las aguas residuales, ya que si no lo contienen en unas cantidades adecuadas pueden generarse problemas importantes, porque el nitrógeno es un elemento necesario para el crecimiento de los microorganismos que intervienen en el proceso. De ese mismo modo, un exceso de nitrógeno, puede generar una población elevada de microorganismos con el consiguiente agotamiento del oxígeno disuelto y la eutrofización (acumulación de residuos orgánicos) de las aguas donde se produzca el vertido de las aguas residuales.

El nitrógeno total es la suma de sus cuatro formas básicas:

- Nitrógeno básico
- Amonio (NH_4)
- Nitrito (NO_2^-)
- Nitrato (NO_3^-)

1.4.8 Fosforo total

Es junto con el nitrógeno uno de los componentes de las aguas residuales más importantes para el crecimiento y desarrollo de los microorganismos, y un defecto o exceso en sus proporciones puede generar los mismos problemas que el nitrógeno.

El fosforo total es suma de las tres formas en las que se puede encontrar:

- Ortofosfatos solubles
- Polifosfatos inorgánicos
- Fosfatos orgánicos

Los ortofosfatos son la forma más fácilmente asimilable por los microorganismos.

1.5 LEGISLACIÓN MARÍTIMA APLICABLE A LAS AGUAS RESIDUALES

Para solventar los problemas que genera el vertido de aguas residuales en el mar se han venido desde hace tiempo aprobando leyes y normativas con la finalidad de controlar y evitar el vertido de aguas residuales al mar.

Dichas leyes y normativas buscan la participación e implicación de la mayoría de los estados y organismos internacionales en la defensa y protección de los mares y océanos de todo el mundo.

En base a eso se pueden encontrar diferentes niveles legislativos y de implicación:

- Convenios internacionales
- Convenios regionales
- Legislación nacional
- Leyes locales

1.5.1 Convenios internacionales

Son un conjunto de acuerdos llevados a cabo por diferentes Estados o entre Estados y otros Organismos que producen efectos jurídicos a nivel internacional y en los que todas las partes implicadas se comprometen a

cumplir y respetar el contenido acordado en el instrumento escrito o establecido verbalmente.

Con ello se busca que el mayor número de países se comprometan en la lucha y control de la contaminación.

El Convenio principal que existe referente a la lucha contra la contaminación marina es el Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques (MARPOL 73/78).

1.5.1.1 Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques

El convenio MARPOL 73/78 es un Convenio Internacional creado para Prevenir la Contaminación por los Buques, de 1973 modificado por el Protocolo de 1978.

El convenio MARPOL 73/78 es una de las más importantes convenciones ambientales marinas internacionales, fue desarrollado por la Organización Marítima Internacional (IMO), en un esfuerzo para reducir al mínimo la contaminación de los mares y océanos, incluyendo los desechos, el petróleo y la contaminación del aire. El objetivo de este convenio es el de preservar el medio ambiente marino en un intento de eliminar por completo la contaminación por hidrocarburos y otras sustancias nocivas y reducir al mínimo el derrame accidental de tales sustancias.

El convenio MARPOL 73/78 original fue firmado el 17 de febrero de 1973, pero no entró en vigor en la fecha de firma. La convención actual es una combinación de Convenio de 1973 y el Protocolo de 1978, que entró en vigor el 2 de octubre de 1983. A partir de 2015, 152 estados, lo que representa el 99,2 por ciento del tonelaje de la flota mundial, son los estados parte de la convención.

Todos los buques de pabellón bajo los países signatarios del Convenio MARPOL 73/78 están sujetos a sus necesidades, independientemente de dónde navegan y los países miembros.

Este convenio se ha ido modificando por medio de resoluciones las cuales han ido incluyendo, modificando o adaptando dicho convenio a las necesidades actuales internacionales, dichas resoluciones deben ser ratificadas por los estados del mismo modo que el convenio para que se pueda llevar a cabo su aplicación. Dichas resoluciones son realizadas por el comité de protección del medio ambiente (MEPC: Marine Environment Protection Committee) el cual es un órgano subsidiario de consejo, el cual está facultado para considerar cualquier asunto en el ámbito de la organización en relación con la prevención y control de la contaminación de los buques. En particular, se ocupa de la aprobación y modificación de los convenios, normas y otras medidas para asegurar su cumplimiento.

1.5.1.2 Anexos convenio MARPOL 73/78

El convenio MARPOL 73/78 incorpora seis anexos, cada uno de los cuales se ocupa de la regulación de un determinado grupo de emisiones o contaminantes de los buques, los cuales se dividen de este modo:

- Anexo I: Reglas para prevenir la contaminación por hidrocarburos
- Anexo II: Reglas para prevenir la contaminación por sustancias nocivas líquidas transportadas
- Anexo III: Reglas para prevenir la contaminación por sustancias perjudiciales transportadas por mar en bultos
- Anexo IV: Reglas para prevenir la contaminación por las aguas sucias de los buques
- Anexo V: Reglas para prevenir la contaminación por basuras de los buques

- Anexo VI: Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques

El Anexo IV MARPOL 73/78 introduce los requisitos para el control de la contaminación del mar por las aguas residuales procedentes de los buques.

1.5.1.2.1 Ámbito de aplicación del Anexo IV (regla 2):

Las normas y reglas del anexo IV se aplican a todos los buques con un arqueo bruto mayor de 400GT o que estén autorizadas para transportar a más de 15 personas.

1.5.1.2.2 Requisitos para la descarga de las aguas residuales a mar:

Para poder realizar la descarga de aguas residuales al mar se debe de poseer una instalación de tratamiento de aguas residuales aprobada por la administración, además se deben de cumplir los siguientes requisitos de vertido, estas descargas se deben de realizar a una distancia superior a 3 millas marinas de la costa más próxima, además estas aguas residuales deben de haber sido desmenuzadas u desinfectadas por la instalación de tratamiento de aguas residuales.

Si las aguas residuales no han sido desmenuzadas ni desinfectadas (no se realiza el uso de una instalación de tratamiento de agua residual), estas se deben descargar a una distancia superior a 12 millas marinas de la costa más próxima.

Dichas aguas deben ser almacenadas en un tanque de almacenamiento (Holding tank) hasta que se cumplan los requisitos para ser vertidas y ser vertidas con un caudal y velocidad del buque de acuerdo a la norma.

Este anexo no obligaba a satisfacer ningún requisito más que los arriba mencionados en relación al efluente que se vertía al mar.

1.5.1.2.3 Resolución MEPC.2 (VI): Recomendación sobre las normas de efluentes Internacional y guía para las pruebas de rendimiento de las instalaciones de tratamiento de aguas residuales.

Esta resolución fue adaptada el 3 de diciembre de 1976 con la finalidad de dar unas directrices iniciales a las administraciones sobre los valores máximos de algunos parámetros contaminantes de los efluentes y las pruebas de rendimiento de las instalaciones de tratamiento de aguas residuales (siempre que sea obligatorio su uso).

Según las directrices de la resolución el efluente vertido debería de cumplir los siguientes puntos:

- Recuento estándar de coliformes totales (Coli) [x/100ml] no debe exceder 250
- Sólidos Suspendidos totales (TSS) [ml/l] no deben de exceder los 100
- Demanda biológica de oxígeno a 5 días (BOD₅) [mg/l] no debe exceder los 50

1.5.1.2.4 Resolución MEPC.159 (55): Directrices revisadas para la aplicación de las normas de efluentes y pruebas de funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Esta resolución fue adoptada el 13 de octubre del 2006 con la finalidad de revisar las directrices de las administraciones sobre los valores máximos de algunos parámetros contaminantes de los efluentes, además de añadir algunos nuevos, y las pruebas de rendimiento de las instalaciones de tratamiento de aguas residuales.

Según las nuevas directrices de la resolución el efluente vertido debería de cumplir los siguientes puntos:

- Recuento estándar de coliformes totales (Coli) [x/100ml] no debe exceder 100

- Sólidos Suspendidos totales (TSS)[ml/l] no deben de exceder los 35
- Demanda biológica de oxígeno a 5 días (BOD₅) [mg/l] no debe exceder los 25
- Demanda química de oxígeno (COD) [mg/l] no debe de exceder de 100
- pH se debe mantener entre 6 y 8,5
- Cloro o sus compuestos [mg/l] debe de ser menor de 0,5

1.5.1.2.5 Resolución MEPC.227 (64): Directrices para la implantación de las normas de efluentes y pruebas de funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Esta resolución fue adoptada el 5 de octubre del 2012, como una necesidad generada por la resolución MEPC.200 (62) la cual designaba al Mar Báltico como una área especial, y este hecho prohíbe el vertido de aguas residuales al mar, en esas zonas, por parte de los buques de pasaje a menos que posean una planta de tratamiento de aguas residuales que cumpla con los valores de vertido máximos que deberán ser marcados por esta resolución (MEPC.227 (64)).

Según las nuevas directrices de la resolución el efluente vertido por parte de los buques de pasaje debería de cumplir los siguientes puntos:

- Recuento estándar de coliformes totales (Coli) [x/100ml] no debe exceder 100.
- Sólidos Suspendidos totales (TSS)[ml/l] no deben de exceder los 35
- Demanda biológica de oxígeno a 5 días (BOD₅) [mg/l] no debe exceder los 25.
- Demanda química de oxígeno (COD) [mg/l] no debe de exceder de 125
- pH se debe mantener entre 6 y 8,5
- Cloro o sus compuestos [mg/l] debe de ser menor de 0,5.
- Nitrógeno total [mg/l] no debe exceder de 25 o una reducción de al menos 70% entre el afluente y el efluente.
- Fosforo total [mg/l] no debe de exceder de 1 o una reducción de al menos 80% entre el afluente y el efluente.

1.5.2 Convenios regionales

Son un conjunto de acuerdos llevados a cabo por diferentes Estados o entre Estados y otros Organismos que producen efectos jurídicos en un área de influencia próxima a sus costas, buscando con dichas leyes la protección de una región en particular, debido a las características singulares de dicha área.

Un caso significativo es el de las regiones polares del Ártico y Antártico sobre las cuales no existen unas soberanías consensuadas y existen disputas por la jurisdicción de estas. Debido a esta razón, aunque algunos países tienen legislaciones específicas para las zonas de su influencia, pero en otras se aplica la legislación internacional (MARPOL 73/78) generando incertidumbres y dudas sobre el cumplimiento de la legalidad vigente.

1.5.2.1 Ártico

Debido a que la jurisdicción territorial sobre el Ártico está dividida en varios países, no existe una legislación conjunta en relación al vertido de aguas residuales estándar para todas sus áreas. En las zonas de los países que han ratificado el anexo IV de convenio MARPOL 73/78 se aplican las directrices de la resolución MEPC.159 (55), estos países son: Dinamarca (Groenlandia), Finlandia, Noruega, Federación Rusa y Suecia. En el resto de las áreas se aplica la legislación específica de cada país.

Canadá tiene una legislación específica para la navegación en las aguas Ártico, "Arctic shipping pollution prevention regulation C.R.C., c 353" en la que dispone que solo se podrán verter al mar el agua residual que se haya generado en el buque, sin especificar qué características debe de poseer el vertido. Estados Unidos aplica la misma legislación que en resto del estado de Alaska, e Islandia no tiene ninguna legislación en lo referente a las descargas de aguas residuales por los buques.

1.5.2.2 Antártico

El Antártico del mismo modo que el Ártico está dividido en diferentes aéreas bajo la jurisdicción de diferentes países, en la que existen también discrepancias o conflictos sobre la jurisdicción sobre dichas zonas. En este todos los países que tienen jurisdicción sobre la Antártida han ratificado el anexo IV MARPOL 73/78.

1.5.2.2.1 Protocolo Antártico sobre protección del medioambiente (Protocolo de Madrid)

Es un protocolo que se creó por la necesidad de incrementar la protección del medio ambiente antártico dentro del sistema del Tratado Antártico (Protocolo al tratado Antártico sobre la protección del medio ambiente-Madrid, CCFA-Londres y CCRVMA-Canberra) declarando el Antártico “reserva natural consagrada a la paz y a la ciencia”.

Consta de VI anexo técnicos, siendo en los anexos III y IV se tratan sobre la eliminación y tratamiento de los residuos. En estos anexos se indica que el generador o productor de las aguas residuales debe de eliminarlo de un modo adecuado, sin depositados en el hielo y pudiéndose descargarse directamente a mar, si las descarga no afecta al medio ambiente local, siendo necesario su tratamiento si el vertido directo genera afecciones, aunque no especifica valores de vertido para poder contrastar los vertidos de un modo cuantitativo. Su marco concuerda con el MARPOL 73/78 en su anexo IV.

1.5.2.3 Código internacional para los buques que operan en aguas polares (Código polar)

La OMI ha adaptado el Código internacional para los buques que operan en aguas polares (Código polar), así como las enmiendas correspondientes a SOLAS y MARPOL 73/78 a fin de darle un carácter obligatorio a partir de 2017.

En lo referente a las descargas de aguas residuales desde los buques no aporta ningún cambio respecto a la legislación MARPOL 73/78 vigente hasta la fecha

1.5.2.4 DE 57/11/14

Dentro de IMO se está desarrollando un código de obligatorio cumplimiento para los buques que operan en aguas polares, debido a que la legislación actual en lo referente al vertido de aguas residuales en las aguas polares no es suficiente para evitar los vertidos a las aguas y los hielos de estas zonas, por lo que se proponen la inclusión de medidas más estrictas que las indicadas por el Código polar.

La principal medida propuesta es la designación de las Áreas Árticas y Antárticas como zonas especiales en la aplicación del anexo IV del MARPOL 73/78, aplicándose los requerimientos de vertido de la resolución MEPC.227 (64).

1.5.3 Convenios nacionales

En el MARPOL 73/78, el cual consta de 6 anexos separados, de los cuales los anexos I y II son obligatorios para todas las naciones firmantes, pero los anexos III, IV, V y VI son opcionales. Por lo que algunos países deciden aplicar

otras normas distintas a las que marca el anexo IV del MARPOL 73/78, este es el caso de Estados Unidos y Canadá.

1.5.3.1 Estados Unidos (excepto Alaska)

Aunque los Estados Unidos no han ratificado el anexo IV del MARPOL 73/78, los EEUU tiene unas regulaciones equivalentes en lo referente a las normas de tratamiento y descarga de las aguas residuales a bordo, las cuales se debe de cumplir por todos los buques que naveguen por sus aguas.

1.5.3.1.1 Ley de agua limpia (CWA)

La ley de agua limpia (CWA) establece las normas básicas para regular las descargas en las aguas de los EEUU y las normas de calidad de las aguas superficiales. Sus bases datan de 1948, pero se reorganizó en 1972.

Esta norma establece estándares de calidad de agua para los vertidos a las aguas superficiales, haciendo ilegal cualquier descarga de una fuente puntual (buque o embarcación flotante) en aguas navegables, a menos que se obtenga un permiso del estado (NPDES).

1.5.3.1.2 33 USC 1322 Dispositivos sanitarios marinos (MSDs)

Dentro de la CWA se provee un marco legal por el cual se regulan las descargas de aguas residuales de los buques, esta es el 33 US. Code 1322, cuyo objetivo es restaurar, mantener la integridad física, química y biológica de las aguas de jurisdicción nacional.

Dentro de este código se describe la prohibición del vertido de aguas residuales al mar, excepto si estas aguas están tratadas por medio de unos dispositivos sanitarios marinos, los cuales deben de cumplir unas normas que se especificaran en la norma 33 CFR 159 y disponer de un certificado que lo acredite.

1.5.3.1.3 33 CFR 159

Existen tres tipos diferentes de MSDs que pueden ser certificados por la Guardia costera de los Estados Unidos para cumplir los requisitos de vertido de esta norma, cada uno con sus propios criterios de diseño, certificación y descarga.

- Tipo I: Es un dispositivo de descarga de flujo que produce un efluente con un recuento estándar de coliformes totales (Coli) menor de 1000UFC/100mL, y sin ningún sólido flotante visible. Este tipo de dispositivos normalmente son fisicoquímicos que están basados en la maceración y la cloración.
- Tipo II: Es un dispositivo de descarga de flujo que produce unos efluentes con un recuento estándar de coliformes totales (Coli) menor de 200UFC/100mL y unos sólidos suspendidos totales inferiores a 150mg/L. Estos dispositivos normalmente están basados en digestiones biológicas o anaeróbicas.
- Tipo III: Es un dispositivo que evita la descarga por la borda de las aguas residuales tratadas o no tratadas, e incluso cualquier residuo derivado de las aguas residuales, este dispositivo normalmente es un tanque de retención (Holding tank), aunque puede incluir otras tecnologías más complejas tales como: incineración, recirculación y/o compostaje.

Esta norma establece que ningún buque puede operar si no tiene instalado una instalación sanitaria (MSD) para poder tratar las aguas residuales que produzca, siempre que navegue en aguas de la jurisdicción de los EEUU. Para los buques se exigirán equipos MSD tipo II, excepto a los buques de eslora igual o menor de 19,7 mts que se les exigirá del tipo I.

Para operar en ciertas zonas recogidas por la normas 40 CFR140.3 y 140.4 (estuarios, ríos, bahías cerradas, zonas lúdicas de la costa, santuarios acuáticos, etc.) está terminantemente prohibido para todos o algunos tipos de buques (dependiendo de la zona) el arrojar efluentes de agua residuales aun

habiendo sido tratadas con los sistemas MSDs anteriores, teniendo la obligación de cerrar la válvula de descarga de dicho sistema y almacenando las aguas residuales en un tanque destinado a tal fin, excepto si se posee un sistema de tratamiento de aguas residuales tipo III mediante el cual se puedan tratar dichas aguas residuales.

1.5.3.1.4 Circular de la inspección de buques y navegación (NVIC) No.1-09

La guardia costera de los estados unidos anuncio en 2009 la circular de la inspección de buques y navegación (NVIC) No. 1-09 en la que proporciona orientaciones para el cumplimiento voluntario del anexo IV del MARPOL 73/78.

1.5.3.2 Alaska

Los Estados unidos tienen una legislación específica para los buques de pasaje o cruceros que puedan transportar 500 pasajeros o más cuando naveguen por las aguas navegables de los Estados Unidos tiene en Alaska.

Esta ley prohíbe a los buques de pasaje o cruceros verter sus aguas residuales en las aguas jurisdiccionales de Alaska al menos que cumpla una serie de normas tales como:

- Tener al menos a una velocidad de 6 nudos.
- Estar al menos a una distancia de una milla náutica de la costa, excepto en ciertas zonas designadas.
- Cumplir con los requisitos mínimos de vertido fijados en 40 CFR 133.102 y 33 CFR 159.309.
- Se debe muestrear y analizar los vertidos realizados, para poder demostrar que se viene cumpliendo con los requisitos mínimos de

vertido fijados, debiendo mostrar y justificar ante el organismo competente que se realizan.

1.5.3.2.1 Requisitos mínimos de vertido fijados por las normas 40 CFR 133.102 y 33 CFR 159.309

Los requisitos mínimos que fijan estas normas son:

- El valor medio de las muestras de la descarga durante un periodo de 30 días para dictaminar un recuento estándar de coliformes totales (Coli) no debe exceder de 20UFC/100mL.
- Las concentraciones de cloro residual no deben superar los 10µmg/L (0.01mg/L)
- El promedio de los valores de la demanda biológica de oxígeno a 5 días (BOD5) durante 30 días no deben de exceder de 30 mg/L, ni de 45mg/L en un promedio de 7 días, además de tener un porcentaje promedio de eliminación de 30 días igual o superior al 85%, aunque por requerimiento de la autoridad competente se pueda exigir el promedio de los valores de la demanda biológica de oxígeno carbonado a 5 días (CBOD5) durante 30 días no deben de exceder de 25 mg/L, ni de 40mg/L en un promedio de 7 días, además de tener un porcentaje promedio de eliminación de 30 días igual o superior al 85%
- El valor promedio de sólidos en suspensión totales (TSS) durante 30 días no debe de exceder de 30 mg/L, y de 45mg/L durante 7 días, siendo en promedio de eliminación de 30 días igual o superior al 85%.
- Los valores de pH del efluente se deben de mantener entre 6,0 y 9,0.

1.5.3.3 Canadá

Debido a que Canadá no ha ratificado el Anexo IV MARPOL 73/78, el país mantiene una legislación específica para sus aguas jurisdiccionales, la cual en una gran parte consiste en unas leyes paralelas a la legislación IMO (MARPOL 73/78), ya que exige el cumplimiento de estas, excepto en unas áreas designadas, en la que la legislación es más exigente. Estas normas deben de ser cumplidas por todos los buques que naveguen por sus aguas jurisdiccionales.

1.5.3.3.1 S.C.A 2001, c. 26 Ley de transporte marítimo de Canadá, 2001

La ley de transporte marítimo de Canadá (Canadian shipping act- CSA), es una actualización simplificada y reorganizada de las leyes anteriores, lo cual hace más fácil poder comprenderla, además de intentar adecuar la ley Canadiense a las legislaciones a la legislación internacional, ya que debido a la ley de exención de conferencias navales, 1987 (Shipping conferences exemption act), Canadá no ratificaba algunas leyes marítimas internacionales (o parte de estas), pero permitía que buques de otros países que si las tenían ratificadas operasen dentro y fuera de los puertos canadienses sin contravenir la ley de competencia.

La ley plantea la necesidad de crear leyes específicas para los principales aspectos que afectan al transporte marítimo, además de crear la necesidad de buscar facilidades para la recepción de los residuos que se puedan generar en los buques.

1.5.3.3.2 SOR/2012-69 Regulación para prevenir la contaminación o daños por productos químicos producida por los buques

La regulación para prevenir la contaminación y los daños por productos químicos producida por los buques (Vessel pollution and dangerous chemical regulation SOR/2012-69) genera unas normas y directrices que deben ser cumplidas por los buques para evitar la contaminación.

En lo referente a las aguas residuales la regulación indica que cualquier descarga de agua residual debe cumplir las siguientes normas:

- No hacer ninguna película, brillo o decoloración en la superficie del agua
- No verter los lodos ni aguas sin tratar debajo de la superficie del agua, estos deben ser desembarcados a tierra cuando sea posible.
- No deben de contener ningún sólido visible

Los buques que operen en las aguas de jurisdicción canadiense (excepto en el área Ártica) deben de cumplir los siguientes requisitos:

- En las zonas de aguas residuales designadas, establecidas en el anexo 2 de este reglamento, los buques solo podrán descargar aguas residuales que haya sido tratada por una planta de tratamiento de aguas residuales con la que se consiga un efluente con un conteo de coliformes igual o menor a UFC 14/100mL, y que dicho planta posea el certificado internacional para la prevención de la contaminación por aguas residuales (Internacional sewage pollution prevention certificate).
- Excepto en las zonas de aguas residuales designadas (las que deben cumplir el punto anterior), los buque pueden descargar las aguas residuales a través de una planta de tratamiento aprobada de acuerdo con la resolución MEPC.2 (VI) y MEPC.159 (55) de la OMI y que dicho planta posea el certificado internacional para la prevención de la contaminación por aguas residuales (Internacional sewage pollution prevention certificate).
- Excepto en las zonas de aguas residuales designadas, podrán descargar las aguas trituradas y desmenuzadas a una distancia mayor de 3 millas de la costa usando un sistema aprobado por la administración de su bandera.
- Excepto en las zonas de aguas residuales designadas, los buques podrán verter sus aguas residuales no tratadas en las aguas costeras e interiores de Canadá a una distancia mayor de

12 millas de la costa, siempre que las aguas residuales se almacenen en un tanque de retención y no se descarguen instantáneamente, se descargara a una velocidad moderada y con el buque en marcha a una velocidad no menor de 4 nudos.

1.5.3.3.3 Reglamentos que derogo la regulación SOR/2012-69

El reglamento SOR/2012-69 derogo las tres regulaciones específicas que tenía Canadá para prevenir la contaminación por aguas residuales de sus aguas, las cuales son:

- Regulación para la prevención de la contaminación por aguas residuales en los grandes lagos (C.R.C., c. 1429)
- Regulación para la prevención de la contaminación por aguas residuales producidas por embarcaciones de recreo. (SOR/91-661)
- Regulación para la prevención de la contaminación por aguas residuales producidas por otras embarcaciones distintas a las de recreo (SOR/91-659)

1.5.4 Leyes locales

En los Estados Unidos debido a que las leyes son deficientes en algunos aspectos relacionados con la contaminación de los buques, en especial los cruceros, algunos estados han creado una legislación más restrictiva para controlar la contaminación producida por los buques.

Los estados de California, Maine y Washington son algunos de los estados que han creado legislaciones específicas las cuales tienen como finalidad proteger sus aguas costeras y los fondos marinos de estas, aunque con diferente resultado dependiendo del estado.

1.5.4.1 California

El estado de California alertado un vertido contaminante ocurrido frente a la costa de Monterrey en octubre 2002, además del aumento del tráfico de cruceros en sus aguas llevo a crear unas normas adecuadas para limitar la contaminación marina.

Las leyes que se crearon son:

- A.B 121, 2003 y A.B 906, 2003, las cuales prohíben cualquier vertido de aguas residuales y los lodos de estos a las aguas del estado a los cruceros de 300 pasajeros o mas
- A.B 2672, 2004 y A.B 2093, 2004, las cuales prohíbe que un crucero vierta aguas residuales en las aguas estatales si no tiene un dispositivo sanitario marino-MSD aprobado y solicita autorización a la agencia de protección medioambiental (EPA).
- SB 771, 2005, Solicitud para tener permiso de la EPA para poder imponer la prohibición de verter aguas residuales por parte de cruceros en aguas del estado de California. La aprobación está aún pendiente.

Aunque este estado ha intentado legislar respecto al vertido de aguas residuales dentro de sus aguas jurisdiccionales, estas leyes son inferiores a las leyes federales de los estados Unidos y pueden ser esquivadas o eludidas, lo que no impide que el estado controle y exija el cumplimiento exhaustivamente de la legislación federal.

1.5.4.2 Maine

El estado de Maine creo la ley LD1158, 2004 en la que regulaban todos los vertidos de aguas residuales de todos los cruceros de 250 pasajeros o más, aunque todos los buques que cumpliesen con la legislación americana

(tuviesen un dispositivo sanitario marino-MSD aprobado) podrían seguir realizando sus descargas al mar, estos equipos deberán de cumplir los estándares de descarga de Alaska.

Los buques que puedan realizar vertidos deben solicitar un permiso al estado de Maine para realizar las descargas, informar de las descargas realizadas y mantener un registro de estas.

Declara la bahía de Casco como zona de no descargas (NDZ), por lo que prohíbe cualquier descarga en dicha zona, incluso si las aguas son tratadas.

1.5.4.3 Washington, Hawái y Florida

El estado de Washington creó en 2004 un Memorando de entendimiento (MOU) con el que se planteaba que el estado tiene la responsabilidad de proteger y conservar los recursos ambientales en relación con la industria de los cruceros.

Estos memorandos no son jurídicamente legales, sino que solo se puede aplicar a los buques o navieras que acepten firmarlos, dándole a estos últimos una imagen positiva respecto al respeto del medio marino.

Dicho memorando especifica unos límites de vertido iguales al fijado en las descargas del territorio de Alaska (BOD, TSS, pH, recuento estándar de coliformes totales (Coli) y cloro residual), realizando controles para comprobar si se cumplen, además de creando la necesidad de enviar los datos y un registro de los mismos. En caso de incumplimiento de las normas o reglas, el estado tiene la potestad de sancionar a buque o la naviera, además de poder realizar inspecciones para comprobar el correcto de las instalaciones.

Otros estados como Florida y Hawái han copiado esta fórmula del Memorando de entendimiento (MOU)

El estado de Hawái también intenta legislar en sus aguas jurisdiccionales con leyes del estado, aprobando la HB 422, 2005, la cual permite descargar las aguas residuales que cumplan con los estándares de Alaska, prohibiendo la descarga de las aguas residuales no tratadas, pero opta por MOU como una solución adecuada para intentar solucionar el problema de la contaminación de sus aguas.

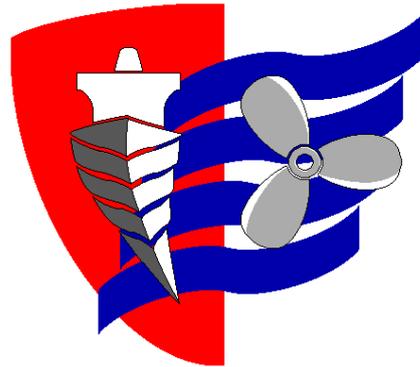
1.5.5 Cuadro resumen sobre los requisitos de vertido adecuados para cada legislación

A modo de resumen se realizará un cuadro en el que se indicaran los requisitos de vertido para cada uno de los parámetros que exigen las diferentes legislaciones que se pueden encontrar durante la navegación un buque de pasaje (crucero) para así poder tener una visión global de los diferentes exigencias y las diferencias que se pueden observar entre ellos debido a la legislación que aplique.

Tabla 1. Cuadro resumen de los requisitos de vertido (Fuente: Autor)

	MEPC2 (VI)	MEPC 159 (55)	MEPC 227 (64)	ESTADOS UNIDOS	ALASKA	CANADA (DSA)
Coli [x/100mL]	250	100	100	200	20	14
TSS [mg/L]	100	35	35	150	30	
BOD₅ [mg/L]	50	25	25		30	
COD [mg/L]		125	125			
pH		6,0- 8,5	6,0-8,5		6,0-9,0	
Cloro [mg/L]		0,5	0,5		0,01	
Nitrógeno [mg/L]			<25 o reducción del 70%			
Fosforo [mg/L]			<1 o reducción del 80%			

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



METODOLOGÍA

2 METODOLOGÍA

Debido a que los valores máximos de vertido de las aguas residuales de los buques se han reducido, en algunas circunstancias drásticamente, por la legislación que se les aplica, los sistemas de tratamiento de dichas aguas residuales que se deben instalar en los buques se han tenido que adecuar para lograr conseguir unos valores de vertido adecuados que no incumplan o sobrepasen los valores máximos.

Estos sistemas de tratamiento de aguas residuales han venido evolucionando siempre adecuándose a los valores de vertido permitidos, para poder atender a los requerimientos de la legislación.

2.1 TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES USADAS EN LOS BUQUES

Actualmente todas las plantas de tratamiento que existen se basan en tres procesos principales con los que se pueden tratar las aguas residuales que son:

- Procesos mecánicos
- Procesos químicos
- Procesos biológicos

Normalmente el proceso de tratamiento de aguas residuales suele ser una combinación de dos procesos, tales como mecánico-químico, mecánico-biológico y químico-biológico.

El tratamiento de las aguas residuales incluye las siguientes etapas:

- Acumulación y gestión de aguas residuales
- Pretratamiento de aguas residuales

- Oxidación de las aguas residuales
- Clarificación y filtración de aguas residuales
- Desinfección de aguas residuales
- Tratamiento de lodos

2.1.1 Acumulación y gestión de aguas residuales

En esta etapa del proceso de tratamiento de las aguas residuales (aguas negras, aguas grises y aguas procedentes de la cocina, etc.) se recogen en unos tanques antes de realizar el tratamiento de dichas aguas, dando la posibilidad de regular un caudal constante al proceso de depuración, evitando así caudales variables que generarían fluctuaciones y problemas en el proceso.

2.1.2 Pretratamiento de aguas residuales

El pretratamiento de aguas residuales sirve para proteger las otras fases del proceso de depuración, debido a que las aguas residuales normalmente contienen una gran cantidad de residuos sólidos y grasa que pueden causar problemas en las siguientes etapas del proceso. El proceso de pretratamiento sirve para reducir la cantidad de sólidos en las aguas residuales, además de reducir la necesidad de oxidación (de los materiales que se han retirado). El pretratamiento es mecánico y consiste en elementos de tamizado y sedimentación, para evitar problemas en este proceso las partículas más grandes pasan a través de una bomba trituradora antes del proceso de tamizado.

2.1.3 Oxidación de las aguas residuales

Aunque mediante el desbaste mecánico se puede lograr una reducción máxima del 50% de la carga orgánica, los restantes compuestos orgánicos deben de ser oxidados, ya sea químicamente o biológicamente.

2.1.3.1 Tratamiento químico

Si se añaden ciertos compuestos químicos, tales como: Ozono, cloro, peróxido de hidrógeno, se consigue una oxidación química de la materia orgánica presente en las aguas residuales. Cabe destacar que la oxidación con el ozono y el peróxido de hidrógeno es menos agresiva con el medio ambiente que la producida con cloro, ya que se generan compuestos cancerígenos como subproductos de la reacción de oxidación, aunque el cloro es más barato y fácil de conseguir que los otros.

Los resultados del tratamiento químico para la reducción de la DBO y el fósforo son buenos, si se dosifica unas dosis adecuadas que se mezclan perfectamente con el efluente, pero se debe de tener en cuenta que una cloración en exceso produce altos niveles de cloro residual en la descarga, lo cual es muy perjudicial para los organismos marinos.

2.1.3.2 Tratamiento biológico

En el tratamiento biológico los microorganismos (bacterias) utilizan la materia orgánica presente en las aguas residuales como su alimento. Existen varios tipos de procesos biológicos, donde el proceso más común es una planta de tratamiento de lodos activos, donde se mezclan las aguas residuales con los lodos activos en un tanque con aireación continua, otros sistemas son los

filtros biológicos y biorotores en los cuales las bacterias que eliminan la materia orgánica se unen al material filtrante, utilizándolo de soporte.

El sistema de tratamiento biológico es la forma más eficaz de reducir la carga de DBO, ya que se pueden lograr reducciones entre el 80-95% y una reducción en la cantidad de fósforo del 20-40%, aunque la eficacia del proceso biológico depende de la cantidad de biomasa activa y de las condiciones de vida de las bacterias.

Las principales desventajas del tratamiento biológico son el largo período de arranque del proceso y su sensibilidad a las perturbaciones externas. Las principales causas del mal funcionamiento del sistema biológico son las siguientes:

- La entrada de sustancias químicas en el proceso, las cuales afecten o destruyan las bacterias.
- La falta o defecto de oxígeno disuelto en el proceso, que hace que ciertas bacterias mueran, o proliferen otras que empeoran el proceso.
- Que la recirculación de los lodos activos se vea interrumpida.

2.1.4 Clarificación y filtración de aguas residuales

Después de la oxidación, el lodo se debe de separar en un tanque de decantación y se devuelve (recircula) al tanque de aireación de nuevo. La separación de la biomasa activa, partículas de sedimento y bacterias del agua es una parte crucial en el proceso de depuración de las aguas residuales. Los procesos de clarificación y filtración utilizados en los buques son la filtración por membrana, la flotación mediante aire disuelto (DAF-Dissolved air flotation) y la sedimentación.

El sistema DAF se basa en la inyección continua de corriente uniforme de burbujas de aire microscópicas desde el fondo de un tanque en vertical a la corriente de agua de alimentación, haciendo que las partículas floten en la

superficie del tanque, en el cual hay instaladas en la superficie unas placas de sedimentación inclinadas, mediante las cuales se desnatán continuamente. Es útil cuando las aguas tratadas tienen un alto contenido en sólidos en suspensión totales (TSS) o cuando el contenido de sólidos en suspensión es muy variable.

2.1.5 Desinfección de aguas residuales

La fase final del proceso de depuración de las aguas residuales es la desinfección. Aunque dependiendo del método que se utilice en el proceso anterior, la desinfección mejora la calidad de las aguas residuales o será una parte crucial del proceso de depuración.

Si se utiliza un sistema de filtración por membranas la desinfección se realiza por medio de luz ultravioleta, aunque si la transmitancia luminosa de dicha agua es baja, debido a una turbidez alta del agua u otras características del agua, la desinfección por este sistema resultará inadecuada.

Otros desinfectantes que se suelen usar son el cloro, radicales (Por ej.; Hidroxilo $^{\circ}\text{OH}$) y ozono.

2.1.6 Tratamiento de lodos

En esta parte del proceso la finalidad es reducir al máximo la cantidad de lodos mediante la eliminación del agua que contienen después del proceso de depuración, y la cantidad de lodos que llegue a esta parte del proceso dependerá de tipo de tratamiento que se utilice para la depuración de las aguas residuales, como se ha comentado antes, un proceso de pretratamiento efectivo reduce la cantidad de lodos producidos en un porcentaje importante.

El lodo normalmente sale del proceso de depuración con una concentración de materia seca de 2-3% (%MS), y se le reduce su concentración de agua por medio de uno de los procesos de deshidratado que existen (decantadores centrífugos, filtros prensa, filtros banda, tornillos prensa, etc.), lográndose diferentes sequedades dependiendo del proceso utilizado que van desde 17 hasta los 45% MS.

Después del proceso de deshidratación, se pueden utilizar diferentes técnicas para continuar la reducción de la cantidad de agua que contenga el lodo por medio del secado térmico de éste, o incluso buscar fórmulas para eliminarlo, tales como la incineración.

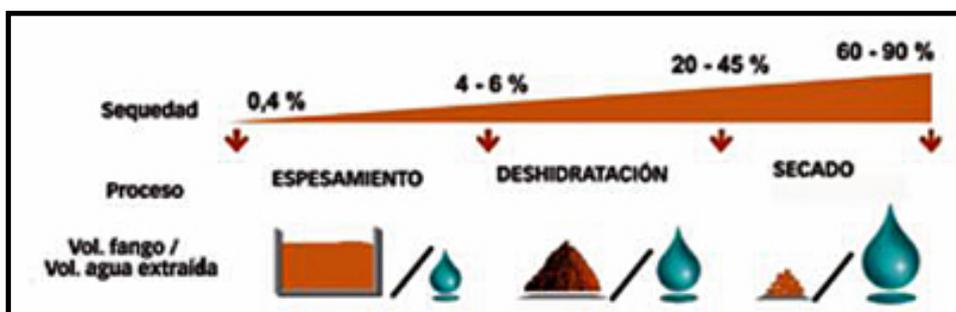


Figura 2. Procesos de deshidratación de lodos según la sequedad requerida.

Fuente: (Degremont fichas técnicas manual técnico del agua Degremont-Dehydris Twist, 2012)

2.2 UNIDADES DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN LOS BUQUES

En la actualidad existe un gran número de sistemas de tratamiento de aguas residuales aprobados por el MEPC2 (IV) y MEPC159 (55), estando basadas en las tecnologías antes descritas. Dependiendo de las tecnologías adaptadas por estos sistemas se pueden clasificarse en tres grupos:

- Sistemas convencionales de tratamiento biológico
- Sistemas de tratamiento físico-químico
- Sistemas avanzados de tratamiento de aguas residuales (AWT)

Para el cumplimiento de los requerimientos del MEPC 227 (64) y de la legislación específica de vertido en algunas zonas, los sistemas de tratamiento residual deben de lograr unos rendimientos mayores por lo que deben de introducir los sistemas avanzados de tratamiento de aguas residuales (AWT) para conseguir lograr esos valores más estrictos de vertido (Koboovic & Kurtela, 2011).

2.2.1 Sistemas convencionales de tratamiento biológico (sistema de lodos activos)

Las plantas de tratamiento de aguas residuales biológicas se basan en el uso de bacterias para facilitar el proceso de descomposición de la materia orgánica presente en el afluente, se genera una atmosfera rica en oxigeno por medio de un proceso denominado aireación, donde las bacterias anaeróbicas utilizan para aumentar su cantidad y por tanto consumir más cantidad de materia orgánica, generando unos lodos del proceso de depuración (Koboovic & Kurtela, 2011).

La planta se divide en tres partes o zonas: zona de biológico, zona de sedimentación o decantación y zona de tratamiento.

2.2.1.1 Zona biológica

El efluente entra en la planta de tratamiento de aguas a la zona de biológico, en esta zona las bacterias digieren la materia orgánica de transporta el agua residual y lo reducen a partículas pequeñas, además de eliminar otros nutrientes como el nitrógeno y fosforo. Para crear un ambiente adecuado y generar que proliferen un tipo de bacterias beneficiosas para nuestro proceso en detrimento de otras menos adecuadas o perjudiciales se necesitan diferentes etapas con unas condiciones adecuadas para cada finalidad,

existiendo etapa anaeróbica en la que la cantidad de aire es deficiente, etapa anóxica en la que la cantidad de oxígeno es deficiente y etapa aeróbica en la que el suministro continuo de aire (oxígeno) debe mantener unos valores de oxígeno disuelto adecuados. Existe un gran número de posibles combinaciones de estas tres etapas, las cuales se configurarán dependiendo del resultado que se desee.

2.2.1.2 Zona de sedimentación de decantación

El agua residual junto con las bacterias y los sólidos producto de la degradación de la materia orgánica pasan la siguiente zona donde las partes más pesadas (sólidos y bacterias) se sedimentan o decantan en el fondo y el líquido clarificado se sitúa en la parte superior. Esos sólidos son recirculados de nuevo al biológico, denominándolos como “lodos activos”, manteniendo una concentración constante adecuada en el biológico y purgando el resto de los lodos activos a un tanque destinado a tal fin para su descarga en puerto o tratamiento posterior. Mantener una concentración adecuada de lodo en el biológico es muy importante ya que una concentración pobre de bacterias reduciría la capacidad de eliminar la materia orgánica que entra al proceso y un exceso generaría unas concentraciones inadecuadas de oxígeno para dichas bacterias reduciendo su capacidad de digerir dicha materia orgánica.

2.2.1.3 Zona de tratamiento

En esta zona el agua clarificada es tratada con cloro, ozono o rayos UV para eliminar las posibles bacterias que hayas podido pasar del proceso anterior, ya que de esta zona se efectuara la descarga al mar.

Como se ha mencionado antes, la cloración es el método más usado por su bajo coste y fácil utilización. Y consiste en mantener unas concentraciones

suficientes constantes de cloro en dicha cámara durante un periodo de retención adecuado para que se produzca la correcta desinfección.

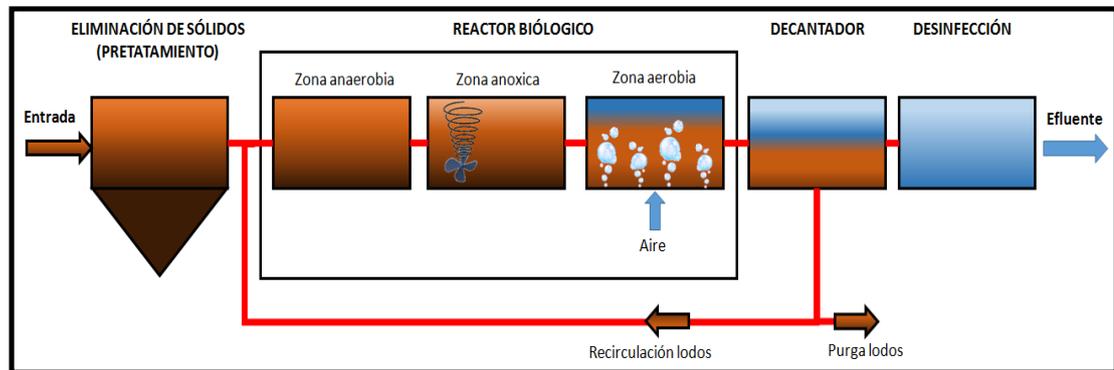


Figura 3. Esquema de un sistema convencional de tratamiento biológico.

Fuente: Autor.

2.2.2 Sistemas de tratamiento físico-químico

Los sistemas de tratamiento físico-químico se pueden dividir en dos categorías dependiendo de los procesos y productos que se utilicen:

- Electro-cloración
- Coagulación-floculación

La principal ventaja respecto a un sistema biológico tradicional es que estos equipos tienen un tamaño menor para tratar los mismos caudales.

2.2.2.1 Electro-cloración

La electro-cloración está basada en una tecnología tradicional, en la que el cloro se genera a partir del agua salada o de sales, aunque también se puede obtener de una solución de hipoclorito sódico, y se utiliza para desinfectar las aguas residuales. Para que el proceso se desarrolle

adecuadamente se debe mantener una conductividad alta y constante, para hacerlo posible se añade agua de mar en la cantidad necesaria.

Para evitar el vertido de un efluente con altos contenidos en cloro se instala una última etapa de des-cloración para reducir sus valores adecuadamente.

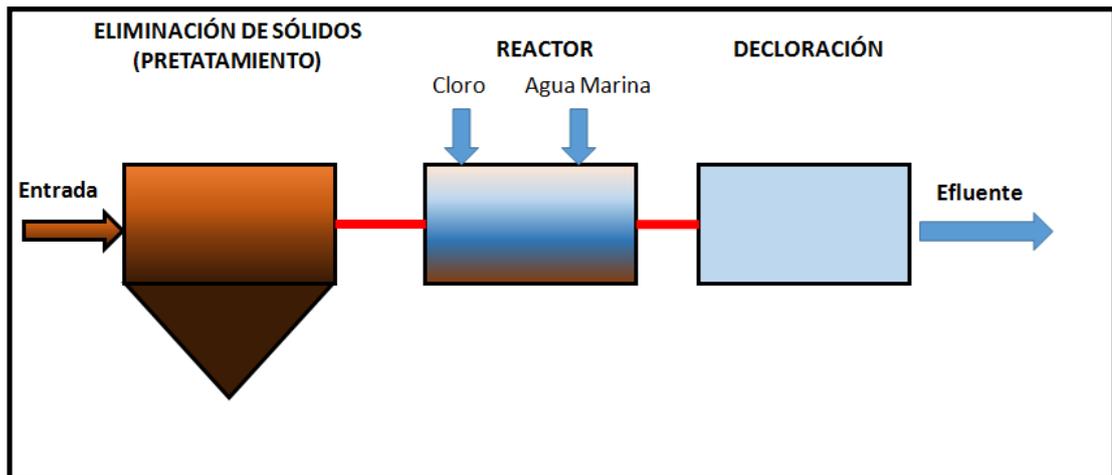


Figura 4. Esquema de un sistema de tratamiento por electro-cloración.

Fuente: Autor.

2.2.2.2 Coagulación-floculación

En esta tecnología se utilizan productos químicos adecuados para poder hacer que las partículas de materia orgánica se solidifiquen, las cuales se separan de las aguas residuales mediante un proceso de flotación producido por una corriente de aire disuelto en el agua adecuada.

Las cantidades de coagulante deben ser las adecuadas en todo momento dependiendo de la carga orgánica que tenga el afluente, para lograr que la mayor coagulación posible.

En esta instalación la última etapa consiste en un sistema de cloración para desinfectar el efluente de los posibles elementos coliformes que puedan haber escapado del proceso anterior

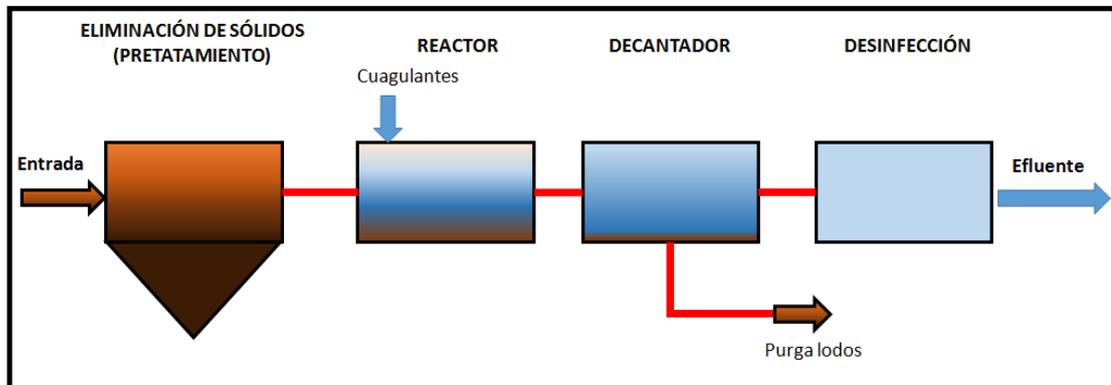


Figura 5. Esquema de un sistema de tratamiento por coagulación-floculación.

Fuente: Autor.

2.2.3 Sistemas avanzados de tratamiento de agua residual (AWS)

Los sistemas avanzados de tratamiento de aguas residuales (AWS) están basados normalmente en las tecnologías tradicionales a la cual se le añaden nuevas tecnologías en alguna o todas de sus etapas para mejorar la calidad del efluente. Nacen de la necesidad de lograr cumplir los estrictos requisitos de vertido que se imponen en algunas zonas.

Los AWS intervienen desde el tamizado inicial del afluente de agua residual, el tratamiento biológico, la separación de sólidos (filtración o flotación) y desinfección de efluente (usando normalmente rayos UV).

2.2.3.1 Reactor biológico de membrana- MBR (membrane bioreactor)

Los reactores biológicos de membrana son una combinación de los procesos de degradación biológica y separación por membranas en un solo proceso en el que los sólidos y las bacterias son separados del agua tratada, quedando todo confinado dentro de esa etapa (Boulliot et al., 1990; Côté et al., 1997; Rosengerger & Kraume, 2002).

Este proceso de MBR no debe confundirse con otros tratamientos en los que se utiliza una membrana para realizar la filtración, la cual está instalada después de los procesos biológicos, considerándola como otra etapa del proceso. Los MBR es una filtración que forma parte del proceso de depuración, ya que la membrana hace que los lodos activos permanezcan en el interior de biológico.

En el MBR el agua residual se pone en contacto con los lodos activos recirculados cuando entra en el biológico, la mezcla resultante al final del proceso biológico se filtra por la membrana, dejando pasar el agua y reteniendo el lodo (sólidos más bacterias) dentro, de donde se recircula y se eliminan los lodos en exceso que existan (Boulliot et al., 1990).

Para determinar una edad del lodo (tiempo de retención) y una concentración adecuada de lodo se deben de purgar una cantidad determinada de lodo. La edad del lodo (fango) o tiempo de retención celular, es un valor que se utiliza en depuración, que es la masa de microorganismos que tenemos en el reactor biológico dividida por la biomasa diaria purgada del sistema (lodos purgados). Este tiempo de retención se expresa en días (Côté et al., 1997; Rosengerger & Kraume, 2002).

En este proceso de deben de realizar limpiezas periódicas de la membrana por medio de un lavado contracorriente (lavado convencional), lavado químico o una combinación de ambos.

Las dos partes principales en que se dividen los MBR son la unidad biológica donde se produce la degradación de la materia orgánica y la membrana donde se realiza la separación física del agua del lodo. Además, la ubicación de la membrana hace que se distingan dos tipos de reactores biológicos de membrana en base a posición:

- Reactor biológico con membrana integrada o sumergida
- Reactor biológico con membrana externa o recirculación al reactor

2.2.3.1.1 Reactor biológico con membrana integrada o sumergida

En los MBR con membrana integrada o sumergida, la membrana realiza su función integrada dentro del tanque biológico. Para generar un flujo a través de la membrana se presuriza el biológico o se crea una depresión en el lado de salida de la membrana.

La limpieza de la membrana se realiza a través de frecuentes lavados a contraflujo con agua tratada y aire, y si las necesidades lo requieren con soluciones químicas.

Por lo general, se colocan parrillas de difusores de aire en la parte baja del tanque biológico, lográndose de este modo (Caro, 2010; Côté et al., 1997):

- Homogenización de la mezcla
- Mantener una concentración de oxígeno disuelto adecuada para el proceso biológico
- Limpieza de la membrana

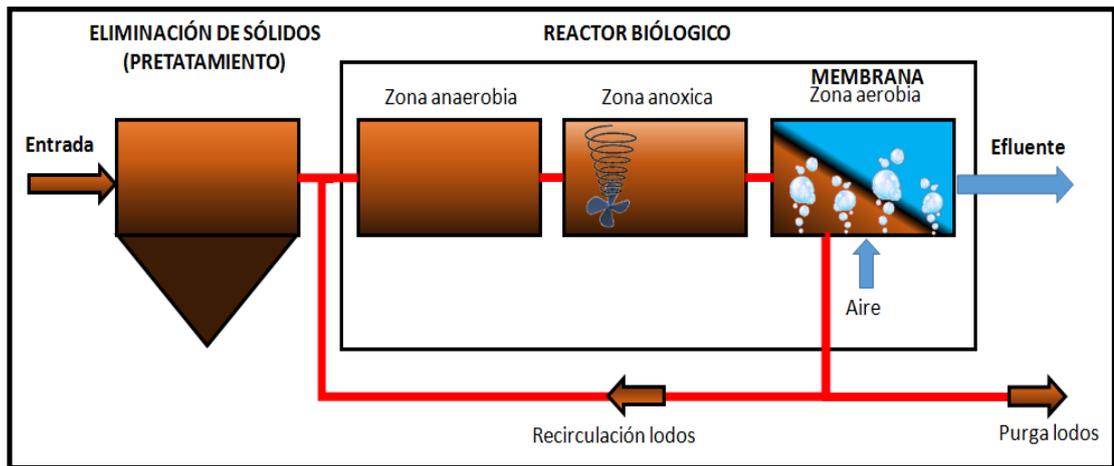


Figura 6. Esquema de un sistema de tratamiento biológico con membrana integrada.

Fuente: Autor.

2.2.3.1.2 Reactor biológico con membrana externa o recirculación al reactor

En los reactores biológicos con membrana externa o recirculación al reactor la mezcla de efluente y lodos activos deben ser enviados a la membrana que se encuentra fuera del tanque biológico. En este caso la presión que se necesita para pasar por la membrana se aporta junto con el bombeo del tanque biológico hacia la membrana (Rosengerger & Kraume, 2002).

Una vez separado en la membrana el agua tratada de los lodos activos, estos se recirculan hacia el tanque biológico de nuevo.

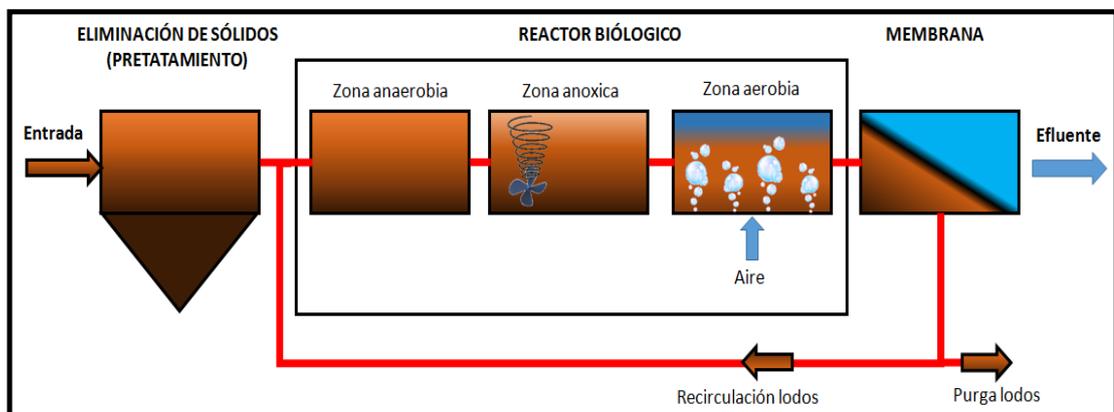


Figura 7. Esquema de un sistema de tratamiento biológico con membrana externa.

Fuente: Autor.

2.2.3.2 Reactor biológico de lecho móvil- MBBR (*moving bed biofilm reactor*)

El principio básico de un reactor biológico de lecho móvil es el crecimiento de la biomasa en unos soportes plásticos que rellenan en parte el reactor biológico y que se mueven libremente dentro del tanque mediante la agitación generada por los sistemas de aireación (en reactores aerobios) o mediante sistemas mecánicos (en reactores anóxicos y/o anaerobios).

La característica principal de este proceso es la biopelícula que se forma en los soportes, generándose una elevada superficie específica y logrando de este modo reducir el volumen del reactor biológico (Álvarez y Navares, 2015).

En las capas superficiales de la biopelícula se producen las reacciones biológicas de eliminación de materia orgánica y el crecimiento de la biopelícula hace que las capas internas en condiciones anaerobias pierdan adherencia del soporte y se desprendan.

Estos trazos de biopelícula desprendida son un exceso de lodos del proceso biológico y pasan junto con el agua tratada a unos decantadores donde estos lodos por gravedad van al fondo donde deben ser purgados. En este tipo de proceso no siempre es necesaria una recirculación de lodos activos ya que estos están en la biopelícula de los soportes (para procesos biológicos de eliminación de nitrógeno y fósforo es necesaria la recirculación).

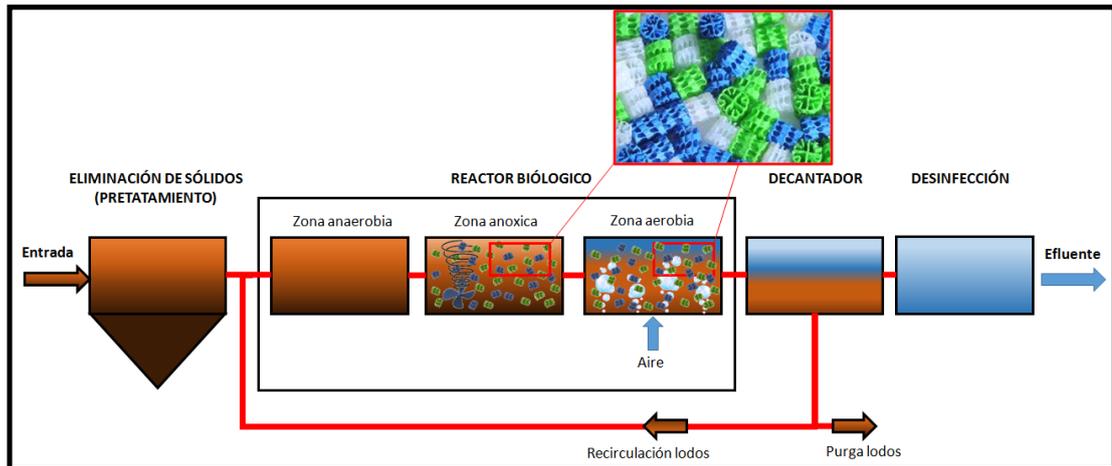


Figura 8. Esquema de un sistema de tratamiento biológico de lecho móvil

Fuente: Autor.

2.2.3.3 Tratamientos terciarios

La utilización de tratamientos terciarios es lograr la eliminación de la carga orgánica residual y aquellas otras sustancias que no se han eliminado mediante la utilización de los tratamientos de depuración residuales convencionales, tales como nutrientes, fosforo y nitrógeno.

Estos procesos terciarios pueden ser procesos biológicos o físico-químicos, aunque pueden utilizar tecnologías de otra naturaleza para lograr los fines deseados.

2.2.3.3.1 Intercambio iónico

Este proceso consiste en pasar el efluente antes de verterlo por unas resinas de intercambio iónicas, las cuales atraen sobre su superficie los iones de los elementos que se desean eliminar del agua residual, cada cierto tiempo se hace pasar una dilución regeneradora a la que le ceden dichos iones para mantener las propiedades de las resinas de intercambio.

2.2.3.3.2 Absorción

Este proceso se basa en las propiedades de los materiales usados como absorbentes para fijar en su superficie moléculas orgánicas que puedan existir en el efluente. El material sólido acaba absorbiendo en su superficie las sustancias que están disueltas en el agua, generando la necesidad de poner en contacto con el agua la mayor superficie posible del absorbente. Los absorbentes más utilizados son el carbón activo, el gel de sílice y la alúmina.

2.2.3.3.3 Membranas

Estos procesos están basados en la separación física mediante el uso de membranas, las cuales determinan el grado de eliminación dependiendo del paso de dicha membrana, reteniendo en esta todas las sustancias de diámetro superior a su paso, cuanto más restrictivo es el paso más elementos retendrá, pero para ello se debe de utilizar presiones del fluido mayores (Díez y de la Macorra, 2014; Soriano, 2001).

Cada cierto tiempo (dependiendo del tipo de membrana) se requieren una recirculación o flujo inverso usando agua tratada para proceder a la limpieza y regenerado de las membranas, incluso dependiendo las necesidades se deben de realizar limpiezas químicas de las membranas.

Estas membranas se pueden clasificar por el paso que tienen en:

- Microfiltración (MF)
- Ultrafiltración (UF)
- Nanofiltración (NF)
- Ósmosis inversa (RO)

Las membranas de microfiltración (MF) tienen un paso de entre 10 y 0,1 μm y son necesarias presiones de menos de 2 bares, en cambio las membranas de ultrafiltración tienen un paso más restrictivo que va desde 0,1 a 0,001 μm y necesitan presiones de entre 1 y 5 bar.

Si se requiere una filtración con unos pasos más restrictivos que la microfiltración y ultrafiltración se usan membranas de nanofiltración que tienen un paso de 100 a 10 Å (Ångstrom) y unas presiones de entre 5 y 15 bares, y por último las membranas de osmosis inversa con un paso de 10 a 1 Å (Ångstrom) necesitan de 15 a 70 bares de presión para poder hacer pasar el fluido.

La configuración de las membranas puede ser de diferentes formas y medidas dependiendo de la instalación o equipo que vaya instalado, distinguiéndose en dos tipos dependiendo de la naturaleza de las membranas (membranas orgánicas e inorgánicas).

Las membranas orgánicas se fabrican a partir de polímeros amorfos, acetato de celulosa o polímeros sintéticos (acrilatos o polisulfonas). Son membranas económicas, pero tienen ciertas deficiencias en cuanto a resistencia mecánica, térmica y química.

Las membranas inorgánicas existen de varios tipos dependiendo del material del que están construidas, las cuales se pueden dividir en:

- Membranas de vidrios porosos
- Membranas metálicas
- Membranas cerámicas

2.2.3.3.4 Electrodesinfección

El proceso de electro desinfección está compuesto de unos ánodos con un alto poder de oxidación de ciertos compuestos de un modo indirecto. Esta desinfección puede realizarse como una etapa más del proceso haciendo pasar el efluente a través del reactor con dichos electrodos, o bien generando oxidantes a partir de una solución conocida en el reactor y después añadiéndolos al agua a tratar.

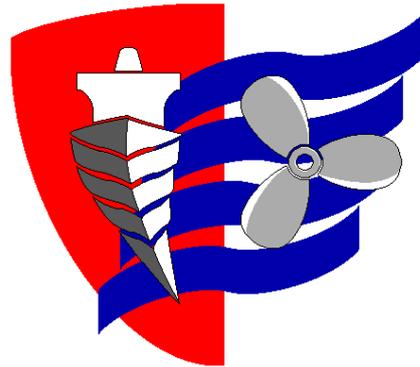
2.2.3.3.5 Oxidación avanzada

La finalidad de este proceso es la eliminación de los compuestos solubles no biodegradables que pueda contener el efluente de agua residual.

Este proceso consiste en producir una oxidación química mediante la utilización de un ion poliatómico simple denominado hidroxilo u oxhidrilo (OH^-), el cual tiene una gran capacidad para producir óxidos en tiempos de reacción bajos. Esta propiedad de oxidación produce la eliminación de compuestos orgánicos e inorgánicos en una proporción importante lo cual genera una reducción de la DQO, COT y otros contaminantes que pueda contener.

Para producir hidroxilo u oxhidrilo (OH^-) se utiliza oxígeno, agua oxigenada y ciertos catalizadores para aumentar la velocidad de la reacción química, generándose de este proceso además de OH^- , agua y dióxido de carbono.

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



DESARROLLO

3 DESARROLLO

Los requerimientos de vertido de las resoluciones MEPC.159 (55) y MEPC.227 (64) han generado una revolución en las instalaciones de tratamiento de agua residual de los buques, en los que se ha mejorado las tecnologías de depuración que se venían usando y se han incorporado nuevas sistemas o equipos para mejorar los resultados de vertido del efluente a mar. Estas plantas de depuración que logran cumplir con los requerimientos exigidos, durante su proceso de depuración, generan unos lodos como resultado de la depuración, los cuales no se pueden verter al mar ya que la carga contaminante de estos es muy superior a los requisitos de vertido que se exige.

La cantidad de lodos que genere la instalación dependerá de varios factores, los principales son la cantidad de las aguas residuales y características contaminantes (TSS, BOD, etc.) de las aguas que reciba la planta y la calidad de vertido que se exija a la planta. Debido a esto se debe de calcular no solo el dimensionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales del buque, sino también las instalaciones de almacenamiento y/o tratamiento de los lodos que dicha planta depuradora genere.

3.1 OBJETIVO DEL ESTUDIO

El objetivo de este apartado es el cálculo de las cantidades de lodo que se genera una planta de depuración de aguas residuales durante su funcionamiento, tomando como cantidad de agua residual la generada (por ejemplo) por un crucero medio de 3000 pasajeros y 1000 tripulantes, con unas características del afluente de agua residual iguales a las indicadas en el MEPC 227 (64) en el apartado 5.2 (Calidad del agua sin tratar), indicando solo un valor $TSS \geq 500$ mg/L (por lo que se usara $TSS=500$ para los cálculos), y no dando un valor concreto al resto de los valores, sino que dice que será

agua residual producida durante el normal funcionamiento del buque, lo cual plantea la necesidad de dar unos valores adecuados a ciertos valores del agua residual (BOD_5) ya que estos intervienen directamente en la cantidad de lodos generados.

Como requisitos de efluente tomaremos los más restrictivos que aplica la legislación internacional, que son los requisitos de la resolución MEPC 227 (64) que IMO aplica para las zonas especiales (actualmente solo el Mar Báltico).

3.1.1 Cálculo de la caudal de agua residual sin tratar que se produce

En este apartado se calculará unos valores de caudal de agua residual sin tratar (siendo esta la suma de las aguas negras y aguas grises) que produzca el crucero tipo que se ha elegido, para ello debemos de buscar en la bibliografía existente los valores medios de producción de aguas residuales se producen en un crucero y multiplicarla por la cantidad de personas que están embarcadas en él.

Un cálculo bastante preciso de la cantidad de agua residual que se produce en un crucero es el que se realizó en el artículo “Estimated nutrient load from waste water origination from ship in the Baltic Sea area Undated 2009” Hänninem, Sassi, en el cual utilizando las referencias de otros libros y artículos (BMEPC, 1990. The Ocean Conservancy, 2002. Salama, 2005. HELCOM Recommendation 11/10 gives guidelines for the capacity calculation of sewage systems on-board passenger ships, HELCOM, 1990), dando como resultado los valores de la siguiente tabla.

Tabla 2. Cálculos de capacidad para sistemas de tratamiento de aguas residuales a bordo de un buque de pasaje (Helcom, 1990)

	Sistema convencional (gravedad) [L/persona día]	Sistema Vacío [L/persona día]
Aguas negras	70	25
Aguas residuales totales	230	185

Consideraremos que el crucero tipo elegido tiene instalado un sistema de saneamiento convencional (gravedad), para realizar el cálculo en la opción menos óptima, por tanto, la cantidad de agua residual generada en el crucero será:

$$Q_{Total\ a\ tratar} = n^{\circ}\ de\ personas\ embarcadas \times \frac{L}{persona\ dia}$$

Introduciendo los datos que se tiene:

$$Q_{Total\ a\ tratar} = 4000\ personas \times \frac{230L}{persona\ dia} = \mathbf{920000L/día}$$

3.1.2 Determinación del valor de BOD₅ de agua residual sin tratar

La determinación un valor adecuado para la demanda biológica de oxígeno a 5 días (BOD₅) del agua residual sin tratar debe apoyarse en la bibliografía existente, la cual ha determinado unos valores medios obtenidos de la observación de las aguas residuales de cruceros.

En el artículo de Jussi Vikainen “Holistic Evaluation of Cruise Vessel Advanced Wastewater Purification Process through Mass Balance”, 2012, se exponen unos valores promedio para las diferentes fracciones de agua residual procedentes de la recolección de datos de varios buques de las flotas de Royal Caribbean International y Celebrity Cruises, los cuales se exponen en la siguiente tabla para un buque de 3820 personas embarcadas:

Tabla 3. Valores promedio de diferentes tipos de agua residual para un barco de 3820 personas embarcadas. (Vikainen, 2012)

Wastewater stream	Average flow m ³ /d	Average BOD mg/l	Average TSS mg/l	pH range*
Accommodation water	458	370	100	6-7
Galley water	175	2000	2500	3-4
Laundry water	95	200	100	7-9
Black water	68	2300	1870	7-8
Food waste reject water	7	40000	23000	<3,5**
Sludge reject water	19	10000	1000	N/A
Total influent	822	1350	1000	~7

*pH values from Evac Oy data on Voyager class ships.

**Estimation

Otros artículos o estudios realizados por las autoridades de los estados unidos de los cuales podemos encontrar un resumen en el artículo “Graywater Discharges from Vessels” realizado por la oficina de gestión de las aguas residuales de la agencia de protección del medio ambiente de los Estados Unidos en 2011, plantean en la tabla siguiente unos valores medios para los cruceros.

Tabla 4. Concentraciones medias de aguas grises no tratadas. (EPA, 2011).

Analyte	Units	Average Untreated Graywater Concentrations			
		Large Cruise Ships (EPA 2004 Data) ^a	Large Cruise Ships (ASCI/ADEC Data) ^b	Armed Forces Vessels ^c	Domestic Sewage ^d
Alkalinity	mg/L	53.8	57.8	NR	NR
Ammonia Nitrogen	mg/L as N	2.13	2.21	102	12 - 50
BOD ₅	mg/L	1,140	354	540	110 - 400
COD	mg/L	1,890	1,000	1,440	200 - 780
Chloride	mg/L	125	NC	NR	NR
Conductivity	uS/cm	427	2,250	NR	NR
Fecal Coliform		36,000,000 CFU/100 mL	2,950,000 MPN/100 mL	142,000 CFU/100 mL	10,000-100,000 CFU/100 mL*
Hexane Extractable Material	mg/L	149	78 ^f	164	50 - 150
Nitrate/Nitrite	mg/L	0.087	0.009	3.2	NR
pH	s.u.	6-9	6-9	NR	NR
Settable Residue	mg/L	25.6	1.1	NR	NR
Silica Gel Treated Hexane Extractable Material	mg/L	36.6	NC	NR	NR
Sulfate	mg/L	49.9	NC	NR	NR
Temperature	°C	39.6	NC	NR	NR
Total Dissolved Solids	mg/L	578	NC	1,760	NR
Total Kjeldahl Nitrogen	mg/L	26.2	11.1	140	NR
Total Organic Carbon	mg/L	535	481	224	NR
Total Phosphorous	mg/L	10.1	3.3	NR	4 - 8
Total Residual Chlorine	ug/L	NR	0.37	NR	NR
TSS	mg/L	704	318	802	120 - 360
Turbidity	mg/L	224	NC	NR	NR

*"NC" indicates that this information was not collected.

"NR" indicates that this information was not reported.

a. EPA used flow rates for the individual graywater sources to calculate a flow-weighted average to represent untreated graywater. Graywater sources include accommodations, galley, laundry, and food pulper (USEPA, 2008b).

b. (ADEC, 2001), (USEPA, 2008b)

c. (USEPA, 1999)

d. (Qasim, 1999)

e. (Metcalf & Eddy, 1991)

f. Measured as oil and grease.

Tabla 5. Concentraciones medias de aguas grises no tratadas. (EPA, 2011).

Analyte	Average Large Cruise Ship AWTS Influent Concentration ^a	Average Large Cruise Ship AWTS Effluent Concentration ^b	Overall AWTS Percent Removal ^a
Ammonia (mg/L as N)	78.6	36.6	58 to 74
BOD ₅ (mg/L)	526	7.99	>99
COD (mg/L)	1,140	69.4	>93 to 97
Fecal Coliform (CFU/100 ml)	103,000,000	14.5	>99
Oil and Grease ^c (mg/L)	95.6	5.74	>91 to >96
Total Chlorine (mg/L)	NA	0.34	NC
Total Phosphorous (mg/L)	18.1	5.05	41 to 98
TSS (mg/L)	545	4.5	>99

Source: (USEPA, 2008b)

The ">" symbol indicates a minimum level of removal.

NA: Data not available.

NC: Not calculated.

a. Based on data collected by EPA in 2004 and 2005.

b. Based on data collected by ADEC/USCG 2003 to 2005; data collected by EPA in 2004 and 2005; and data collected through EPA's 2004 cruise ship survey.

c. Oil and Grease measured as Hexane Extractable Material (HEM).

Viendo los diferentes estudios y artículos se puede determinar que no existe un valor medio que se pueda tomar como general, y que dependerá de las

características de los buques utilizados para el estudio, aunque se puede observar que los valores de demanda biológica de oxígeno a 5 días (BOD₅) normalmente son superiores a los sistemas de saneamiento domestico de tierra (Hanna-Kaisa Huhta et al., 2009).

Para el estudio que se va a realizar se tomaran los valores más desfavorables de BOD₅ que se han aportado, que son de **BOD₅ = 1350mg/L**

3.1.3 Determinación de la producción total de lodos

La determinación de la cantidad de lodos producida se va a realizar con el apoyo de los siguientes libros:

- Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. Mc Graw Hill 3ª Edición.
- Tejero, I., Suarez, J., Jácome, A., y Temprano, J. (2001). *Introducción a la ingeniería sanitaria y ambiental*. Unican y UDC.

Podríamos decir que la producción total de lodos que se generan el proceso es la suma de los lodos producidos por los sólidos en suspensión total (TSS) que transporta el agua residual y los generados por la reducción de demanda biológica de oxígeno a 5 días (BOD₅)

$$P_{total\ de\ lodos} = P_{lodos\ TSS} + P_{lodos\ BOD5}$$

El cálculo de este valor dependerá del tipo de instalación que se use para el tratamiento de las aguas residuales, en este caso se calculará para las tres instalaciones más comunes:

- Sistema convencional de tratamiento biológico (Lodos activos)
- Reactor biológico de membrana-MBR
- Reactor biológico de lecho móvil-MBBR

3.1.3.1 Cálculo de lodos para un sistema convencional de tratamiento biológico de lodos activos

Para proceder al cálculo de los lodos generados durante el proceso de depuración por un sistema convencional de tratamiento biológico por fangos activos se debe calcular por separado los dos valores de la fórmula anteriormente descrita:

$$P_{\text{total de lodos}} = P_{\text{lodos TSS}} + P_{\text{lodos BOD5}}$$

En donde la producción de lodos de los sólidos totales en suspensión (SST) se obtendrá de:

$$P_{\text{Lodos TSS}} = Q_{\text{Total a tratar}} \cdot (X_{\text{lodos TSS entrada}} - X_{\text{lodos TSS salida}})$$

Transponiendo los datos que se obtuvieron anteriormente:

$$P_{\text{Lodos TSS}} = 920\text{m}^3/\text{dia} \cdot (500\text{Kg}/\text{m}^3 - 35\text{Kg}/\text{m}^3)$$

O lo que es igual:

$$P_{\text{Lodos TSS}} = 427,8 \text{ Kg/dia}$$

Para el cálculo de la producción total de lodos por la eliminación de BOD5 se obtendrá se utilizará la siguiente fórmula:

$$P_{\text{Lodos BOD5}} = P_f^a \cdot (Q_{\text{Total a tratar}} \cdot (X_{\text{lodos BOD5 entrada}} - X_{\text{lodos BOD5 salida}}))$$

Donde P_f^a es la producción específica de lodo (mg SSV / mg BOD5 eliminado), que según (Metcalf & Eddy, 1995) tienen un valor de 0,55. Por lo que sustituyendo los valores en la fórmula dará:

$$P_{\text{Lodos BOD5}} = 0,55 \text{Kg SSV/Kg BOD5 elim.} (920 \text{m}^3/\text{día} (1,350 \text{kg}/\text{m}^3 - 0,025 \text{Kg}/\text{m}^3))$$

O lo que es igual:

$$P_{\text{Lodos BOD5}} = 670,45 \text{ Kg/día}$$

La cantidad final de lodos producida por un sistema convencional de lodos activos será:

$$P_{\text{total de lodos}} = 427,8 \text{ Kg/día} + 670,45 \text{ Kg/día} = 1098,25 \text{ Kg/ día}$$

3.1.3.2 Cálculo de lodos para un reactor biológico de membrana-MBR

Para proceder al cálculo de los lodos generados durante el proceso de depuración por un reactor biológico de membrana-MBR se debe calcular por separado los dos valores de la fórmula anteriormente descrita:

$$P_{\text{total de lodos}} = P_{\text{lodos TSS}} + P_{\text{lodos BOD5}}$$

En donde la producción de lodos de los sólidos totales en suspensión (SST) se obtendrá de la fórmula, a la cual debemos de sumarle los sólidos suspendidos totales que retendrá la membrana, que son la totalidad de los

sólidos en suspensión, ya que el vertido de sólidos en suspensión total (TSS) será 0 mg/L

$$P_{\text{Lodos TSS}} = Q_{\text{Total a tratar}} \cdot ((X_{\text{lodos TSS entrada}} - X_{\text{lodos TSS salida}}) + P_{\text{Lodos TSS membrana}})$$

Transponiendo los datos que se obtuvieron anteriormente:

$$P_{\text{Lodos TSS}} = \frac{920 \text{ m}^3}{\text{día}} \cdot ((500 \text{ kg/m}^3 - 35 \text{ kg/m}^3) + (35 \text{ kg/m}^3))$$

O lo que es igual:

$$P_{\text{Lodos TSS}} = 460 \text{ kg/día}$$

Para el cálculo de la producción total de lodos por la eliminación de BOD5 se obtendrá se utilizará la misma fórmula que para el sistema convencional de tratamiento biológico por lodos activos:

$$P_{\text{Lodos BOD5}} = P_f^a \cdot (Q_{\text{Total a tratar}} \cdot (X_{\text{lodos BOD5 entrada}} - X_{\text{lodos BOD5 salida}}))$$

Donde P_f^a es la producción específica de lodo (mg SSV / mg BOD5 eliminado), que según Metcalf & Eddy, 1995 tienen un valor de 0,55. Por lo que sustituyendo los valores en la fórmula dará:

$$P_{\text{Lodos BOD5}} = 0,55 \text{ Kg SSV/Kg BOD5 elim.} (920 \text{ m}^3/\text{día} (1,350 \text{ kg/m}^3 - 0,025 \text{ Kg/m}^3))$$

O lo que es igual:

$$P_{\text{Lodos BOD5}} = 670,45 \text{ Kg /día}$$

La cantidad final de lodos producida por un sistema convencional de lodos activos será:

$$P_{\text{total de lodos}} = 460 \text{ Kg/día} + 670,45 \text{ Kg/día} = 1130,45 \text{ Kg/ día}$$

3.1.3.3 Cálculo de lodos para un reactor biológico de lecho móvil – MBBR

Para proceder al cálculo de los lodos generados durante el proceso de depuración por un reactor biológico de lecho móvil-MBBR se debe calcular por separado los dos valores de la fórmula anteriormente descrita:

$$P_{\text{total de lodos}} = P_{\text{lodos TSS}} + P_{\text{lodos BOD5}}$$

Transponiendo los datos que se obtuvieron anteriormente:

$$P_{\text{Lodos TSS}} = 920 \text{ m}^3/\text{día} \cdot (500 \text{ kg/ m}^3 - 35 \text{ kg/ m}^3)$$

O lo que es igual:

$$P_{\text{Lodos TSS}} = 427,8 \text{ kg/día}$$

Para el cálculo de la producción total de lodos por la eliminación de BOD₅ se basará en datos obtenidos de experimentación y plantas pilotos, se viene diciendo que la producción de lodos debido a la reducción de BOD de un sistema MBBR es de alrededor de un 60% menor que un sistema biológico convencional. Por tanto, si la producción específica de lodo (mg SSV / mg

BOD₅ eliminado), tienen un valor de 0,55 para un sistema biológico convencional, para un MBBR será el 40% de ese valor. Por lo que sustituyendo los valores en la formula dará:

$$P_{\text{Lodos BOD5}} = P_f^a \cdot (Q_{\text{Total a tratar}} \cdot (X_{\text{lodos BOD5 entrada}} - X_{\text{lodos BOD5 salida}}))$$

Donde P_f^a en este caso es 0,22 mg SSV / mg BOD₅ eliminado, sustituyendo:

$$P_{\text{Lodos BOD5}} = 0,22 \text{ kg SSV/kg BOD5 elim.} \cdot (920 \text{ m}^3/\text{día} \cdot (1,350 \text{ kg/ m}^3 - 0,025 \text{ kg/ m}^3))$$

O lo que es igual:

$$P_{\text{Lodos BOD5}} = \mathbf{268,28 \text{ kg /día}}$$

La cantidad final de lodos producida por un MBBR será:

$$P_{\text{total de lodos}} = \mathbf{427,8 \text{ kg/día} + 268,28 \text{ kg/día} = 696,08 \text{ kg/ día}}$$

3.2 GESTIÓN DE LOS LODOS PRODUCIDOS POR LOS PROCESOS

En este apartado se buscarán alternativas adecuadas para la gestión de las cantidades de lodos que va a generar las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Tomando como ejemplo la cantidad de lodos generados por el MBR (la mayor de las tres, con 1130 kg/día), y suponiendo que la purga de lodos se realiza a la concentración de lodos que tenemos en el biológico, este valor de concentración está directamente ligado con la edad del lodo (Θ_c), la cual,

según Metcalf & Eddy, (1995) y Tejero et al, (2001) los dos libros indicados anteriormente, para obtener reducciones del 80% de Nitrógeno deben de ser mayores de 15 días ($\Theta_c > 15$ días), siguiendo con las indicaciones de dichas referencias, la concentración de lodos de un biológico con una edad del lodo de 15 días es de 3500 mgSS/m³, tendríamos una producción de lodos a dicha concentración de 322,85 m³/día de lodo (concentración de 3,5%MS).

Debido a que los volúmenes de lodos producidos son considerables para poder almacenarlo en los tanques del buque, se deben plantear alternativas encaminadas a su reducción, estabilización y/o eliminación.

3.2.1 Espesado

El objetivo del proceso de espesado es separar las dos fases (sólidos y agua), aumentando las concentraciones de sólidos, produciendo así que el volumen de lodos sea menor, aumentando así la capacidad de almacenamiento, y la cantidad de lodos a tratar para procesos posteriores (si se requieren).

Esta acción se puede realizar mediante tres tipos de procesos:

- Espesado por gravedad
- Espesado por flotación
- Espesado mecánico

Siendo los dos primeros procesos continuos, que exigen un aporte de un caudal constante de lodos, además de grandes superficies y tiempos de retención, en contrapartida son sistemas con unos costes de funcionamiento muy bajos (Lasheras, 2013).

Los procesos espesado mecánico son procesos discontinuos, por tanto, se pueden utilizar según se requieran, aunque precisen de un accionamiento mecánico y la adicción de reactivos (coagulantes/floculantes) que faciliten la decantabilidad del lodo, destacan en estos procesos las centrifugadoras decantadoras, tambores rotativos y mesas espesadoras. Son equipos

compactos de tamaños relativamente pequeños, respecto a los sistemas de espesado por gravedad y espesado por flotación, con los que se logran concentraciones del 4-7%MS.

La utilización de equipos de espesamiento mecánico es la más viable para el empleo en los buques debido a que el espacio útil en estos es muy pequeño, además de que se necesita la versatilidad de un uso intermitente de los equipos, adecuándolo a las necesidades del buque.

3.2.2 Estabilizado

Si existe la necesidad de almacenamiento de los lodos durante un periodo de tiempo determinado, debido a que no se pueden descargar en a una planta de tratamiento de tierra (no existe la posibilidad, la duracion de la travesia es larga, etc.) o no se pueden eliminar de un modo ráapido o inmediato, se crea la necesidad de estabilizar los lodos para disminuir su capacidad de generar olores y descomposicion rápida, además de generar un producto libre de gran parte de los patógenos (Canut et al., 2015).

Para este proceso existen diferentes metodos:

- Estabilización química
- Higenización térmica
- Digestión anaerobia
- Digestión aerobia

Para los procesos de digestión aerobia y anaerobia se necesitan tiempos de retención relativamente altos (como mínimo 5 y 20 días respectivamente) en condiciones anaerobias o aerobias, por lo que la viabilidad de éstos radica en la disponibilidad de grandes tanques de almacenamiento a los que hay que generar una agitación constante. Por lo que estas opciones actualmente deben de ser descartadas (Lasheras, 2013).

La estabilidad química consiste en la oxidación de la materia orgánica mediante la adición de oxidantes fuertes o la modificación del pH del lodo mediante a adicción de ácidos o bases fuertes durante un periodo de contacto suficiente. Mediante esta estabilidad química se logra además un pequeño aumento en la sequedad del lodo.

Para la higienización térmica el método que más se utiliza es la pasteurización, en la que se somete a los lodos a temperaturas $\geq 70^{\circ}\text{C}$ durante un periodo ≥ 30 minutos.

3.2.3 Deshidratado

El siguiente paso para la reducción del volumen de lodos, es continuar con la eliminación de parte del agua que contienen mediante el proceso de deshidratado, mediante el cual se eleva el porcentaje de materia seca hasta valores del 20-30%MS, de este modo se consigue que producto resultante sea más manejable y transportable.

Para el proceso de deshidratado se utilizan sistemas que siguen los principios de la deshidratación mecánica (tornillo prensa, decantador centrífugo, etc.) o la filtración (filtro de banda, filtro prensa, filtros de vacío, etc.)

Para conseguir unos rendimientos adecuados se debe de adicionar reactivos de coagulación/floculación, tales como reactivos químicos minerales o polímeros (polielectrolitos).

Tabla 6. Resumen de las características de los procesos de deshidratación (Tejero et al, 2001).

Proceso	Sequedad torta, %	Consumo de Energía kW/t-SS	Rendimiento	Coste de Inversión
Filtro vacío	15-25	40-60	18-22 kg SS/m ² ·h	Medio
Centrífuga	20-25	60-80	-	Medio
F. Banda	27-33	30-40	Variable	Alto
Filtro prensa	40-45	40-60	3-4 kg SS/m ² ·h	Muy alto

De todos los equipos, el filtro prensa es el que mayores sequedades proporciona (>35%MS), pero los costes de inversión son muy altos, requiere gran cantidad de reactivos y tiene altos costes de explotación.

Los decantadores centrífugos son unos equipos compactos, que, aunque tienen un consumo alto de energía y reactivos, alcanzan unos porcentajes de materia seca mayores de 20%MS y con un funcionamiento totalmente automatizado y sin intervención, por tanto, son los equipos más adecuados para este proceso en los buques si la sequedad del lodo no es un factor condicionante (procesos posteriores que la requieren o factores de almacenaje).

3.2.4 Secado térmico

Si los requerimientos de almacenaje/descarga a tierra de los lodos requieren que los lodos ocupen un volumen menor, o necesita una adecuación mediante la reducción del agua que contienen para una incineración posterior de los lodos, se debe recurrir a la utilización de un secado térmico que por medio de la aplicación de una energía térmica adecuada logra extraer el agua que no se ha conseguido eliminar con los procesos anteriores de espesado y deshidratación (Conesa, 2014).

Se pueden realizar diferentes clasificaciones de los secados térmicos, dependiendo de características o tipos de funcionamiento:

- Por el tipo de operación: Pulsada o continua
- Por el método de obtención del calor. Directo o indirecto
- Por el sistema de funcionamiento: Convección o contacto (conducción y radiación)

El sistema de secado ideal debe ser en un circuito cerrado, que evite la salida de emisiones al exterior, y del que solo salga lodo seco y agua. Para poder secar el lodo se necesita el aporte de energía calorífica, el cual se realiza

mediante la combustión de combustibles en un quemador, aunque también se puede aprovechar el calor de otras fuentes residuales de calor que tenga el buque (escapes de motores principales o auxiliares, gases de calderas, agua de refrigeración de los motores, etc.), aceite térmico, vapor e incluso agua caliente.

Durante el proceso de secado de lodos se debe procurar no introducir al sistema lodos con unas sequedades menores de 50%MS, ya que a estas humedades los lodos tienen a apelmazarse y obstruir el secador. Debido a esta problemática la mayoría de los sistemas de secado térmico presentan una recirculación de lodos, mediante la cual, los lodos secados anteriormente se mezclan con los lodos húmedos, obteniéndose valores mayores de 50%MS.

Los principales sistemas de secado térmico que existen son:

- Secador de paletas
- Secador de banda
- Secador de lecho fluidificado
- Secador de tambor

Todos los secadores logran sequedades >90%Ms, lo cual reduce de un modo importante los volúmenes de lodo a almacenar en el buque, además de tenerlo estabilizado totalmente.

Debido a que los espacios para la instalación de equipos son limitados en los buques, no solo deben de primar factores de eficiencia de la instalación de secado, sino también la relación de volumen de lodos tratado por espacio ocupado y la versatilidad para adaptarse a trabajar con unos caudales de secado adecuados a las cantidades de lodos que se produzcan, por esta razón la elección de secadores de paletas puede ser la más óptima, ya que son unos equipos compactos que pueden trabajar con unas cantidades de lodos muy reducidas en comparación con los otros tres tipos, además de dejar la posibilidad de secar los lodos de un modo parcial para procesos posteriores de incineración (Conesa, 2014).

3.2.5 Eliminación de los lodos (incineración)

La eliminación de los lodos se puede realizar en cualquiera de las fases en las que se encuentren los lodos desde la fase de agua residual sin tratar, si se decide no depurar, hasta los lodos secados térmicamente. La elección de cuál es la fase en la que se deben de eliminar estará influenciada por diferentes aspectos, de los cuales los más importantes podrían ser:

- Cantidades de agua residual y/o lodos producidos
- Capacidad de almacenaje de estos
- Duración de las travesías entre puertos
- Posibilidad de descarga de agua residuales y/o lodos en los puertos de escala
- Coste de las descargas de agua residuales y/o lodos en los puertos de escala.
- Política de gestión de residuos MARPOL 73/78 dentro del buque y de la naviera.

Tabla 7. Recomendaciones de especialistas franceses respecto a la rentabilidad (*profitable*) del secado térmico, rango de secado y utilidad (Fraga, 2005)

Method of utilization	Range of drying			Goals of drying
	30-40%	60-90%	above 90%	
Agricultural	unprofitable (in respect of technical and economical issues)	profitable	profitable	1. Transport and storage convenience 2. Stabilization and sanitation (above 90% of DS)
Incineration	profitable (35-45% of DS)	unprofitable (in respect of technical and economical issues)	Profitable (if part of the sludge is totally dried and mixed with sludge of 35-45% of DS before it is directed to the incinerating facility)	1. Autothermic incineration
Co-incineration with waste	unprofitable (in respect of technical and economical issues)	profitable	profitable	1. Easier transportation, storage and operating of incinerating facility.

Si la decisión final es la eliminación de los lodos procedentes de la depuración de las aguas residuales dentro del buque, ésta se realizará por medio de la incineración.

Los equipos destinados a la incineración de residuos están regulados por las reglas del anexo VI del convenio MARPOL 73/78, en especial por la regla 16 de dicho convenio.

3.2.5.1 Anexo VI del convenio MARPOL 73/78. Regla 16

La finalidad del anexo VI del convenio MARPOL 73/78 es la prevención de la contaminación atmosférica ocasionada por los buques, el cual fue adoptado en 1997. En este anexo se restringen los principales contaminantes atmosféricos contenido en los gases de escape de los buques, en particular los óxidos de azufre (SOx) y los óxidos de nitrógeno (NOx), y se prohíben las emisiones deliberadas de sustancias que agotan la capa de ozono. En dicho Anexo también se regula la incineración a bordo, así como las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) procedentes de los buques tanque.

La regla 16 de este anexo especifica las normas para poder realizar una incineración a bordo. Esta regla indica que la incineración de los lodos de las aguas residuales, producidos durante la explotación normal del buque, se podrá realizar de los siguientes modos:

- En un incinerador de abordo que tenga un certificado OMI.
- En la planta generadora o caldera principal o auxiliar, siempre que no se lleve a cabo en puertos y estuarios, y que las emisiones de esos equipos cumplan las reglas que le apliquen del presente anexo VI.
- Otros dispositivos de tratamiento térmico a bordo que satisfaga las prescripciones de la regla 16 o las supere.

3.2.5.2 Incinerador

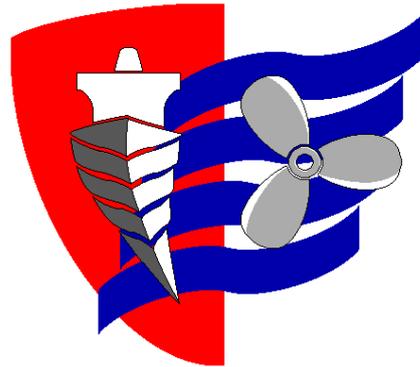
Todo incinerador que se instale a bordo de un buque actualmente debe de poseer un certificado de homologación de la OMI, que deban cumplir las

especificaciones que marca la resolución MEPC 76 (40) y las enmiendas a la especificación anterior indicadas en la resolución MEPC 93 (45), además de cumplir una prueba de funcionamiento específica utilizando una especificación normalizada de combustibles y desechos para determinar si el incinerador funciona dentro de los límites específicos de la regla.

Los incineradores deben de funcionar dentro de los siguientes límites:

- Cantidad de O₂ en cámara de combustión: 6 a 12%
- Cantidad de CO en los gases de combustión (promedio): 200mg/MJ
- Numero de hollín: Bacharach 3 (en una escala del 0 al 9) ó Ringelmann 1 (en una escala del 0 al 5). Permitiendo un número más alto durante periodos breves puntuales (arranques, por ejemplo)
- Componentes no quemados en los residuos de ceniza: Máximo 10%
- Rango de temperaturas de los gases de combustión a la salida de la cámara de combustión: 850 a 1200°C

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



CONCLUSIONES

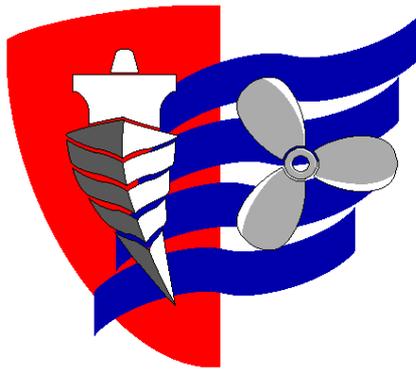
4 CONCLUSIONES

- Actualmente existe una legislación extensa en referencia a los requisitos de vertido de las aguas residuales por los buques, debido a que hay países y zonas que tienen legislación propia respecto a dicho punto, aunque dichas legislaciones van tendiendo a unificarse en normas y convenios aprobados por la Organización marítima internacional (OMI) y ratificados por los diferentes países que se adhieren a ellos, los cuales van adecuándose a las circunstancias cambiantes del tráfico marítimo. En estos momentos debido al notable incremento del tráfico de cruceros en algunas zonas, se está produciendo un aumento de las zonas especiales recogidas en el anexo IV del convenio MARPOL 73/78, para salvaguardar dichas zonas de la contaminación producida por éstos.
- La tendencia de la legislación respecto a vertido de aguas residuales al mar es imponer unos requisitos de vertido muy exigentes, este motivo genera la necesidad de un proceso o un conjunto de procesos más complejos y con rendimientos muy altos. Estos procesos tienen un consumo mayor de aire, productos y necesidades de bombeo, además de periodos de arranque de los procesos más largos y que exigen un régimen de funcionamiento continuo a unos caudales de entrada constantes.
- Las exigencias de vertido son directamente proporcionales a las cantidades de lodos producidos durante el proceso de depuración del agua residual, lo cual se traducirá en un aumento de los costes de depuración y de eliminación de los lodos. Dependiendo del proceso de depuración elegido la cantidad de lodos producidos puede variar notablemente, aunque para ello se requiera aumentar otros costes debido al aumento del consumo eléctrico (aire, necesidades de bombeo, etc.), los costes de la instalación, costes de personal cualificado y los costes de explotación y mantenimiento.

- La elección de reducción del volumen de lodos o la eliminación de estos en sus diferentes concentraciones se debe de realizar pensando en diferentes aspectos técnicos y económicos que deben ser valorados por el astillero, ingeniería y/o armador, ya que la elección de un sistema adecuado de gestión de los lodos generara un ahorro económico y de problemas de operatividad del buque.
- Las limitaciones para la elección de un sistema estándar de depuración y gestión de lodos producidos por éstos son importantes debido a que cada buque tiene unas concentraciones de contaminantes diferentes en sus aguas residuales, además de unas posibilidades de almacenaje de aguas residuales y/o lodos distintos, incluso unas opciones de eliminación del lodo distintas, por lo que se debe estudiar caso por caso cada uno de los buques para poder elegir las opciones más adecuadas a cada caso.
- Debido al incremento paulatino de los requisitos de vertido, las necesidades técnicas y la complejidad de las instalaciones de depuración de aguas residuales y gestión de los lodos se deben de ir incrementando en la misma medida, todo ello acompañado de un incremento en las necesidades de personal cualificado para la gestión y operación de dichas instalaciones. Estas nuevas mejoras irán en paralelo a las mejoras que se puedan realizar en las instalaciones terrestres, pero se deben de buscar alternativas que se adapten a las necesidades de los buques, encaminadas éstas a la casuística de estos (espacios limitados, escaso personal, adaptación al medio marino y la navegación, etc.).
- Este trabajo aporta una visión global de la legislación vigente respecto a las aguas residuales de los buques, realizando una introducción en los sistemas de depuración de dichas aguas residuales y planteando

las diferentes alternativas que se pueden elegir para una adecuada gestión de los lodos que se generan por la depuración.

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bouillot, P., Canales, A. Pareilleux, A., Huyard, A., y Goma, G.R. (1990). Membrane bioreactors for the evaluation of maintenance phenomena in wastewater treatment. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 69(3), 178-183.
- Côté, P., Buisson, H., Pound, C., y Arakaki, G. (1997). Immersed membrane activated sludge for the reuse of municipal wastewater. *Desalination*, 113 (2-3), 189-196.
- Espigares García, M., y Pérez López, J.A. (1985). *Aspectos sanitarios del estudio de las aguas*. Universidad de Granada. Servicio de Publicaciones. Granada.
- Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. Mc Graw Hill 3ª Edición
- Rosenberger, S., y Kraume, M. (2002). Filterability of activated sludge in membrane bioreactors. *Desalination*, 151, 195-200.
- Tejero, I., Suarez, J., Jácome, A., y Temprano, J. (2001). *Introducción a la ingeniería sanitaria y ambiental*. Ucan y UDC.

5.1 LEGISLACIÓN

- California government. Assembly bill (A.B) 121 (2003), 906 (2003), 2093 (2004), 2672 (2004) y Senate bill (S.B) 771 (2005).
- Canada government. (1987). Shipping conferences exemption act. R.S.C. 1985, c. 17. Minister of justice 3rd edition.
- Canada government. (2001). Canada shipping act. S.C.2001, c.26. Minister of justice
- Canada government. (2013). Vessel pollution and dangerous chemicals regulations. SOR/2012-69. Minister of justice of Canada.
- Canada government. (2007). Great lakes sewage pollution prevention regulations. C.R.C. c. 1429. Minister of justice of Canada

Canada government. (2007). Pleasure craft sewage pollution prevention regulations. SOR/91-661. Minister of justice of Canada

Canada government. (2007). Non-pleasure craft sewage pollution prevention regulations. SOR/91-659. Minister of justice of Canada

Canada government (2016). Arctic shipping pollution prevention regulations. C.R.C., c.353. Minister of Justice of Canada

IMO. (1976). MEPC.2(VI) Recommendation on international effluent standard and guidelines for performance test for sewage treatment plants. IMO

IMO. (1997). MEPC.76 (40). Standard specification for shipboard incinerators. IMO

IMO. (2000). MEPC.93 (45). Amendments to the standard specification for

IMO. (2001). Resolution A.927(22). Guideline for the designation of special areas under MARPOL 73/78 and guideline for the identification and designation of particular sensitive sea area. IMO

IMO. (2002). Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques. 1973, modificado por el protocolo de 1978 (MARPOL73/78). IMO edición refundida.

IMO. (2004). MEPC.115(51). Amendments to the annex of the protocol of 1978 relating to the international convention for the prevention of pollution from ships, 1973. IMO

IMO. (2006). MEPC.157 (55) Recommendation on standards for the rate of discharge of untreated sewage from ship. IMO

IMO. (2006). MEPC.159(55). Revised guidelines on implementation of effluent and performance test for sewage treatment plants. IMO

IMO. (2011). MEPC.200(62). Amendments to the annex of the protocol of 1978 relating to the international convention for the prevention of pollution from ships, 1973. IMO

IMO. (2012). MEPC.227 (62). 2012 guidelines on implementation of effluent standard and performance test for sewage treatment plants. IMO

IMO. (2013). DE 57/11/14. Measures to prevent pollution of polar water by sewage and grey water shipboard incinerators. IMO

IMO. (2014). MEPC.244 (66).2014 Standard specification for shipboard incinerators. IMO

The people of the state of Maine (2004) L.D. 1158, an act to protect Maine's coastal water.

- Tratado Antártico. (1991). Protocolo al tratado Antártico sobre protección del medio ambiente (incluyendo anexo 3). Secretaría del Tratado Antártico.
- U.S. government. (1973). Public Law 92-500 to amend the federal water pollution control act (CWA). U.S. Government publication
- U.S. government. (2002). Federal water pollution control act (CWA). 33 U.S.C. 1251 et seq. U.S. Government publication
- U.S. government. (2011). 33 CFR Part 159 (159.1-159.321)-Marine sanitation devices. U.S. Government publication
- U.S. Department of homeland security (2009). NVIC 1-09, Voluntary compliance with international sewage regulation annex IV to MARPOL 73/78
- U.S. government. (1997). 40 CFR Part 133 Secondary treatment regulation. U.S. government publication

5.2 WEBGRAFÍA

- Aeijelts, C.W., T.A. den Dunnen, T.A., y Vis, M. (2012). *Report "Sewage treatment plants"*. https://www.ilent.nl/Images/Report%20'Sewage%20treatment%20plants'_tcm334-358106.pdf [Consultado febrero 2017]
- Alaska department of environmental conservation (2013). 18 AAC 69 Commercial passenger vessel environmental compliance program. <https://dec.alaska.gov/commish/regulations/pdfs/18%20AAC%2069.pdf> [Consultado febrero 2017]
- Alaska department of environmental conservation, (2016). 2016 Ocean Ranger Guidebook https://dec.alaska.gov/water/cruise_ships/pdfs/2016_OR_Guidebook.pdf [Consultado febrero 2017]
- Alaska department of environmental conservation, (2010). 2010 Large commercial passenger vessel wastewater discharge general permit information

sheet.https://dec.alaska.gov/water/cruise_ships/pdfs/2010_Cruise_Ship_Info_Sheet_FINAL.pdf [Consultado febrero 2017]

Álvarez, M., y Mavares, D. (2015). Reactores biopelícula de lecho móvil: Estado del arte. *Revista REDIP UNEXPO Venezuela*, 5(3).

<http://redip.bqto.unexpo.edu.ve/index.php/redip/article/download/311/130>

[Consultada febrero 2017]

Canut, J., Donato, J., y Sanz, R. (2015). *Reducción de lodos generados en estaciones depuradoras de aguas residuales industriales*.

<http://www.sitra.es/sites/default/files/Reducci%C3%B3n de lodos generados en E DARI's CTC JUN 2015.pdf> [Consultado febrero 2017]

Caro, R. (2010). Estudio de aplicación de biorreactores de membrana (MBR) en la depuración de aguas residuales. TFM UCA

<http://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/16511/Proyecto%20fin%20de%20M%C3%A1ster%20GIA%202010.pdf?sequence=1> [Consultado febrero 2017]

Conesa, J.A. (2014). *Lodos de depuración. Secado térmico y valorización energética*. UA.

https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/36058/1/Secado_valorizacion_lodos_RUA.pdf [Consultado febrero 2017]

Cyclus. <http://www.cyclusid.com/> [Consultado enero 2016]

Diez, M.T., y de la Macorra, C. (2014). Utilización de membranas como tratamiento terciario para la regeneración de aguas residuales: Membranas cerámicas. *Revista tecnología y desarrollo*.

<http://www.uax.es/publicacion/utilizacion-de-membranas-como-tratamientos-terciarios-para-regeneacion.pdf> [Consultada febrero 2017]

Degremont. <http://www.degremont.es/es/images/pdf/06-feuillet-memento-degremont-es-n-6%20-dehydri%20twist.pdf> [Consultado diciembre 2016]

Hanna-Kaisa Huhta, Jorma Rytönen & Jukka Sassi (2009). *Estimated nutrient load from waste waters originating from ships in the Baltic Sea area*.

<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2007/T2370.pdf> [Consultado febrero 2017]

Fraga, A. (2005). *Sludge drying*

<http://rymd.lwr.kth.se/forskningsprojekt/Polishproject/rep13/Flagasludgedrying73.pdf>

[Consultado febrero 2017]

HELCOM (1990). HELCOM Recommendation 11/10. Guidelines for capacity calculation of sewage system on board passenger ships. Adopted 14 February 1990, having regard to Article 13, Paragraph b) of the Helsinki Convention.

<http://helcom.fi/Recommendations/Rec%2011-10.pdf> [Consultado febrero 2017]

Jussi Vikainen, (2012) *Holistic Evaluation of Cruise Vessel Advanced Wastewater Purification Process through Mass Balance,*

https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/54011/Vikainen_Jussi.pdf?sequence=1 [Consultado febrero 2017]

Koboevic, Z., y Kurtela, Z. (2011). *Comparison of marine sewage treatment systems.*

https://bib.irb.hr/datoteka/570916.COMPARISON_OF_MARINE_SEWAGE_TREATMENT_SYSTEMS.pdf [Consultado febrero 2017]

Lasheras, A.M. (2013). *Tratamiento de fangos, técnicas de espesamiento y estabilización.*

Nilsa. <http://catedramln.unizar.es/files/conferencias/lodos2013/LAsheras.pdf>

[Consultado febrero 2017]

Ministerio de economía, industria y competitividad

<http://www.idi.mineco.gob.es/portal/site/MICINN/menuitem.7eeac5cd345b4f34f09dfd1001432ea0/?vgnnextoid=97f2efb8b7c0f210VgnVCM1000001d04140aRCRD>

[Consultado Enero 2016]

Soriano, A. (2001) Investigación sobre el empleo de membranas en tratamientos

terciarios de desinfección. Tesis doctoral UPM. <http://oa.upm.es/372/1/04200104.pdf>

[Consultado febrero 2017]

Triple enlace. <http://triplenlace.com/2013/05/17/sistemas-de-depuracion-de-aguas-residuales-26-caracteristicas-de-las-aguas-residuales-urbanas/>[Consultado:

diciembre 2016]

Universidad de Salamanca.

http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/curso/uni_03/U3C3S6.htm

[Consultado: diciembre 2016]

Washington State department of ecology, cruise lines international association-north west & Canada, and the port of Seattle. (2004). Memorandum of understanding cruise operations in Washington state.

http://www.ecy.wa.gov/programs/wq/wastewater/cruise_mou/2016MOUAmendment.pdf [Consultado febrero 2017]