

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN  
MARINA**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

***DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN COMPACTA  
PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA EN UN  
CRUCERO***

**Estudiante** *Delera, Urreiztieta, Mikel*  
**Director/Directora** *López, Arraiza, Alberto*  
**Departamento** *CC. y TT. de la Navegación,  
Máquinas y Construcciones Navales*  
**Curso académico** *2019-2020*

*Bilbao, 02, setiembre, 2020*

## Resumen en castellano

En el presente Trabajo Fin de Master se ha realizado el diseño de una instalación compacta para la gestión integral del agua en un crucero de 400 personas y que supone un volumen total de agua a tratar de  $V_T = 130$  Tn/día. Para ello, se han calculado y dimensionado las instalaciones necesarias para la generación de agua dulce a partir del agua de mar. Además, se proponen las instalaciones necesarias para depurar el agua residual generada en el crucero y a partir del agua depurada, darle un tratamiento tal que puedan ser reutilizadas en el buque.

El sistema de generación de agua dulce propuesto está compuesto por un generador multiefecto que utiliza el circuito de refrigeración de los motores como fuente de energía para la vaporización del agua, con lo cual, se aprovecha la energía calorífica residual generada en los motores, y además se evita la aparición de incrustaciones al trabajar con  $T^a < 100^{\circ}\text{C}$ .

La depuradora para el agua residual es un biorreactor de membranas que combina la depuración mediante fangos activos y un tratamiento terciario mediante membranas de ultrafiltración. La calidad del agua depurada es tan alta que permite un uso posterior.

Finalmente, el agua depurada se destila para su reutilización en la refrigeración de los motores principales y auxiliares, en las calderas de calefacción, en los inodoros y en las depuradoras del combustible y el aceite.

El trabajo para su desarrollo tiene en cuenta la normativa actual aplicando las normas como la Guía para la calidad del agua editada por la OMS. Para la depuración del agua residual se aplica el anexo 4 del convenio MARPOL 73/78 referente a las reglas para prevenir la contaminación por las aguas sucias de los buques y concretamente en su última resolución MECP 227 (64). La normativa aplicada para la reutilización se realiza en base a las guías de reutilización de aguas de la UESPA y el RD 1620/2007 del Estado español.

**Palabras clave:** crucero, depuración de agua, generador multiefecto, biorreactor de membranas.

## Abstract in English

In the present Master's End Work, a compact installation has been designed for the integral management of water in a 400-person cruise ship. The total volume of water to be treated is  $V_T = 130 \text{ Tn/day}$ . For this purpose, the necessary installations for the generation of fresh water from seawater have been calculated and sized. In addition, the necessary facilities are proposed to purify the waste water generated in the cruise and from the treated water, to give it a treatment such that they can be reused in the ship.

The proposed fresh water generation system is composed of a multi-effect generator that uses the engine cooling circuit as an energy source for water vaporization, which takes advantage of the residual heat energy generated in the engines, and also avoids the appearance of incrustations when working with  $T^a < 100^\circ\text{C}$ .

The wastewater treatment plant is a membrane bioreactor that combines purification by activated sludge and tertiary treatment by ultrafiltration membranes. The quality of the purified water is so high that it can be used later.

Finally, the treated water is distilled for reuse in the cooling of main and auxiliary engines, in heating boilers, in toilets and in fuel and oil treatment plants.

The work for its development takes into account the current regulations by applying standards such as the Guide to Water Quality published by the WHO. Annex 4 of the MARPOL 73/78 Convention on regulations for the prevention of pollution from ships by sewage is applied to wastewater treatment, specifically in its latest resolution MECP 227 (64). The regulations applied for reuse are based on the UESPA water reuse guidelines and the Spanish Royal Decree 1620/2007.

**Keywords:** cruise, water purification, multi-effect generator, membrane bioreactor

## Laburpena euskaraz

Esku artean dugun Master Amaierako Lan honetan instalazio trinko bat diseinatu da gurutzaontzi batean ur-kudeaketa integrala egiteko, zeinak  $VT=130$  Tn/egun ur-bolumena tratatzea eskatzen baitu. Horretarako, bi instalazio kalkulatu eta dimentsionatu dira: batetik, itsasoko ur gazia ur geza bihurtzekoa; bestetik, gurutzaontzien hondakin-ura araztekoa, ondoren tratamendu bat eman eta berrerabilgarri izan ahal izateko.

Sorgailu efektu aniztun bat da ur geza sortzeko sistema, zeinak motorren errefrigerazio-zirkuituak erabiltzen baititu, ura lurruntzeko energia-iturri gisa. Beraz, aprobetxatu egiten da motorren hondar bero-energia, eta saihestu egiten da hodietan inkrustazioak agertzea, sistemaren tenperatura  $100^{\circ}\text{C}$  baino baxuagoa izanik.

Mintzez osaturiko bioerreaktore bat da hondakin-ura arazteko sistema, zeinak bi eginkizun betetzen baititu: lohi aktibatuen bidezko tratamendua eta ultrafiltrazio-mintzen bidezko 3. tratamendua. Lortutako uraren kalitatea hain da handia, ezen erabilgarria izango baita.

Bukatzeko, ur araztua destilatu egiten da berrerabiltzeko motor nagusi eta osagarrien hozte-sisteman, berotze-galdaretan, komunetan, eta erregaiaren eta olioaren araztegietan.

Proiektu hau egiteko egungo arautegia hartu da oinarritzat. Besteak beste, OMEren Uraren Kalitaterako Gida; MARPOL 73/78 hitzarmenaren 4. eraskina, itsasontzien ur zikinen kutsadura ekiditeko, zehazki, MECP227 (64) azken ebazpena; eta ura berrerabiltzeko UESPE Gidak eta Espainiako Estatuko 1620/2007 ED.

**Hitz gakoak:** gurutzaontzia, ur araztua, sorgailu efektu aniztuna, mintzez osaturiko bioerreaktorea.

## ÍNDICE

<b>Índice de tablas</b>	<b>7</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>8</b>
<b>Índice de acrónimos</b>	<b>9</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>10</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>11</b>
<b>3. Estado del Arte</b>	<b>12</b>
<b>3.1 Los cruceros y su problemática en la gestión del agua</b>	<b>12</b>
<b>3.2 Agua Sanitaria</b>	<b>14</b>
3.2.1 Normativa	15
<b>3.3 Agua residual</b>	<b>20</b>
3.3.1 Normativa	20
<b>3.4 Agua reutilizada</b>	<b>23</b>
3.4.1 Normativa	24
<b>4 Desarrollo del trabajo</b>	<b>29</b>
<b>4.1 Generación de agua en un crucero</b>	<b>29</b>
4.1.1 Instalación propuesta	31
4.1.2 Equipos de generación de agua	32
4.1.2.1 Generador de agua dulce	32
4.1.2.2 Grupo hidróforo	34
4.1.2.3 Potabilizadora	35
4.1.2.4 Calentador de agua sanitaria	35
4.1.2.5 Diagrama de la instalación propuesta	36
4.1.3 Dimensionamiento de la instalación	37
4.1.3.1 Generador	37
4.1.3.2 Depósito de alimentación de agua destilada	39
4.1.3.3 Grupo de presión de agua destilada	39
4.1.3.4 Depósito acumulador del grupo de presión	42
4.1.3.5 Calentador de agua caliente sanitaria	43
4.1.3.6 Resumen del equipamiento de una instalación	43
<b>4.2 Depuración de agua residual</b>	<b>45</b>
4.2.1 Instalación propuesta para la depuración del agua residual	49
4.2.2 Equipamiento para la depuración del agua residual	49
4.2.2.1 Pretratamiento	49
4.2.2.2 Tratamiento secundario	51
4.2.2.3 Tratamiento terciario	53
4.2.3 Dimensionamiento de la depuradora de agua residual	56
4.2.3.1 Pretratamiento	56

4.2.3.2 Tanque de homogenización	56
4.2.3.3 Tratamiento biológico	56
4.2.3.4 Membranas	63
<b>4.3 Reutilización del agua depurada</b>	<b>64</b>
4.3.1 Consumos de agua en los motores	64
4.3.2 Consumos de agua en las calderas	67
• Tanques de fuel oil de uso diario de los motores	68
• Calentadores de combustible	68
4.3.3 Consumos de agua en las separadoras de combustible y aceite	68
4.3.4 Consumos de agua en aseos	69
4.3.5 Resumen de los consumos del agua reutilizada	69
<b>5 Conclusiones</b>	<b>71</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>72</b>

## Índice de tablas

<i>Tabla 1: Cruceros similares a los del proyecto [2]</i> .....	14
<i>Tabla 2: Estándares de la calidad del agua potable [1]</i> .....	18
<i>Tabla 3: Evolución resoluciones Marpol, anexo (IV) [11]</i> .....	22
<i>Tabla 4: Enfermedades transmitidas por el agua residual [13]</i> .....	23
<i>Tabla 5: Criterios de calidad del y uso de las aguas reutilizadas en Estados Unidos [15]</i> .....	24
<i>Tabla 6: Criterios de la calidad de las aguas para la reutilización y sus usos [17]</i> .....	27
<i>Tabla 7: Frecuencia mínima de muestreo y análisis de cada parámetro [17]</i> .....	28
<i>Tabla 8: Diferentes tecnologías para desalar agua del mar</i> .....	30
<i>Tabla 9: Comparativa entre las distintas tecnologías desalación</i> .....	31
<i>Tabla 10: Dotación de agua sanitaria para diferentes tipos de embarcaciones [22]</i> .....	38
<i>Tabla 11: Valores para el cálculo del caudal de consumo de agua potable [23]</i> .....	40
<i>Tabla 12: Cálculos del caudal de consumo de agua potable en el crucero</i> .....	40
<i>Tabla 13: Cantidad de bombas necesarias [25]</i> .....	42
<i>Tabla 14: Número de arranques máximos por bomba [26]</i> .....	42
<i>Tabla 15: Volumen calentador de agua [27]</i> .....	43
<i>Tabla 16: Resumen de datos calculados</i> .....	43
<i>Tabla 17: Depósito acumulador grupo de presión [43]</i> .....	45
<i>Tabla 18: Bombas del grupo de presión [43]</i> .....	45
<i>Tabla 19: Principales contaminantes del agua residual y su efecto [5]</i> .....	46
<i>Tabla 20: Procesos en los distintos tipos tratamiento del agua residual [29]</i> .....	47
<i>Tabla 21: Porcentaje de eliminación de contaminantes según el tipo de tratamiento [30]</i> .....	47
<i>Tabla 22: Comparativa del coste de los distintos procesos de depuración del agua residual [29]</i> .....	48
<i>Tabla 23: Normativa actual de vertido y previsión con la instalación propuesta</i> .....	57
<i>Tabla 24: Parámetros típicos de un biorreactor MBR [33]</i> .....	57
<i>Tabla 25: Parámetros de funcionamiento membrana Alfa Laval [33]</i> .....	63
<i>Tabla 26: Parametros calculo motor principal [37]</i> .....	65
<i>Tabla 27: Parametros calculo motor auxiliar [38]</i> .....	66
<i>Tabla 28: Resumen datos del fabricante de las calderas de recuperación de gases de los motores [39]</i> ..	67
<i>Tabla 29: Características de las separadoras Alfa Laval [40]</i> .....	69
<i>Tabla 30: Resumen de los consumos de agua regenerada</i> .....	70

## Índice de figuras

<i>Figura 1: Evolución números pasajeros a nivel mundial en el sector de los cruceros [4]</i> .....	12
<i>Figuras 2: Principales áreas de cruceros en el mundo [5]</i> .....	13
<i>Figuras 3: Esquema básico del sistema producción agua a bordo</i> .....	32
<i>Figuras 4: Generador de agua dulce [19]</i> .....	33
<i>Figuras 5: Esquema del grupo hidróforo [20]</i> .....	34
<i>Figuras 6: Esquema básico potabilización</i> .....	35
<i>Figuras 7: Calentador compacto de agua sanitaria [21]</i> .....	36
<i>Figuras 8: Diagrama de instalación de generación de agua</i> .....	37
<i>Figuras 9: Gráfica para cálculos de caudales punta de agua potable [24]</i> .....	41
<i>Figura 10: Modelo desalinizador [42]</i> .....	44
<i>Figura 11: Dimensiones desalinizador [42]</i> .....	44
<i>Figura 12: Esquema básico propuesto para la depuradora del agua residual</i> .....	49
<i>Figuras 13: Esquema del equipo compacto de pretratamiento [31]</i> .....	50
<i>Figuras 14: Esquema de la instalación MBR</i> .....	52
<i>Figuras 15: Eliminación de compuestos en función del tipo de membrana [32]</i> .....	53
<i>Figuras 16: Bastidor de placas planas [34]</i> .....	54
<i>Figuras 17: Diferentes tipos de ensuciamiento de las membranas [33]</i> .....	54
<i>Figuras 18: Equipo de radiación UV para la desinfección del agua residual [35]</i> .....	55
<i>Figuras 19: Plano dimensiones MBR</i> .....	59
<i>Figura: 20: Diagrama de flujo e instrumentación del biorreactor MBR</i> .....	60
<i>Figuras 21: Esquema de una separadora con descarga de fango automática [40]</i> .....	68

## Índice de acrónimos

CCBS, MED, UF,OI, MBR, DQO,DBO, PAO,EDAR, THR,  $C_v$ ,  $C_M$ , EF, $X_{LM}$ , UV.

## 1. Introducción

El presente trabajo pretende proponer una instalación compacta para realizar la gestión integral del agua en un crucero. Esto incluye, desde la generación de agua a partir del agua de mar, hasta la completa depuración del agua residual generada, para finalmente darle un uso posterior. El trabajo está estructurado de la siguiente manera:

En la primera parte se detallan los objetivos del trabajo y se lleva a cabo una revisión bibliográfica donde se recoge un inventario de cruceros similares al que se tendrá como base para el proyecto. Igualmente, se recoge la normativa aplicable a las distintas tipologías de agua que se gestionan en un crucero.

En la segunda parte, se estudian los distintos equipos utilizados en el proceso de generación, depuración y reutilización de agua y se propone una nueva instalación compacta, estudiando su dimensionamiento y ventajas frente a las actuales.

Finalmente se enumeran distintas conclusiones obtenidas del presente trabajo fin de Máster.

## 2. Objetivos

Este trabajo tiene como objetivo principal proponer una instalación compacta para la gestión integral del agua de un buque tipo crucero con capacidad para 250 pasajeros y otros 150 perteneciente a la tripulación. Entre dichas gestiones que se deben realizar, se tienen las siguientes:

- La generación de agua necesaria, para dotar de agua sanitaria a la tripulación y al pasaje, y para mantener operativos los diferentes servicios que dispone el buque.
- El tratamiento adecuado de las aguas residuales, para el cumplimiento de la normativa actual [1], debido a que estos buques son muy exclusivos y muy a menudo recorren zonas sensibles en las cuales la normativa de vertido es más estricta.
- La reutilización del agua tratada en la depuradora para su uso posterior dentro del buque, con el objeto de valorizar este recurso y minimizar la generación del agua.

Para llevar a cabo las anteriores gestiones del agua de un crucero **se propondrán las instalaciones adecuadas para el buque** mediante las cuales se cumplirá la normativa y reglamentación actual respecto a la generación de agua dulce, a la depuración, al vertido de agua residual y a los usos de las aguas regeneradas. **Se adoptará una tecnología moderna y polivalente** para cumplir holgadamente con estos requisitos, y que además garantice una explotación y mantenimiento suficiente y adecuado.

### 3. Estado del Arte

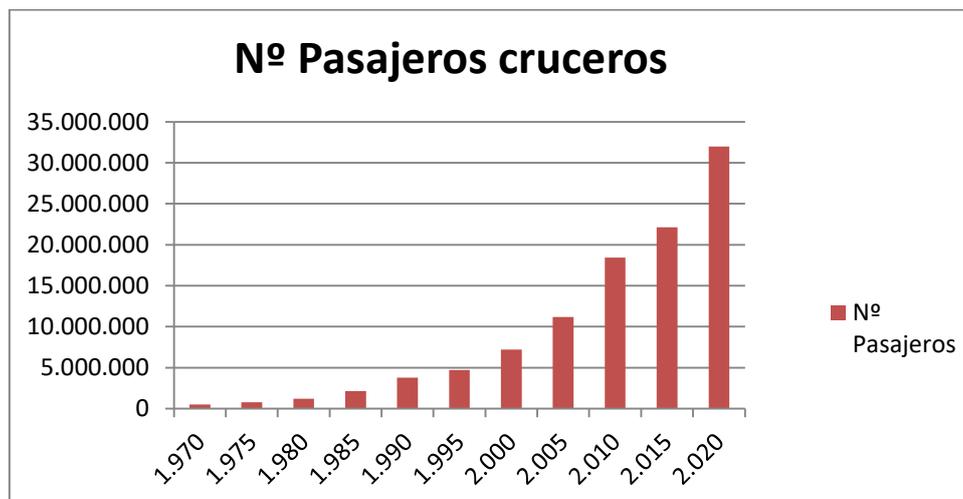
En este apartado se realiza una revisión bibliográfica de la problemática de la gestión del agua en los buques tipo crucero y además, se especifica la normativa aplicable a los distintos tipos de agua que se encuentran en el crucero: agua sanitaria, residual y reutilizada.

#### 3.1 Los cruceros y su problemática en la gestión del agua

El hombre desde siempre ha sentido una gran atracción hacia el mar. Repasando la historia, los egipcios por el año 2.000 a.C. ya navegaba por las aguas del Nilo para realizar viajes a otras ciudades. También los romanos realizaban viajes de placer por el Mediterráneo con destino a islas como Capri o Istria.

Pero el primer crucero que se puede considerar como tal, fue en el año 1844 cuando English Shipping Company P.& O. de Londres, realizó un viaje turístico por el Mar Mediterráneo con un barco de madera llamado Lady Mary Wood que era impulsado por vapor [3]. En un principio, los viajes de este tipo solo estaban al alcance de la clase alta, por lo que había poca oferta. Además, a raíz de la segunda guerra mundial y con el avance que sufrió el sector de la aviación, la industria de los cruceros se estancó en su avance.

Fue a partir de la década de los 70 cuando una serie de navieras como, “Carnival o Royal Caribbean”, ante el incremento del precio del combustible se vieron en la necesidad de dar un giro al sector, aumentando el tamaño de los barcos y orientando el mercado hacia unos clientes de clase media. Se industrializó el sector y, a partir de esta fecha y como se puede observar en la gráfica inferior (figura 1), el crecimiento ha sido exponencial.



**Figura 1:** Evolución números pasajeros a nivel mundial en el sector de los cruceros [4]

Debido de esta evolución exponencial del mercado de cruceros, los barcos han ido aumentando su tamaño y se calcula que en ellos pueden viajar hasta 5.000 personas, es decir, se han convertido en auténticas ciudades flotantes. Además, las pocas y pequeñas ciudades receptoras de estos cruceros, sufren las consecuencias: la contaminación y la masificación de sus áreas.

Por supuesto, este incremento también se ha notado a nivel del impacto medioambiental llegando a saturar el ecosistema. Los mayores problemas que causan los cruceros son las emisiones contaminantes que se emanan tanto a la atmosfera como al agua.



**Figuras 2:** Principales áreas de cruceros en el mundo [5]

A continuación se detallan una serie de datos de cruceros semejantes al del proyecto con el fin de obtener unos valores iniciales respecto a los pasajeros que viajan en un crucero para desarrollar el trabajo.

**Tabla 1** Cruceros similares a los del proyecto [2]

Nombre	Pas	Trip	Lpp (m)	B (m)	GT (T)	Main engine	Pot (Kw)	Prop	Speed (n)
Silver Whisper	388	295	182	25	28.250	2 Wartsila 8R46	15.700	Hélices paso var.	20,5
Seven Seas Voyager	700	445	204	28	49.000	4 Wartsila 6R38	23.040	Hélices paso var.	20
Seabourn Odyssey	450	330	198	26	32.400	4 Wartsila 12V32	23.040	Hélices paso var.	21
Seven Seas Mariner	730	445	216	29	48.000	4 Wartsila 12V38B	16.600	Azimuth	20
Hanseatic Nature	260	170	139	22	15.600	4 Carterpillar MAK 8M25E	14.400	Hélices paso var.	18
Le Bougainville	184	110	131	18	10.000	4 Wartsila 8L20	8.000	Hélices paso var.	15
Scenic Eclipse	228	200	166	21	17.500	4 ABC 16DZC	12.000	Hélices paso var.	18,5
Celebrity Flora	100	75	101	17	6.000	4 Carterpillar C32	5.600	Hélices paso var.	25
Pacific Princess	702	373	181	25	30.300	4 Wartsila RV32	13.500	Hélices paso var.	21
Azamara Pursit	770	380	181	20	30.000	4 Wartsila RV32	13.500	Hélices paso var.	21,5
Silver wind	315	212	155	21	17.200	2 Wartsila 6R46	11.700	Hélices paso var.	20,5

### 3.2 Agua Sanitaria

Como bien es sabido, el agua es esencial para la vida, por ello, todas las personas deben tener un sistema de abastecimiento de agua potable el cual tiene que cumplir con las siguientes premisas: accesibilidad, seguridad y cuantía suficiente. Hay que lograr que el agua de consumo humana sea tan segura como sea posible.

Los problemas derivados de una inadecuada gestión del agua pueden repercutir directamente en la salud de la tripulación, cuestión que hay que evitar a toda costa. Estos problemas pueden tener distintos orígenes [6].

- **Microbiológico**, que viene producido por la ingesta de agua contaminada que a menudo proceden de heces humanas y de animales, las cuales son fuente de agentes patógenos, como bacterias, virus o protozoos. Esta contaminación puede generar brotes de enfermedades intestinales y otros tipos de infecciones, que, al ser transmitidas por el agua potable, tienen la capacidad de infectar a un gran número de personas a la vez. Además de la transmisión de estas enfermedades, al consumir directamente el agua, también puede haber por otras vías de infección como el consumo de alimentos, aerosoles... Para la eliminación de estos microorganismos se utilizan diferentes métodos de desinfección.
- **Químico**, se debe principalmente a la capacidad de los componentes químicos para producir efectos adversos en la salud cuando la exposición es prolongada. Existe una serie de parámetros químicos para el control.
- **Radiológico**, este tipo de riesgo que está asociado a la presencia de radionúclidos de origen natural aunque en la mayoría de las ocasiones la presencia de estos es inexistente.
- **Aceptabilidad**, el agua no debe presentar problemas de sabor, olor y apariencia que puedan ser desagradables para los consumidores, ya que, evalúan la calidad del agua basándose en sus sentidos. Los cambios de sabor, olor y apariencia pueden indicar alteraciones en la calidad agua.

### 3.2.1 Normativa

Los primeros pasos en cuanto a la normativa referente al agua potable comenzaron en 1951 con el Reglamento Sanitario Internacional (RSI) [7]. En un principio, se destinó a vigilar y controlar seis enfermedades infecciosas graves: cólera, peste, fiebre amarilla, viruela, fiebre recurrente y tifus. Posteriormente, debido a los cambios del tráfico marítimo internacional y situaciones en la transmisión internacional de enfermedades, el 23 de mayo de 2005 la Asamblea Mundial de la salud, mediante la resolución WHA58.3 aprobó nuevas modificaciones en el RSI.

Inicialmente, simplemente se realizaba una inspección de desratización y se recibía un certificado, pero con el paso de los años este certificado fue sustituido por los certificados de control de sanidad a bordo (CCSB), que se ocupan de más aspectos y cuya finalidad es prevenir y controlar los riesgos para la salud pública a bordo de los buques en viajes internacionales.

Los CCSB tienen una vigencia máxima de seis meses, sin embargo, en caso de que un buque constituya un grave riesgo para la propagación de una enfermedad, se realizarán en el siguiente puerto de entrada las acciones necesarias para normalizar la situación, y se expedirá un nuevo certificado. Además, se le puede conceder una prórroga de treinta días para que el barco pueda llegar a un puerto donde se pueda realizar la inspección y adoptar las medidas de control necesarias.

Una vez identificados los riesgos para la salud pública, la autoridad competente debe determinar las medidas de control adecuadas y revisar la validez de los controles existentes. Estas medidas de control tienen que ser objetivas y viables tanto desde el punto de vista técnico como del económico.

La autoridad competente reside en los puertos autorizados por los Estados Parte. La revisión para corroborar que el buque opera de acuerdo con la normativa requerida es realizada por los inspectores, que son personal del puerto especializado y bien entrenado para subir a bordo de un buque y poder identificar cualquier riesgo significativo para la salud pública, que pueden exigir, en caso necesario, la aplicación de medidas correctoras y de control necesarias.

Un inspector antes de realizar la inspección del buque realiza una planificación de la visita, de la cual, informará al capitán una vez realizada la inspección. Si este observa alguna anomalía, la revisará junto con el capitán por si se pudiera subsanar en el momento, y posteriormente preparará un informe por escrito detallando los problemas encontrados e incluyendo el tiempo previsto para la resolución de los mismos. En caso positivo se expedirá el CCSB.

Este Reglamento debe utilizarse junto con el que es considerado la piedra angular sobre la que se basan todas las normativas nacionales o locales, que es la Guía para la calidad del agua editada por la OMS [1]. La finalidad de estas Guías es el apoyo al desarrollo y ejecución de estrategias para la gestión de los riesgos y, además, la garantía de la seguridad del sistema del agua potable mediante el control de ciertos componentes en el agua. En ellas se detallan los requisitos mínimos razonables que deben cumplir las prácticas seguras para proteger la salud de los consumidores, indicando unos valores de referencia de componentes del agua y unos indicadores de calidad del agua.

A nivel internacional no hay una normativa al respecto, puesto que, se considera más eficiente y adecuado que la normativa sea realizada a nivel nacional o regional, debido a la diversidad de las características y los riesgos entre zonas a otras. Por lo tanto, estas guías proporcionan una buena base científica para que las autoridades desarrollen normas y reglamentos sobre al agua de consumo humano adecuadas para la situación de cada país. Es decir, tienen la finalidad de generar normas y reglamentos nacionales para que se puedan aplicar y hacer cumplir fácilmente y que protejan la salud pública.

La casuística de los barcos es especial y difiere de las redes de abastecimiento locales debido a varios factores, como son: La variabilidad de la calidad del agua bruta, la complejidad de los sistemas de almacenamiento y distribución de los buques, la temperatura del agua, a mayor

temperatura mayor riesgo de contaminación microbiológica y el tiempo de almacenamiento o estancamiento. Por todo esto, y debido a la globalización del transporte marítimo, se aplicará la normativa más restrictiva entre la guía o la normativa local.

El convenio de la OIT 133 [8], también hace referencia a las normas mínimas para el alojamiento de la tripulación a bordo de buques comerciales de más de 1000Tn. Concretamente dice que todas las personas a bordo deben tener acceso permanente al agua potable fría y caliente.

Además de éstas, existe normativa internacional referida a describir aspectos técnicos de diseño y construcción de sistemas de agua potable, como por ejemplo:

- ISO 5620-1:1992 e ISO 5620-2:1992 Construcción naval y estructuras marinas. Acoplamientos para conexión de depósitos de agua potable. Ginebra ISO.
- ISO 15748-1:2002 Embarcaciones y tecnología marina. Suministro agua potable en buque. Planificación y diseño
- ISO 15748-2:2002 Embarcaciones y tecnología marina. Suministro de agua potable en buque. Método de cálculo
- ISO/IEC 17025:2005 Requisitos para competencia de laboratorios de ensayo y calibración.
- ISO 19458:2006 Calidad agua. Muestreo para análisis microbiológicos.

La documentación necesaria que debe disponer un buque es [9]:

- Planos de construcción del sistema de agua potable.
- Informe analíticos del agua potable
- El diario medico de abordaje o libro de registro de casos de infecciones gastrointestinales, o ambos.
- Plan de seguridad del agua.
- Instrucciones de mantenimiento de los dispositivos, así como de los informes pertinentes.

En lo referente al procedimiento de muestreo, será necesario tomar muestras de agua siempre que lo pida la autoridad competente o cuando existan pruebas de problemas técnicos o de operación.

Las muestras tienen que ser tomadas por personal cualificado y sin influencia en los resultados finales del examen. Estas deben tomarse en recipientes especiales de muestreo y siguiendo los procedimientos definidos en la norma ISO 19548. Como ejemplo, un plan de muestreo microbiológico adecuado puede ser el siguiente [9].

- Muestra A: esta muestra se toma del tanque de agua potable y representa a la calidad del agua al inicio del sistema de agua potable.
- Muestra B: Esta muestra debe tomarse del grifo más apartado del tanque de agua potable y representa la influencia del sistema de distribución.

- Muestra C: Esta muestra solamente se tomará si hay indicios de estancamiento o de otras formas de contaminación en áreas médicas, y representa la calidad de agua para el consumidor porque los grifos para la toma de muestra no se desinfectan antes del muestreo.
- Muestra D: Se toma cada vez que la temperatura del agua fría sea superior a 25°C o la temperatura del agua caliente se inferior a 50°C, además de los parámetros rutinarios se llevará a cabo un análisis adicional de legionela.

La guía de la OMS para la calidad del agua potable define y cuantifica los requisitos mínimos de calidad del potable. Algunos de los más comunes y que se pueden utilizar como parámetros útiles in situ para comprobar la calidad del agua.

**Tabla 2:** Estándares de la calidad del agua potable [1]

	Estándares de la OMS	Estándares europeos
	1993	1998
<b>Turbidez</b>	No hay directriz <sup>(1)</sup>	No se menciona
<b>pH</b>	No hay directriz <sup>(2)</sup>	No se menciona
<b>Conductividad</b>	250 microS/cm	250 microS/cm
<b>Color</b>	No hay directriz <sup>(3)</sup>	No se menciona
<b>Oxígeno disuelto</b>	No hay directriz <sup>(4)</sup>	No se menciona
<b>Dureza</b>	No hay directriz <sup>(5)</sup>	No se menciona
<b>cationes</b>	Estándares de la OMS	Estándares europeos
<b>(iones positivos)</b>		
<b>Boro (B)</b>	0,3 mg/l	0,001 mg/l
<b>Bromato (Br)</b>	No se menciona	0,01 mg/l
<b>Cadmio (Cd)</b>	0,003 mg/l	0,005 mg/l
<b>Cromo (Cr)</b>	0,05 mg/l	0,05 mg/l
<b>Cobre (Cu)</b>	2 mg/l	2,0 mg/l
<b>Hierro (Fe)</b>	No hay directriz <sup>(6)</sup>	0,2 mg/l
<b>Plomo (Pb)</b>	0,01 mg/l	0,01 mg/l
<b>Níquel (Ni)</b>	0,02 mg/l	0,02 mg/l
<b>Zinc (Zn)</b>	3 mg/l	No se menciona

<b>aniones</b>	Estándares de la OMS	Estándares europeos
<b>(iones negativos)</b>		
<b>Cloruro (Cl)</b>	250 mg/l	250 mg/l
<b>Fluor (F)</b>	1,5 mg/l	1,5 mg/l

	Estándares de la OMS	Estándares europeos
<b>microbiológicos</b>		
<i>Escherichia coli</i>	No se menciona	0 en 250 ml
Enterococci	No se menciona	0 en 250 ml
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	No se menciona	0 en 250 ml
<i>Clostridium perfringens</i>	No se menciona	0 en 100 ml
Bacterias coliformes	No se menciona	0 en 100 ml
Conteo de colonias a 22°C	No se menciona	100/ml
Conteo de colonias a 37°C	No se menciona	20/ml

(1) Deseable: Menos de 5 UNT

(2) Deseable: 6,5-8,5

(3) Deseable: 15 mg/l Pt-Co

(4) Deseable: Menos del 75% de la concentración de saturación

(5) Deseable: 150-500 mg/l

(6) Deseable: 0,3 mg/l

### 3.3 Agua residual

Desde la antigüedad se ha creído, o se ha querido creer, que debido a la superficie y profundidad de los océanos éstos podrían ser utilizados sin limitaciones como vertederos de basuras y sustancias en cantidades ilimitadas, y que estas acciones no tendrían repercusión en el medio ambiente.

En los buques se pueden acumular grandes cantidades de aguas residuales en función del número de personas a bordo, el tipo de buque y la duración del viaje. Esta agua residual se clasifica en, aguas grises provenientes de lavabos y duchas, y de aguas negras provenientes de los inodoros. Según la definición de la OMI, recogida en el convenio MARPOL [10] las aguas residuales se definen como las aguas provenientes de:

- Desagües y demás desperdicios de cualquier tipo de inodoros, urinarios y sistemas de descarga de la cisterna del inodoro.
- Desagües de los locales sanitarios a través de los lavabos, tinas de lavado e imbornales situados en esas dependencias.
- Desagües de los espacios que contengan animales vivos
- Otras aguas residuales como son las aguas grises.

Las aguas residuales son un tipo de desecho que, además de contaminantes a nivel del ecosistema, puede tener consecuencias sobre la salud humana; puesto que las aguas negras pueden albergar una gran cantidad de sustancias nocivas, como (agentes químicos, farmacológicos y biológicos), e infinidad de bacterias, virus, gusanos, hongos...

Los principales riesgos son la propagación de enfermedades infecciosas transmitidas por las aguas residuales sin tratar o deficientemente tratadas. Por la contaminación cruzada del agua potable, los accidentes (como fugas o derrames) o las infecciones contraídas durante las labores de mantenimiento.

#### 3.3.1 Normativa

Por la necesidad de proteger al ser humano y al medio marino, la conferencia internacional sobre contaminación del mar convocada por la Organización Marítima Internacional (OMI) celebrada en 1973, adoptó el convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques. Este convenio se modificó y se aprobó posteriormente mediante el Protocolo de 1978, conocido también como el MARPOL 73/78 [10]. Este contiene 5 anexos y en 1997 se añadió un sexto anexo.

En este convenio se compone de una serie de reglas encaminadas a prevenir y reducir al mínimo la contaminación ocasionada por los buques, consta de seis anexos [10]:

- Anexo 1, Reglas para prevenir la contaminación por hidrocarburos (en vigor 1983), en 1992 se enmendó y se hizo obligatorio el doble casco para los petroleros nuevos.
- Anexo 2, Reglas para prevenir la contaminación por sustancias nocivas líquidas transportadas a granel (en vigor 1983).
- Anexo 3, Reglas para prevenir la contaminación por sustancias perjudiciales transportada por mar en bultos (en vigor 1992).
- Anexo 4, Reglas para prevenir la contaminación por la aguas sucias de los buques (en vigor 2003).
- Anexo 5, Reglas para prevenir la contaminación ocasionada por las basuras de los buques (en vigor 1988).
- Anexo 6, Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques (en vigor 2005).

En esta ocasión nos centraremos en el anexo 4, referente al agua residual. Este convenio, se ha modificado o adaptado a las necesidades actuales mediante resoluciones que han sido acometidas por el Comité de protección del medio ambiente (MEPC), el cual, es un órgano dependiente del consejo y al cual se le otorga la facultad de aprobación y modificación de los convenios, normas y otras medidas para asegurar su cumplimiento. Las revisiones, por supuesto, posteriormente tienen que ser ratificadas por los Estados parte.

Las revisiones más importantes del MEPC han sido [11]:

- Resolución MEPC.2 (VI) (1976), recomendación sobre las normas de efluentes internacional y una guía para las pruebas de rendimiento de las instalaciones de tratamiento de aguas de los buques.
- Resolución MEPC.159 (55) (2006), directrices revisadas para la aplicación de normas de efluentes y pruebas de funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales, se revisan valores máximos de parámetros contaminantes y rendimientos.
- Resolución MEPC (64) (2012), directrices para la implantación de las normas de efluentes y pruebas de funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales, en la cual se considera como área especial al mar Báltico, y prohíbe el vertido de aguas residuales al mar en zonas especiales a los buques de pasaje, si no disponen de una planta de tratamiento de aguas. Además se añade algún parámetro contaminante.

A parte del Marpol, también existen convenios regionales o nacionales, que son un conjunto de acuerdos llevados a cabo por diferentes estados para un área de influencia próxima a sus costas, estas normas buscan la protección de una región en particular, debido a la singularidad de esta. Dentro de esta destacan las de las regiones polares, USA, Canadá.

**Tabla 3:** Evolución resoluciones Marpol, anexo (IV) [11]

	<b>MEPC 2 (6) 1976</b>	<b>MEPC 159 (55) 2006</b>	<b>MEPC 227 (64) 2012</b>
<b>Sin Tratamiento</b>	> 12 millas	> 12 millas	
<b>Desmenuzadas y desinfectadas</b>	> 4 millas	> 4 millas	
<b>Ecoli (x/100ml)</b>	250	100	100
<b>SST (mg/l)</b>	100	35	35
<b>DBO5 (mg/l)</b>	50	25	25
<b>DQO (mg/l)</b>		125	125
<b>pH</b>		6-8,5	6-8,5
<b>Cl (mg/l)</b>		0,5	0,5
<b>NT (mg/l) o Rendimiento (%)</b>			20 o 70%
<b>PT (mg/l) o Rendimiento (%)</b>			1 o 80%

El ámbito de aplicación a la normativa, se aplicará a buques con arqueo superior a 200Tn. Para cumplir con la normativa los buques deben de disponer:

- Planos técnicos del sistema de aguas residuales.
- Certificado internacional de la OMI de prevención de la contaminación por aguas residuales (ISPP).
- Manual de Gestión de la Seguridad Internacional (ISM manual)
- Plan de manejo de aguas residuales
- Instrucciones de mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Todos los buques que estén obligados a cumplir el anexo IV y que realice viajes a puertos o terminales sometidos a jurisdicción de otras Partes del Convenio, serán objeto de visitas. Una visita inicial, antes de que el buque entre en servicio, que si es satisfactoria se le expedirá un Certificado internacional de prevención de la contaminación por aguas sucias (1973). La visitas que se realicen posteriormente serán cuando la administración lo crea oportuno o en un plazo máximo de 5 años.

### 3.4 Agua reutilizada

La reutilización del agua es una práctica que viene desarrollándose desde hace más de 2.000 años. Actualmente, son cada vez más los países que consideran la reutilización de las aguas residuales como fundamental en sus políticas hídricas y medioambientales. Por ejemplo, en Florida es requisito obligatorio la regeneración y reutilización de aguas residuales para el otorgamiento de concesiones de sistemas de depuración de aguas residuales [12].

Tiempo atrás, el hombre se limitaba únicamente a usar el agua para subsistir. El desarrollo industrial, los hábitos higiénicos y los usos recreativos han generado que el consumo de agua aumente; a modo de ejemplo, desde 1950 se ha incrementado el consumo de agua en un 400%. Aunque el agua es la sustancia más abundante en la superficie de la tierra, solamente está disponible para el consumo humano un 1% del total y se encuentra en ríos, lagos o en aguas subterráneas.

Por lo tanto, la regeneración y la reutilización de las aguas residuales tiene beneficios entre los que se pueden destacar los siguientes:

- Aporta una nueva fuente de suministro de agua, que liberan al agua de mejor calidad.
- Disminuye los costes de tratamiento y de vertido de agua depurada.
- Reducción de la contaminación en el medio ambiente.
- Mayor garantía de suministro.

La mayor preocupación en la reutilización de aguas residuales es la posible transmisión y propagación de enfermedades, porque estas contienen infinidad de organismos patógenos.

**Tabla 4:** Enfermedades transmitidas por el agua residual [13]

Enfermedad	Agente
<b>Origen bacteriano</b>	
<b>Fiebres tifoideas y paratifoideas</b>	Salmonella typhy y paratyphy
<b>Disentería bacilar</b>	Shigella
<b>Cólera</b>	Vibrio cholerae
<b>Gastroenteritis aguda y diarreas</b>	Escherichiacoli, Campylobacter, salmonela, Sigella
<b>Origen viral</b>	
<b>Hepatitis A y E</b>	Virus hepatitis y E
<b>Poliomielitis</b>	Virus del polio
<b>Gastroenteritis aguda y diarreas</b>	Virus Norwalk, Rotavirus, enterovirus, Adenovirus
<b>Origen parasitario</b>	
<b>Disentería bacilar</b>	Cristosporium, Entamoeba histolytica
<b>Anquilostomosis, Trichuriasis</b>	Ancylostomo, Trichuris

### 3.4.1 Normativa

Desde hace varias décadas se intentan crear normas para permitir regular la reutilización de las aguas residuales. A nivel internacional existen dos tendencias.

Una de ellas es la aplicada en Estados Unidos. La primera referencia se da en el estado de California conocida como el “Titulo 22”, 1978 [14]. Es muy estricta en cuanto a los requerimientos de las aguas residuales para posteriormente poder ser utilizadas para riego. Con el paso del tiempo la Agencia Medioambiental Estadounidense (USEPA), ha realizado una serie de recomendaciones en los años 1980,1992, 2004 y 2012 Anexo (4) [15], que optan por el mejor tratamiento disponible y altas calidades del agua para así no tener que realizar recomendaciones sobre el uso y minimizar los riegos para la salud. En cada estado, o bien disponen de una reglamentación propia, o se acogen a estas recomendaciones.

**Tabla 5:** Criterios de calidad del y uso de las aguas reutilizadas en Estados Unidos [15]

Reuse Category and Description	Treatment	Reclaimed Water Quality <sup>2</sup>	Reclaimed Water Monitoring
<b>Urban Reuse</b>			
<p><b><u>Unrestricted</u></b> The use of reclaimed water in nonpotable applications in municipal settings where public access is not restricted.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Secondary<sup>(4)</sup></li> <li>▪ Filtration<sup>(5)</sup></li> <li>▪ Disinfection<sup>(6)</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ pH = 6.0-9.0</li> <li>▪ ≤ 10 mg/l BOD <sup>(7)</sup></li> <li>▪ ≤ 2 NTU <sup>(8)</sup></li> <li>▪ No detectable fecal coliform /100 ml <sup>(9,10)</sup></li> <li>▪ 1 mg/l Cl<sub>2</sub> residual (min.) <sup>(11)</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ pH – weekly</li> <li>▪ BOD - weekly</li> <li>▪ Turbidity - continuous</li> <li>▪ Fecal coliform - daily</li> <li>▪ Cl<sub>2</sub> residual – continuous</li> </ul>
<p><b><u>Restricted</u></b> The use of reclaimed water in nonpotable applications in municipal settings where public access is controlled or restricted by physical or institutional barriers, such as fencing, advisory signage, or temporal access restriction</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Secondary <sup>(4)</sup></li> <li>▪ Disinfection <sup>(6)</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ pH = 6.0-9.0</li> <li>▪ ≤ 30 mg/l BOD <sup>(7)</sup></li> <li>▪ ≤ 30 mg/l TSS</li> <li>▪ ≤ 200 fecal coliform /100 ml <sup>(9, 13, 14)</sup></li> <li>▪ 1 mg/l Cl<sub>2</sub> residual (min.) <sup>(11)</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ pH – weekly</li> <li>▪ BOD – weekly</li> <li>▪ TSS – daily</li> <li>▪ Fecal coliform - daily</li> <li>▪ Cl<sub>2</sub> residual – continuous</li> </ul>
<b>Agricultural Reuse</b>			
<p><b><u>Food Crops</u></b> <sup>15</sup> The use of reclaimed water for surface or spray irrigation of food crops which are intended for human consumption, consumed raw.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Secondary <sup>(4)</sup></li> <li>▪ Filtration <sup>(5)</sup></li> <li>▪ Disinfection <sup>(6)</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ pH = 6.0-9.0</li> <li>▪ ≤ 10 mg/l BOD <sup>(7)</sup></li> <li>▪ ≤ 2 NTU <sup>(8)</sup></li> <li>▪ No detectable fecal coliform/100 ml <sup>(9,10)</sup></li> <li>▪ 1 mg/l Cl<sub>2</sub> residual (min.) <sup>(11)</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ pH – weekly</li> <li>▪ BOD - weekly</li> <li>▪ Turbidity - continuous</li> <li>▪ Fecal coliform - daily</li> <li>▪ Cl<sub>2</sub> residual – continuous</li> </ul>
<p><b><u>Processed Food Crops</u></b> <sup>15</sup> The use of reclaimed water for surface irrigation of food crops which are intended for human consumption, commercially processed.</p> <p><b><u>Non-Food Crops</u></b> The use of reclaimed water for irrigation of crops which are not consumed by humans, including fodder, fiber, and seed crops, or to irrigate pasture land, commercial nurseries, and sod farms.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Secondary <sup>(4)</sup></li> <li>▪ Disinfection <sup>(6)</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ pH = 6.0-9.0</li> <li>▪ ≤ 30 mg/l BOD <sup>(7)</sup></li> <li>▪ ≤ 30 mg/l TSS</li> <li>▪ ≤ 200 fecal coli/100 ml <sup>(9,13, 14)</sup></li> <li>▪ 1 mg/l Cl<sub>2</sub> residual (min.) <sup>(11)</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ pH – weekly</li> <li>▪ BOD - weekly</li> <li>▪ TSS - daily</li> <li>▪ Fecal coliform - daily</li> <li>▪ Cl<sub>2</sub> residual – continuous</li> </ul>

Reuse Category and Description	Treatment	Reclaimed Water Quality <sup>2</sup>	Reclaimed Water Monitoring
<b>Impoundments</b>			
<p><b><u>Unrestricted</u></b> The use of reclaimed water in an impoundment in which no limitations are imposed on body-contact.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Secondary <sup>(4)</sup></li> <li>Filtration <sup>(5)</sup></li> <li>Disinfection <sup>(6)</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>pH = 6.0-9.0</li> <li>≤ 10 mg/l BOD <sup>(7)</sup></li> <li>≤ 2 NTU <sup>(8)</sup></li> <li>No detectable fecal coliform/100 ml <sup>(9,10)</sup></li> <li>1 mg/l Cl<sub>2</sub> residual (min.) <sup>(11)</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>pH – weekly</li> <li>BOD – weekly</li> <li>Turbidity – continuous</li> <li>Fecal coliform - daily</li> <li>Cl<sub>2</sub> residual – continuous</li> </ul>
<p><b><u>Restricted</u></b> The use of reclaimed water in an impoundment where body-contact is restricted.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Secondary <sup>(4)</sup></li> <li>Disinfection <sup>(6)</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>≤ 30 mg/l BOD <sup>(7)</sup></li> <li>≤ 30 mg/l TSS</li> <li>≤ 200 fecal coliform/100 ml <sup>(9,13,14)</sup></li> <li>1 mg/l Cl<sub>2</sub> residual (min.) <sup>(11)</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>pH – weekly</li> <li>TSS – daily</li> <li>Fecal coliform - daily</li> <li>Cl<sub>2</sub> residual – continuous</li> </ul>
<b>Environmental Reuse</b>			
<p><b><u>Environmental Reuse</u></b> The use of reclaimed water to create wetlands, enhance natural wetlands, or sustain stream flows.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Variable</li> <li>Secondary <sup>(4)</sup> and disinfection <sup>(6)</sup> (min.)</li> </ul>	Variable, but not to exceed: <ul style="list-style-type: none"> <li>≤ 30 mg/l BOD <sup>(7)</sup></li> <li>≤ 30 mg/l TSS</li> <li>≤ 200 fecal coliform/100 ml <sup>(9,13,14)</sup></li> <li>1 mg/l Cl<sub>2</sub> residual (min.) <sup>(11)</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>BOD – weekly</li> <li>SS – daily</li> <li>Fecal coliform - daily</li> <li>Cl<sub>2</sub> residual – continuous</li> </ul>
<b>Industrial Reuse</b>			
<p><b><u>Once-through Cooling</u></b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Secondary <sup>(4)</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>pH = 6.0-9.0</li> <li>≤ 30 mg/l BOD <sup>(7)</sup></li> <li>≤ 30 mg/l TSS</li> <li>≤ 200 fecal coliform/100 ml <sup>(9,13,14)</sup></li> <li>1 mg/l Cl<sub>2</sub> residual (min.) <sup>(11)</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>pH – weekly</li> <li>BOD – weekly</li> <li>TSS – weekly</li> <li>Fecal coliform - daily</li> <li>Cl<sub>2</sub> residual – continuous</li> </ul>
<p><b><u>Recirculating Cooling Towers</u></b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Secondary <sup>(4)</sup></li> <li>Disinfection <sup>(6)</sup> (chemical coagulation and filtration <sup>(5)</sup> may be needed)</li> </ul>	Variable, depends on recirculation ratio: <ul style="list-style-type: none"> <li>pH = 6.0-9.0</li> <li>≤ 30 mg/l BOD <sup>(7)</sup></li> <li>≤ 30 mg/l TSS</li> <li>≤ 200 fecal coliform/100 ml <sup>(9,13,14)</sup></li> <li>1 mg/l Cl<sub>2</sub> residual (min.) <sup>(11)</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>pH – weekly</li> <li>BOD – weekly</li> <li>TSS – weekly</li> <li>Fecal coliform - daily</li> <li>Cl<sub>2</sub> residual – continuous</li> </ul>
<b>Groundwater Recharge – Nonpotable Reuse</b>			
<p>The use of reclaimed water to recharge aquifers which are not used as a potable drinking water source.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Site specific and use dependent</li> <li>Primary (min.) for spreading</li> <li>Secondary <sup>(4)</sup> (min.) for injection</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Site specific and use dependent</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Depends on treatment and use</li> </ul>

Reuse Category and Description	Treatment	Reclaimed Water Quality <sup>2</sup>	Reclaimed Water Monitoring
<b>Indirect Potable Reuse</b>			
<u>Groundwater Recharge by Spreading into Potable Aquifers</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Secondary <sup>(4)</sup></li> <li>▪ Filtration <sup>(5)</sup></li> <li>▪ Disinfection <sup>(6)</sup></li> <li>▪ Soil aquifer treatment</li> </ul>	Includes, but not limited to, the following: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ No detectable total coliform/100 ml <sup>(9, 10)</sup></li> <li>▪ 1 mg/l Cl<sub>2</sub> residual (min.) <sup>(11)</sup></li> <li>▪ pH = 6.5 – 8.5</li> <li>▪ ≤ 2 NTU <sup>(8)</sup></li> <li>▪ ≤ 2 mg/l TOC of wastewater origin</li> <li>▪ Meet drinking water standards after percolation through vadose zone</li> </ul>	Includes, but not limited to, the following: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ pH – daily</li> <li>▪ Total coliform – daily</li> <li>▪ Cl<sub>2</sub> residual – continuous</li> <li>▪ Drinking water standards – quarterly</li> <li>▪ Other <sup>(17)</sup> – depends on constituent</li> <li>▪ TOC – weekly</li> <li>▪ Turbidity – continuous</li> <li>▪ Monitoring is not required for viruses and parasites: their removal rates are prescribed by treatment requirements</li> </ul>
<u>Groundwater Recharge by Injection into Potable Aquifers</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Secondary <sup>(4)</sup></li> <li>▪ Filtration <sup>(5)</sup></li> <li>▪ Disinfection <sup>(6)</sup></li> <li>▪ Advanced wastewater treatment <sup>(16)</sup></li> </ul>	Includes, but not limited to, the following: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ No detectable total coliform/100 ml <sup>(9, 10)</sup></li> <li>▪ 1 mg/l Cl<sub>2</sub> residual (min.) <sup>(11)</sup></li> <li>▪ pH = 6.5 – 8.5</li> <li>▪ ≤ 2 NTU <sup>(8)</sup></li> <li>▪ ≤ 2 mg/l TOC of wastewater origin</li> <li>▪ Meet drinking water standards</li> </ul>	Includes, but not limited to, the following: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ pH – daily</li> <li>▪ Turbidity – continuous</li> <li>▪ Total coliform – daily</li> <li>▪ Cl<sub>2</sub> residual – continuous</li> <li>▪ TOC – weekly</li> <li>▪ Drinking water standards – quarterly</li> <li>▪ Other <sup>(17)</sup> – depends on constituent</li> <li>▪ Monitoring is not required for viruses and parasites: their removal rates are prescribed by treatment requirements</li> </ul>
<u>Augmentation of Surface Water Supply Reservoirs</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Secondary <sup>(4)</sup></li> <li>▪ Filtration <sup>(5)</sup></li> <li>▪ Disinfection <sup>(6)</sup></li> <li>▪ Advanced wastewater treatment <sup>(16)</sup></li> </ul>	Includes, but not limited to, the following: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ No detectable total coliform/100 ml <sup>(9, 10)</sup></li> <li>▪ 1 mg/l Cl<sub>2</sub> residual (min.) <sup>(11)</sup></li> <li>▪ pH = 6.5 – 8.5</li> <li>▪ ≤ 2 NTU <sup>(8)</sup></li> <li>▪ ≤ 2 mg/l TOC of wastewater origin</li> <li>▪ Meet drinking water standards</li> </ul>	Includes, but not limited to, the following: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ pH – daily</li> <li>▪ Turbidity – continuous</li> <li>▪ Total coliform – daily</li> <li>▪ Cl<sub>2</sub> residual – continuous</li> <li>▪ TOC – weekly</li> <li>▪ Drinking water standards – quarterly</li> <li>▪ Other <sup>(17)</sup> – depends on constituent</li> <li>▪ Monitoring is not required for viruses and parasites: their removal rates are prescribed by treatment requirements</li> </ul>

La segunda tendencia son unas guías de recomendaciones de la OMS, que son de referencia a nivel mundial y fueron publicadas en 1989. Posteriormente han sido revisadas y ampliadas hasta el año 2006 [16]. Estas normas combinan los tratamientos básicos de depuración y las buenas prácticas, para evitar problemas sanitarios. Fueron ideadas para países en vía de desarrollo.

En Europa, por su parte, todos los países del mediterráneo realizan algún tipo de reutilización del agua residual. Actualmente no existe reglamentación a nivel europeo, pero se está trabajando para disponer de alguna guía de recomendaciones o reglamentación. Algunos de estos países, como Francia, Portugal, Italia y Chipre, disponen de reglamentación a nivel nacional.

España también dispone de reglamentación, concretamente el RD1620/2007 [17], que tiene por objeto establecer el régimen jurídico para la reutilización de las aguas depuradas. En este se recogen las condiciones básicas para la reutilización del agua, tanto a nivel administrativo, como a nivel de los criterios de calidad de las aguas, a nivel de los usos a los que se destina y a nivel de la frecuencia de muestreos y parámetros a estudiar

**Tabla 6:** Criterios de la calidad de las aguas para la reutilización y sus usos [17]

		Nematodos intestinales	Escherichia coli	SST	Turbidez	Legionella spp
		huevos/10 L	UFC /100 mL	mg/L	UNT	UFC /1000 mL
CALIDAD 1.1: RESIDENCIAL2 a) Riego de jardines privados.b) Descarga de aparatos sanitarios.	Calidad 1.1	1	0	10	2	
CALIDAD 1.2: SERVICIOS CALIDAD 1.2: SERVICIOS a) Riego de zonas verdes urbanas (parques, campos deportivos y similares).9 b) Baldeo de calles.9 c) Sistemas contra incendios.9 d) Lavado industrial de vehículos.9	Calidad 1.2	1	200	20	10	100
CALIDAD 2.1 a) Riego de cultivos con sistema de aplicación del agua que permita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles para alimentación humana en fresco.	Calidad 2.1	1	100	20	10	1000
CALIDAD 2.2 a) Riego de productos para consumo humano con sistema de aplicación de agua que no evita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles, pero el consumo no es en fresco sino con un tratamiento industrial posterior. b) Riego de pastos para consumo de animales productores de leche o carne. c) Acuicultura.	Calidad 2.2	1	1000	35	---	
CALIDAD 2.3 a) Riego localizado de cultivos leñosos que impida el contacto del agua regenerada con los frutos consumidos en la alimentación humana. b) Riego de cultivos de flores ornamentales, viveros, invernaderos sin contacto directo del agua regenerada con las producciones. c) Riego de cultivos industriales no alimentarios, viveros, forrajes ensilados, cereales y semillas oleaginosas.	Calidad 2.3	1	10000	35	---	100
CALIDAD 3.1 a) Aguas de proceso y limpieza excepto en la industria alimentaria. b) Otros usos industriales.	Calidad 3.1.a	---	10000	35	15	100
c) Aguas de proceso y limpieza para uso en la industria alimentaria	Calidad 3.1.c	1	1000	35	---	100
CALIDAD 3.2 a) Torres de refrigeración y condensadores evaporativos.	Calidad 3.2	1	0	5	1	0
CALIDAD 4.1 a) Riego de campos de golf.	Calidad 4.1	1	200	20	10	100
CALIDAD 4.2 a) Estanques, masas de agua y caudales circulantes ornamentales, en los que está impedido el acceso del público al agua.	Calidad 4.2	--	10000	35	---	---

**Tabla 7:** Frecuencia mínima de muestreo y análisis de cada parámetro [17]

Uso	Calidad	Nematodos intestinales	Escherichia Coli	SS	Turbidez	NT y PT	Otros contaminantes	Otros criterios
1.- USO URBANO	1.1 y 1.2	Quincenal	2 veces semana	Semanal	2 veces sem	–	El Organismo de Cuenca determinara la frecuencia de los analisis en función del uso y del tipo de instalación	Mensual
2.- USO AGRARIO	2.1	Quincenal	Semanal	Semanal	Semanal	–		Mensual
	2.2	Quincenal	Semanal	Semanal	–	–		Quincenal
	2.3	Quincenal	Semanal	Semanal	–	–		–
3.- USO INDUSTRIAL	3.1	–	Semanal	Semanal	Semanal	–		Mensual
	3.2	Semanal	3 veces sem	Diaria	Diaria	–		3 veces sem
4.- USO RECREATIVO	4.1	Quincenal	2 veces semana	Semanal	2 veces sem	–		–
	4.2	–	Semanal	Semanal	–	Mensual		–
5.- USO AMBIENTAL	5.1	–	2 veces semana	Semanal	–	Semanal		–
	5.2	Semanal	3 veces semana	Diaria	Diaria	Semanal		Semanal
	5.3	–	–	Semanal	–	–		–
	5.4	–	–	–	–	–		Frecuencia igual al uso mas similar

## 4 Desarrollo del trabajo

### 4.1 Generación de agua en un crucero

Los cruceros, consumen unas grandes cantidades de agua y, por tanto, generalmente es inviable que dispongan de tanques de almacenamiento con capacidad suficiente para garantizar todos los servicios a los que debe abastecer durante los días que dura el pasaje. Además, la dimensión de estos afectaría a los volúmenes y pesos del barco, aumentándolos en exceso. Por esto queda sobradamente justificada la instalación de un sistema de generación de agua a bordo.

El abastecimiento del agua en los cruceros se destina para los siguientes usos: **agua dulce o técnica**, para diferentes equipos del buque y **agua sanitaria**, para el uso y consumo del pasaje y de la tripulación.

El agua técnica es la que se utiliza con fines industriales, entre los que se pueden destacar los siguientes:

- Motor principal y auxiliares
  - Circuito alta Tª ( cilindros, camisas y bloque)
  - Circuito baja Tª (Aire, inyectores y aceite lubricación)
- Calderas de generación y recuperación de calor
- Tanque agua para servicios de purificación de aceite y combustible
- Servicios de cubierta
- Sala de máquinas
- Separadores de sentinas, depuradora de agua, purificadores de aceite
- Limpieza ancla
- Dosificadoras de productos químicos
- Generación espuma contra incendio
- Cualquier otro servicio

El agua sanitaria es la utilizada para uso y consumo del pasaje y la tripulación, entre los usos podemos destacar:

- Duchas
- Lavabos
- Sanitarios
- Bañeras
- Cocinas
- Fuentes
- Tomas de agua en cubierta
- Cámara de máquinas sanitarios y limpieza

Para generar agua a bordo y poder satisfacer los diferentes usos, existen diferentes técnicas de desalación que separaran el agua de mar de las sales, basándose en diferentes procesos y se muestran en la tabla inferior (tabla 8):

**Tabla 8:** Diferentes tecnologías para desalar agua del mar

Proceso	Tecnología
<b>Evaporación</b>	Evaporación multiefecto de tubos horizontales (MED)
	Evaporación multiefecto de tubos verticales(VTE)
	Evaporación flash multietapa (MSF)
	Compresión mecánica de vapor (VC)
	Compresión térmica de vapor (VCT)
	Destilación solar
	Destilación tubos sumergidos
<b>Cristalización</b>	Congelación
	Formación de hidratos
<b>Filtración</b>	Osmosis inversa
	Microfiltración (MF), Ultrafiltración (UF) y Nanofiltración (NF)

Entre todos ellos, se detallan los más utilizados para generar agua en un buque [18]:

- **Destilación Flash Multietapa (MSF):** el principio de funcionamiento se basa en un proceso de evaporación-condensación bajo condiciones de vacío, usando el calor residual de alguna fuente de energía disponible en el buque que será utilizada para producir la evaporación que se produce de forma espontánea.
- **Destilación multiefecto (MED):** la base de funcionamiento es parecida a la anterior, salvo que el agua a evaporar entra en fase líquida al evaporador y rodea la fuente de calor. El calor aportado lo va calentando hasta hacerla pasar a fase gaseosa.
- **Osmosis inversa (OI):** el principio de funcionamiento es un fenómeno natural en el cual se toma el agua del mar y se le hace pasar a través de una membrana con un tamaño de poro adecuado la cual permite solamente el paso del agua y las sales son rechazadas.
- **Compresión vapor (VC):** proceso por el cual se obtiene agua destilada a partir de un compresor mecánico creando un vacío en el interior de la cámara, aspirando el vapor del interior y lo vuelve a comprimir para posteriormente condensarlo.

A modo de resumen de las distintas tecnologías de desalación de agua de mar, se detallan a continuación (tabla9) las ventajas y desventajas:

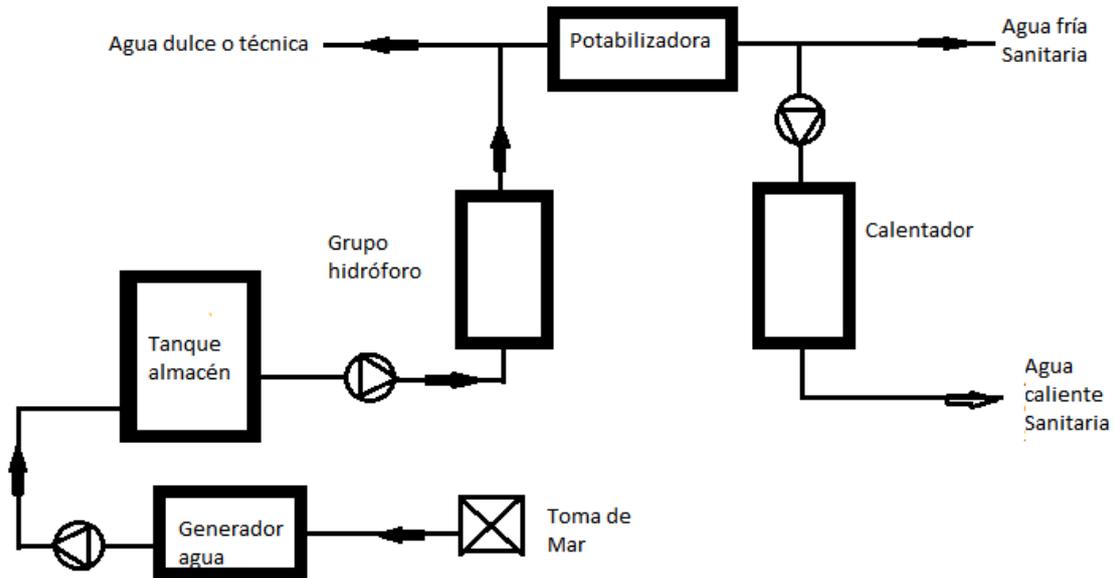
**Tabla 9:** Comparativa entre las distintas tecnologías desalación

	MSF	MED	CV	OI
<b>Energía</b>	Térmica	Térmica	Eléctrica	Eléctrica
<b>Consumo energético (KJ/Kg)</b>	Alto (>200)	Alto- Medio (150-200)	Medio (100-150)	Bajo (<100)
<b>Producción (m3/día)</b>	Alta (>50.000)	Media (<20.000)	Baja (>5.000)	Alta (>50.000)
<b>Calidad agua desalada (ppm)</b>	Alta (<50)	Alta (<50)	Alta (<50)	Media (300-500)
<b>Fiabilidad</b>	Alta	Media	Baja	Alta
<b>Incrustaciones</b>	Alta	Media	Media	Media
<b>Corrosión</b>	Alta	Media	Media	Media
<b>Operación</b>	Alta	Baja	Baja	Media
<b>Mantenimiento</b>	Alta	Baja	Baja	Media
<b>Ocupación</b>	Alta	Media	Baja	Baja
<b>Ampliación</b>	Difícil	Difícil	Difícil	Fácil
<b>Repuestos</b>	No	No	No	Membranas 5años
<b>Coste</b>	Alto	Medio	Alto	Medio

#### 4.1.1 Instalación propuesta

Con todo lo anterior, el esquema básico de la instalación compacta propuesta para la generación de agua en el buque se observa en la (figura 3). El funcionamiento es el siguiente:

- El generador toma el agua del mar para convertirla en agua dulce.
- El agua dulce generada se lleva a los tanques de almacenamiento.
- Las bombas de agua dulce toman de los tanques de almacenamiento y la introducen en el grupo hidróforo.
- Desde el grupo hidróforo se distribuye a los distintos servicios.
- El agua destinada para el consumo humano se hace pasar por la potabilizadora para que sea apta para el consumo.



Figuras 3: Esquema básico del sistema producción agua a bordo

Una vez enumerados los sistemas más representativos de generación de agua a bordo y después de analizar las ventajas y desventajas (tabla 9) se propone la instalación de un **generador de agua dulce tipo multifecto**. Ya que se trata de un sistema con un coste de operación y mantenimiento bajo, además, que pese a ser un sistema con un consumo energético medio este será mínimo puesto que el calentamiento se realiza a través del sistema de refrigeración de los motores. También, cabe destacar, que este sistema da una calidad de salida del agua considerada como excelente.

A continuación, se detallan los equipos que compondrían la instalación propuesta así como su funcionamiento. Es importante señalar que estos equipos están diseñados para un funcionamiento autónomo. En el centro de control, se dispondrán de todas las señales necesarias de la instalación para controlar su correcto funcionamiento, además de las alarmas que se generarán ante un funcionamiento anómalo.

#### 4.1.2 Equipos de generación de agua

##### 4.1.2.1 Generador de agua dulce

Este proceso (figura 4) tiene como base la destilación del agua de mar, primero se realiza una **evaporación** y posteriormente se **condensa el agua libre de sales**, en el **proceso de condensación** se recupera el calor para precalentar el agua de mar.

Para seguir calentando el agua se dispondrá del agua del circuito de alta  $T^{\circ}$  (1) de los motores principales y, en caso de no ser suficiente, se utilizará el vapor procedente de la caldera.



#### 4.1.2.2 Grupo hidróforo

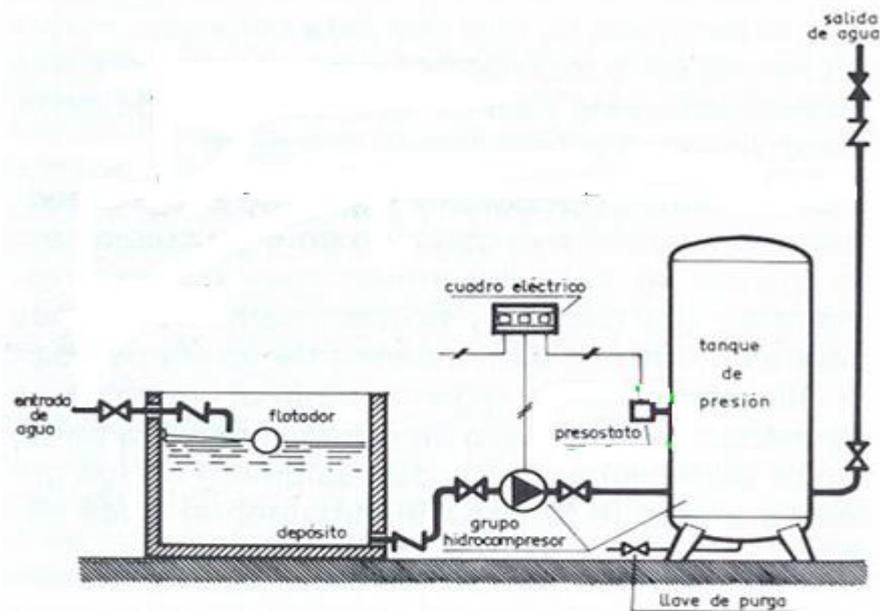
La función de este equipo también llamado grupo de presión es la de mantener todo el circuito con una presión adecuada. Evitando arranques excesivos de las bombas, y que el caudal sea constante y no pulsante. La instalación funciona en un intervalo de presiones predeterminadas, para poder suministrar la cantidad de agua requerida en distintas partes y alturas de la instalación.

El equipo está compuesto por:

- Bomba
- Depósito
- Presostato

El funcionamiento de este equipo consiste en aspirar mediante la bomba del depósito de almacenamiento, generalmente centrífugas, dotando al agua de la energía suficiente como para entrar en el depósito del grupo hidróforo. Este depósito está dividido interiormente por una membrana, que a uno de los lados contiene aire o algún gas inerte presurizado. Para controlar el funcionamiento del equipo se tiene el presostato, que se encarga de mantener la presión adecuada.

Cuando la presión disminuye, el presostato lo detecta y provoca el arranque de la bomba que introduce el agua al depósito. Así comprime la membrana del depósito y a la vez provoca la subida de presión que permite la llegada de agua a los puntos de consumo. Una vez que la presión adquiere un valor superior predeterminado actúa el presostato parando la bomba.



Figuras 5: Esquema del grupo hidróforo [20]

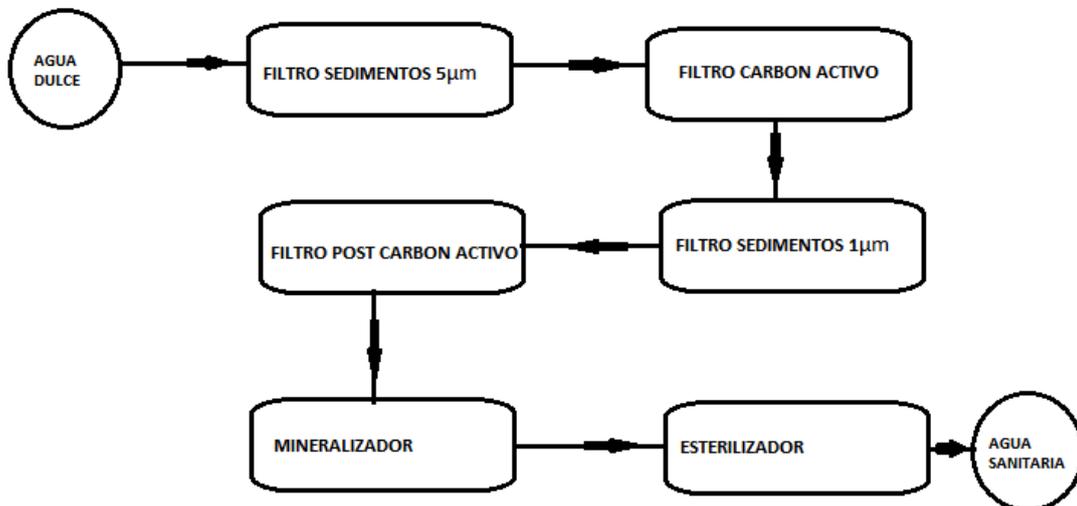
#### 4.1.2.3 Potabilizadora

Este equipo tiene como función transformar el agua dulce en agua sanitaria para el consumo humano. Para conseguir esta transformación, se deben realizar varias acciones: eliminar impurezas y turbidez, eliminar todos los patógenos existentes en el agua dulce, y dotar de sales el agua destilada que se generó en el destilador para ser apta para el consumo humano.

Para conseguir esto se necesita realizar al agua dulce una serie de procesos como son:

- Filtración de sedimentos ( $\varnothing > 5\mu\text{m}$ ): se eliminan sólidos, arenas, algas, lodo, polvo...
- Filtración por carbón activo: se eliminan contaminantes orgánicos, cloro, olor, pesticidas y químicos que puedan afectar al sabor.
- Mineralización: se añaden las sales necesarias para ser apta para uso y consumo humano principalmente sodio, potasio y calcio.
- Esterilización: se eliminan los agentes patógenos.

En el siguiente figura (Figura 6) se detalla el proceso de potabilización del agua dulce



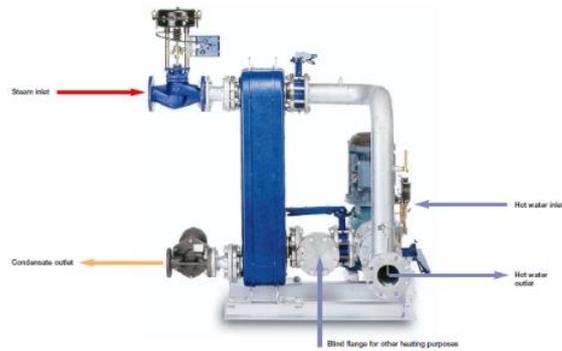
Figuras 6: Esquema básico potabilización

#### 4.1.2.4 Calentador de agua sanitaria

Para el agua caliente sanitaria se dispondrá de una instalación con un sistema de lazo cerrado, es decir, se dispondrá de una tubería que hará un circuito cerrado y del cual saldrán los picajes para llegar hasta los puntos de consumo. De este modo, al estar el agua caliente circulando

continuamente, hace que en el punto de uso se disponga de agua caliente instantáneamente, provocando el consiguiente ahorro de agua sanitaria.

Para lograr este propósito se dotará de un calentador que disponga de dos tipos de suministros de energía: uno a través de vapor de exceso procedente de las calderas y otro a través de resistencias eléctricas. El funcionamiento de este equipo se realizará mediante un sistema programado que, a través de la señal de un termostato, actuará preferentemente sobre la válvula de vapor, para calentar el agua y, en caso de no conseguir la temperatura requerida, se apoye en las resistencias eléctricas para conseguir su propósito.

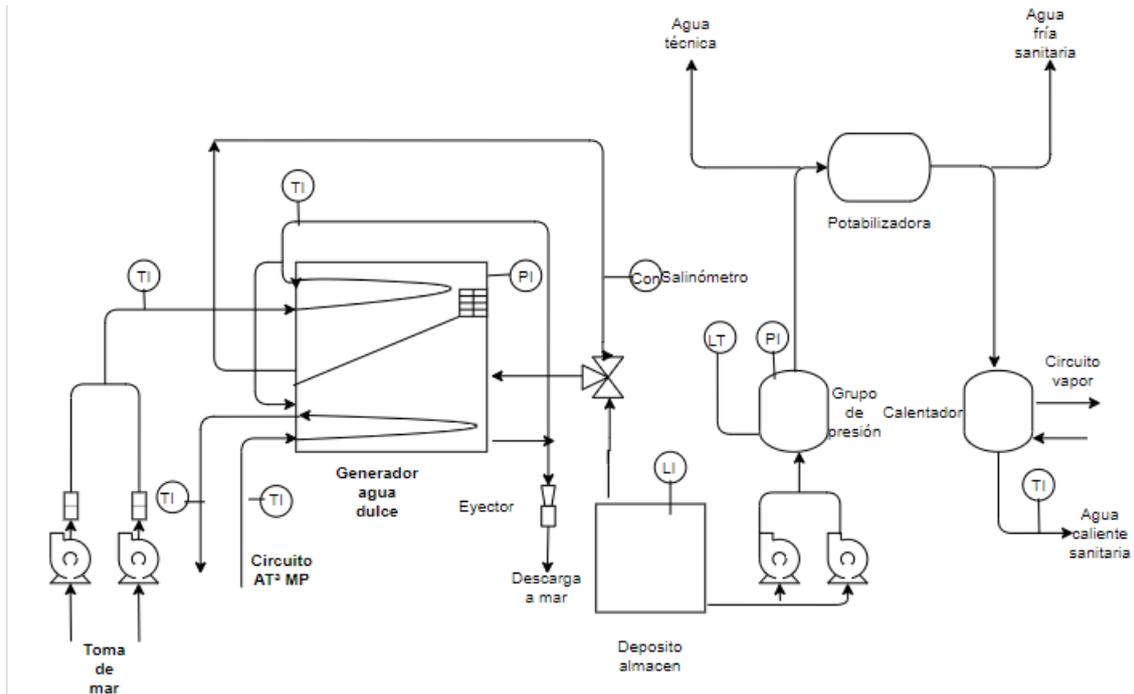


Figuras 7: Calentador compacto de agua sanitaria [21]

#### 4.1.2.5 Diagrama de la instalación propuesta

Con todo lo anterior, se representa en la figura 8 un diagrama de los equipos e instrumentación de la instalación compacta de agua del crucero. El funcionamiento sería el siguiente: El agua procedente del mar se hace pasar por el condensador del generador de agua dulce de esta manera se precalienta el agua de mar, en esta fase y el agua dentro del generador de agua, se aprovecha el circuito de refrigeración de agua para continuar con la evaporación del agua de mar. A continuación el vapor llega al condensador éste se condensa y se lleva al tanque de almacenamiento. Previo al tanque, hay un salinómetro que comprueba en todo momento la salinidad del agua producida. En caso de superar los 4ppm de concentración de sales, el sistema actuará mediante una válvula de tres vías que recirculará de nuevo el agua al evaporador.

A continuación y en función de la presión del grupo de presión este arranca las bombas para distribuir el agua a los diferentes servicios. El agua destinada al consumo humano se hace pasar por la potabilizadora. El agua caliente sanitaria se produce en un calentador que aprovecha el circuito de vapor de las calderas de recuperación de gases de escape de los motores.



Figuras 8: Diagrama de instalación de generación de agua

### 4.1.3 Dimensionamiento de la instalación

En el presente apartado se van a realizar los cálculos pertinentes para dimensionar los equipos necesarios para la instalación compacta de generación de agua en el crucero objeto del presente estudio.

#### 4.1.3.1 Generador

Para comenzar con los cálculos, empezaremos por el generador de agua dulce que se utilizará para dotar de agua a todos los servicios necesarios en el crucero, como son el agua técnica y el agua sanitaria.

#### Consumo de agua sanitaria

Para el cálculo del agua sanitaria nos basaremos en la norma ISO 15748. De la tabla adjunta se toman los datos de referencia para la dotación de agua sanitaria.

Tabla 10: Dotación de agua sanitaria para diferentes tipos de embarcaciones [22]

Type of ship		Group of persons embarked	Water consumption when fitted with	
			Flushing toilet system	Vacuum toilet system
Seagoing ship	Cargo ship	Crew/bed	220 l	175 l
	Passenger ship	Passenger/bed	270 l	225 l
	Luxury liner	Passenger/bed	—	275 l
	Ferryboat with cabins	Passenger/bed	205 l <sup>3</sup>	160 l <sup>3</sup>
		Passenger without bed	100 l	55 l
	Ferryboat without cabins	Passenger without bed	150 l	105 l
Crew without bed		100 l	55 l	
Inland waterway craft	Cargo ship	Crew/bed	Minimum 150 l	
	Passenger ship with cabins	Passenger/crew/bed	220 l	175 l
	Passenger ship without cabins	Crew/passenger	100 l	
Special-purpose ship	Research ship	per bed	220 l	175 l
	Federal armed forces tender and larger	Crew/bed	160 l	110 l
	Federal armed forces – smaller than tender	Crew/bed	100 l	55 l
Fishing vessel		Crew/bed	Minimum 150 l	
Offshore		Crew/bed	350 l	

<sup>3</sup> No shipboard laundry.

Por tanto:

$$Q_{\text{sanitaria}} \text{ (m}^3\text{/día)} = \text{dot (m}^3\text{/per día)} * N^{\circ} \text{ personas (per)} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$Q_{\text{sanitaria}} \text{ (m}^3\text{/día)} = 0,275 \text{ (m}^3\text{/per día)} * 400 \text{ (per)}$$

$$Q_{\text{sanitaria}} \text{ (m}^3\text{/día)} = 110 \text{ m}^3\text{/día}$$

### Consumos de agua técnica

Se añadirán otros  $Q_{\text{agua técnica}} = 20 \text{ m}^3\text{/día}$  como consumo de agua técnica, que se utilizará básicamente para la tasa de renovación de piscinas y Spas, que se estima una tasa de renovación  $Q=30 \text{ l/per día}$ , que hacen un total de  $Q_{\text{renovación}} = 7,5 \text{ m}^3\text{/día}$ ; para pérdidas en circuitos cerrados de la caldera o motores, tabla 24, otros  $Q= 12 \text{ m}^3\text{/día}$ .

El resto de servicios que necesitan agua para su funcionamiento, y aprovechando la calidad de salida de la depuradora de aguas residuales, serán utilizados para abastecer a los siguientes servicios: separadoras de sentinas, depuradoras para aceite y combustible, limpieza de ancla, circuitos refrigeración motores, calderas recuperación de gases de escape, inodoros.

### Necesidades de energía para calentamiento de agua de mar

Para el cálculo de la potencia necesaria para el calentamiento del agua de entrada en el evaporador suponemos: que la  $T^{\text{a}}_{\text{agua de mar}}$  es de  $15^{\circ}\text{C}$ , que el evaporador trabajará a  $T_{\text{evaporador}}=40^{\circ}\text{C}$  y que el generador estará en servicio las 24h del día. Por tanto, la potencia necesaria se calcula:

$$\text{Pot}_{\text{evaporador}} = Q_{\text{calentamiento}} + Q_{\text{fase}} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$Q_{\text{calentamiento}} = m * c_p * \Delta T \quad \text{Ecuación 3}$$

$$Q_{\text{calentamiento}} = 1,74 \text{ Kg/s} * 4,2 \text{ KJ/Kg K} * 25 \text{ K}$$

$$Q_{\text{calentamiento}} = 182,7 \text{ KW}$$

$$Q_{\text{fase}} = m * L_v \quad \text{Ecuación 4}$$

$$Q_{\text{fase}} = 1,74 \text{ Kg/s} * 2257 \text{ KJ/Kg}$$

$$Q_{\text{fase}} = 3927 \text{ KW}$$

Luego:

$$\text{Pot}_{\text{evaporador}} = 182,7 \text{ KW} + 3927 \text{ KW}$$

$$\text{Pot}_{\text{evaporador}} = 4.109,7 \text{ KW}$$

#### 4.1.3.2 Depósito de alimentación de agua destilada

Se dispondrá de una autonomía mínima para cubrir las necesidades durante dos días por ello habrá dos tanques de  $V=130\text{m}^3$  cada uno que se corresponden a los volúmenes anteriormente calculados para agua sanitaria y agua técnica.

#### 4.1.3.3 Grupo de presión de agua destilada

##### Bombas

Para el cálculo del caudal punta de agua potable necesaria en el crucero, se utiliza la tabla 11 de la Norma UNE-ISO 15748-2. Realizando un sumatorio de los caudales unitarios, se obtendrá el consumo de agua potable fría y caliente para el crucero a estudio (tabla 12).

**Tabla 11:** Valores para el cálculo del caudal de consumo de agua potable [23]

Presión de flujo mínimo $P_{\text{mín}}^{\text{fl}} \text{ bar}$	Tipo de punto de servicio de agua potable	Caudal de cálculo para el consumo de					
		Agua mezclada <sup>a</sup>		Agua potable fría o caliente solamente			
		$\dot{V}_R^{\text{fría}}$ l/s	$\dot{V}_R^{\text{caliente}}$ l/s	$\dot{V}_R^{\text{fría}}$ l/s			
0,5	<b>Válvulas de salida sin globo<sup>b</sup></b>	DN 15	–	–	0,30		
		DN 20	–	–	0,50		
		DN 25	–	–	1,00		
		1,0	<b>con globo</b>	DN 10	–	–	0,15
				DN 15	–	–	0,15
1,0	Boquillas de ducha para limpieza	DN 15	0,10	0,10	0,20		
1,2	Válvula para baldeo de l retrete	DN 15	–	–	0,70		
1,2	Válvula para baldeo de l retrete	DN 20	–	–	1,00		
0,4	Válvula para baldeo de l retrete	DN 25	–	–	1,00		
1,0	Válvula para urinarios	DN 15	–	–	0,30		
1,0	Lavavajillas doméstico	DN 15	–	–	0,15		
1,0	Lavadora doméstica	DN 15	–	–	0,25		
–	Máquinas y aparatos de la zona de abastecimiento (datos de acuerdo con el fabricante)	DN...	–	–	–		
1,0	<b>Llaves mezcladoras</b>	Platos de ducha	DN 15	0,15	0,15	–	
		Bañeras	DN 15	0,15	0,15	–	
		Fregaderos de cocina	DN 15	0,07	0,07	–	
		Lavabos de pedestal	DN 15	0,07	0,07	–	
		Bidets	DN 15	0,07	0,07	–	
		Lavapiés	DN 15	0,07	0,07	–	
		Llaves mezcladoras	DN 20	0,30	0,30	–	
0,5	Tanques para el baldeo de retretes	DN 15	–	–	0,13		
1,5	Aseo de vacío	DN 15	–	–	0,30		
1,0	Caldera eléctrica de agua	DN 15	–	–	0,10		

NOTA – Para los puntos de suministro y aparatos no incluidos en esta lista y que sean del mismo tipo de los que figuran pero con mayores flujos o presiones de flujo mínimo que los que se dan aquí, se deben tener en cuenta los datos suministrados por el fabricante al determinar el diámetro requerido de tuberías.

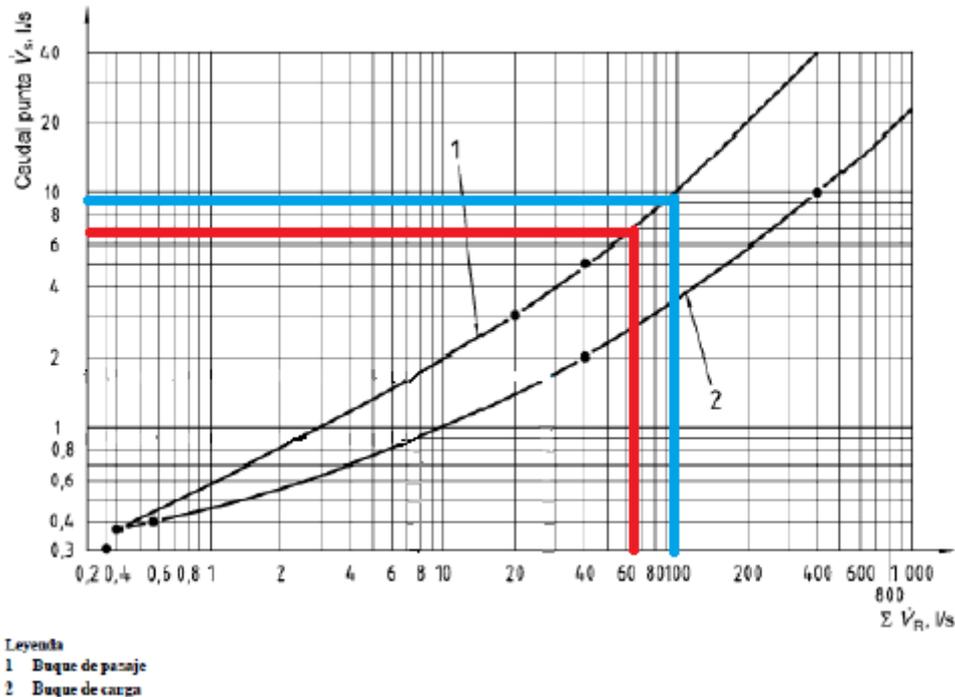
<sup>a</sup> Los caudales de cálculo para la salida de agua mezclada están basados en 15° C para el agua potable fría y en 60 °C para la caliente.

<sup>b</sup> Para las válvulas de salida sin globo y con mangueras y dispositivos conectados, se ha incluido en la presión de flujo mínimo un valor estándar de la pérdida de presión en la línea de mangueras (hasta 10 m) y en los aparatos conectados (por ejemplo un limpiador de alta presión). En este caso, se incrementa la presión de flujo mínimo entre 1 bar y 1,5 bar.

**Tabla 12:** Cálculos del caudal de consumo de agua potable en el cruceo

Instalación	Cantidad	Q unitario (l/s)		Q total (l/s)	
		Agua fría	Agua caliente	Agua fría	Agua caliente
Lavabos	250	0,07	0,07	17,5	17,5
retretes	200	0,015		30	
Duchas	250	0,15	0,15	37,5	37,5
Lavavajillas	10	0,15	0,15	1,5	1,5
Lavadoras	30	0,25	0,25	7,5	7,5
				94	64

Llevando estos datos a la gráfica (figura 9) para el cálculo de la caudal punta, se tiene que para el agua fría  $Q_{P \text{ Agua Fría}} = 9,4 \text{ l/s}$  y para el agua caliente  $Q_{P \text{ Agua Caliente}} = 7,5 \text{ l/s}$  haciendo un total de  $Q_{P \text{ Total}} = 16,9 \text{ l/s}$ .



Figuras 9: Gráfica para cálculos de caudales punta de agua potable [24]

## Presión

Para calcular la presión que deben tener las bombas del grupo hidróforo, se aplicará la ecuación de Bernoulli (ecuación 5), suponiendo que el punto más desfavorable de suministro se encuentra a una altura  $h = 50 \text{ m}$  y que la velocidad es constante, se obtiene que la presión mínima necesaria sería:

$$P + \rho gh + 1/2 \rho v^2 = \text{cte.} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$P_0 + \rho gh_0 + 1/2 \rho v_0^2 = P_1 + \rho gh_1 + 1/2 \rho v_1^2$$

$$P_0 = P_1 + \rho gh_1$$

$$P_0 = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Pa} + 1.000 \text{ Kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 50 \text{ m}$$

$$P_0 = 640.500 \text{ Pa} = 6,4 \text{ bar}$$

Añadiendo un 15% en concepto de pérdidas de carga, se obtiene que la presión mínima de la bomba debiera de ser:

$$P = P_0 + P_p = 6,4 \text{ bar} + 0,96 \text{ bar} = 7,36 \text{ bar}$$

#### 4.1.3.4 Depósito acumulador del grupo de presión

Para el cálculo del tamaño del depósito acumulador se toma como referencias la norma UNE 149202. Para llevar a cabo el dimensionamiento de dicho depósito, se necesita conocer el número de bombas necesarias de acuerdo con el caudal de cálculo (tabla 13) así como el número de arranque máximos por bomba (tabla 14).

**Tabla 13:** Cantidad de bombas necesarias [25]

Caudal de cálculo ( $Q_c$ )	Número de bombas en servicio (N)
Menor o igual que 10 l/s	2
Mayor que 10 l/s y menor o igual que 30 l/s	3
Mayor que 30 l/s	4

**Tabla 14:** Número de arranques máximos por bomba [26]

Potencia del motor (kW)		Nº máximo de arranques / hora según el tipo de arranque			
Desde	Hasta	Directo	Estrella / Triángulo	Progresivo	Variador de frecuencia
0	4	30	35	35	40
4,01	11	20	22	22	25
11,01	22	15	18	18	20
22,01	55	10	15	15	18
55,01	y superior	Según indicaciones documentadas del fabricante			

Con los valores de las tablas 13 y 14 y la presión mínima de la bomba, se calcula el volumen del depósito acumulador aplicando la ecuación 6:

$$V_{\text{ext}} = 900 * Q_c * (P_b + d + 1) / n * d * b \quad \text{Ecuación 6}$$

Siendo:

- $Q_c$ : Caudal de cálculo
- $P_b$ : presión mínima
- $d$  (bar): Diferencia entre presión de arranque y de paro
- $n$ : nº arranques máximos a la hora
- $b$ : nº bombas incluidas las de reserva

Tenemos que:

$$V_{\text{ext}} = 900 * 16,9 \text{ l/s} * (7,36 \text{ bar} + 2 \text{ bar} + 1) / 20 * 2 * 4$$

$$V_{\text{ext}} = 984,85 \text{ l}$$

#### 4.1.3.5 Calentador de agua caliente sanitaria

Para el dimensionamiento del calentador del agua caliente sanitaria, se toma como referencia la normativa UNE-EN 15478-2. De acuerdo con los valores de la tabla 15, el calentador de agua sanitaria para un total de 400 personas se tendrá un volumen de  $V=8997\text{l}$ , necesita una potencia de calentamiento  $P=233\text{KW}$  y producirá en 1 hora  $18994\text{l}$  de agua caliente.

Tabla 15: Volumen calentador de agua [27]

Número de personas	Volumen del calentador de agua		Potencia de calentamiento	Tiempo de calentamiento desde 10 °C hasta 65 °C	Cantidad en l de agua mezclada de 40 °C a producir en		Potencia de calentamiento adicional		
	l	kW			1 h	2 h		kW	
1 a 10	200	15	51	660	1 030	8			
	300	10					680	930	5
11 a 20	400	30	51	1 320	2 060	15			
	650	20					1 420	1 940	10
21 a 30	650	40	62	1 940	2 920	20			
	1 000	20					1 960	2 450	10
31 a 50	1 000	40	96	2 450	3 440	20			
	1 500	25					2 820	3 440	13
51 a 75	1 000	80	48	3 440	5 400	40			
	1 500	60					3 680	5 160	30
	2 000	40					3 930	4 910	20
76 a 100	2 000	80	96	4 910	6 880	40			
	3 000	40					5 400	6 380	20
101 a 150	3 000	100	115	6 880	9 330	50			
	5 000	40					8 250	9 230	20
151 a 200	3 000	160	72	8 250	12 280	60			
	5 000	100					9 820	12 280	50
201 a 300	5 000	200	96	12 280	17 200	60			
	7 000	300					17 690	25 060	70
301 a 500	10 000	200	192	19 550	24 570	60			
	10 000	300					22 110	29 480	70
701 a 1 000	10 000	550	70	28 250	41 770	100			

NOTA 1 - Por regla general, no se utilizan calentadores individuales de agua de más de 3 000 l de capacidad. Para demandas superiores de agua se deben instalar dos o más calentadores de agua de un tamaño apropiado, o calentadores de flujo continuo.  
 NOTA 2 - Para cada número de personas se indican dos posibilidades de volumen de agua.  
 NOTA 3 - La columna "Potencia de calentamiento adicional" tiene en cuenta el suministro de agua potable que hay que asegurar en punto (véase el apartado 1.1.1).

#### 4.1.3.6 Resumen del equipamiento de una instalación

La tabla 16 contiene un resumen de los datos principales calculados anteriormente.

Tabla 16: Resumen de datos calculados

Parámetro	Unidad	Valor
Q diario	m <sup>3</sup> /día	130
Q punta	l/s	19,6
P calentamiento generador	KW	4109
P g. hidróforo	bar	7,36
V deposito g. hidróforo	l	984
P calentador	KW	233
V calentador	l	8997

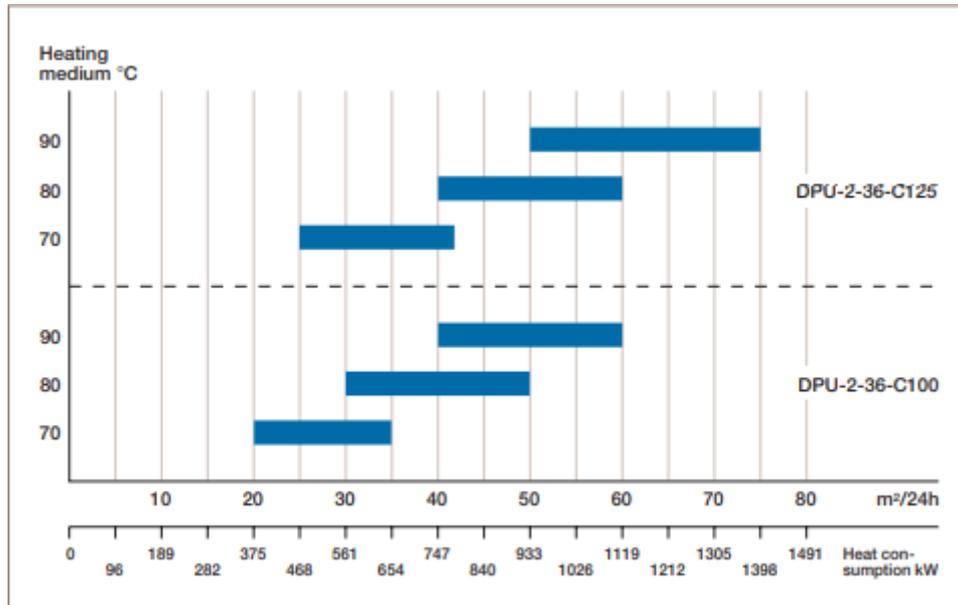


Figura 10: Modelo desalinizador [42]

Para la generación de agua se dispondrá de 3 generadores de agua de la marca alfa laval [42] modelo DPU-2-36-C125 que puede producir un  $V = 75 \text{ m}^3/\text{día}$  cada unidad.



Size	L		D		H		SD		SL		Weight*		Pump	
	mm	inches	kg	lbs	mm	inches								
DPU-2-36-C100	1445	56.9	1730	68.1	2685	105.7	2480	96.9	2100	82.7	2250	5038		
DPU-2-36-CAS100	1470	57.9	2030	79.9	2685	105.7	2760	108.9	2100	82.7	2435	5357	450	17.7
DPU-2-36-CS100	1470	57.9	2030	79.9	2685	105.7	2760	108.9	2100	82.7	2435	5357		
DPU-2-36-C125	1445	56.9	2080	81.9	2685	105.7	2480	96.9	2430	95.7	2450	5390		
DPU-2-36-CAS125	1470	57.9	2420	95.3	2685	105.7	2800	110.2	2430	95.7	2643	5815	821	323
DPU-2-36-CS125	1470	57.9	2420	95.3	2685	105.7	2800	110.2	2430	95.7	2643	5815		

Figura 11: Dimensiones desalinizador [42]

El grupo de presión seleccionado tiene dos depósitos acumuladores de 500l cada uno y 3 bombas modelo DPVF 18-100

**Tabla 17:** Depósito acumulador grupo de presión [43]

Capacidad Litros	Tipo de Acumulador	Denominación según timbrado			Dimensiones			
		6 kg/cm <sup>2</sup>	8 kg/cm <sup>2</sup>	10 kg/cm <sup>2</sup>	A	H	N	M
100	Membrana	-	-	M0100V10	450	870	1 1/2"	3/4"
150	Membrana	-	-	M0150V10	485	1.080	1 1/2"	3/4"
200	Membrana	-	-	M0200V10	550	1.075	1 1/2"	3/4"
300	Membrana	-	-	M0300V10	650	1.178	1 1/2"	3/4"
500	Membrana	-	-	M0500V10	600	2.065	1 1/2"	3/4"
700	Membrana	-	-	M0700V10	700	2.085	1 1/2"	3/4"
900	Membrana	-	-	M0900V10	800	2.155	1 1/2"	3/4"
1.000	Membrana	-	-	M1000V10	850	2.225	2"	3/4"
1.400	Membrana	-	-	M1400V10	1.000	2.320	2"	3/4"
2 x 500	Membrana	-	-	M0500V10x2	600x2	2.065	2"	3/4"
2 x 700	Membrana	-	-	M0700V10x2	700x2	2.085	2"	3/4"
100	Galvanizado	-	-	I0100V10-(*)	400	1.090	1 1/2"	1 1/2"
200	Galvanizado	-	-	I0200V10-(*)	500	1.385	1 1/2"	1 1/2"
300	Galvanizado	-	-	I0300V10-(*)	550	1.615	1 1/2"	1 1/2"
500	Galvanizado	I0500V06-(*)	I0500V08-(*)	I0500V10-(*)	650	1.860	1 1/2"	1 1/2"
750	Galvanizado	I0750V06-(*)	I0750V08-(*)	I0750V10-(*)	750	2.080	1 1/2"	1 1/2"
1.000	Galvanizado	I1000V06-(*)	I1000V08-(*)	I1000V10-(*)	800	2.373	1 1/2"	1 1/2"
1.250	Galvanizado	I1250V06-(*)	I1250V08-(*)	I1250V10-(*)	900	2.380	2"	1 1/2"
1.500	Galvanizado	I1500V06-(*)	I1500V08-(*)	I1500V10-(*)	950	2.465	2"	1 1/2"
2.000	Galvanizado	I2000V06-(*)	I2000V08-(*)	I2000V10-(*)	1.100	2.490	2"	1 1/2"

(\*) = 1 ó 2 ó 3 ó 4 inyectores, en función del nº de bombas del módulo de bombeo.

A = Diámetro del acumulador - H = Altura del acumulador - N = Conexión latiguillo al colector - M = Conexión drenaje

**Tabla 18:** Bombas del grupo de presión [43]

TIPO DE BOMBA	kW	Identificador	Caudal en m <sup>3</sup> /hora (según nº de bombas)							Nº Bombas	
			0	16	32	48	64	80	88		96
			0	12	24	36	48	60	66	72	4 bombas
			0	8	16	24	32	40	44	48	3 bombas
			0	8	16	24	32	40	44	48	2 bombas
DPVF 18-20	2,20	VLX5002	28,8	28,5	27,8	26,5	24,6	22,1	20,5	18,4	Altura manométrica en metros
DPVF 18-30	3,00	VLX5003	43,1	42,8	41,6	39,8	36,9	33,2	30,8	27,6	
DPVF 18-40	4,00	VLX5004	57,5	57,0	55,5	53,0	49,3	44,3	41,0	36,8	
DPVF 18-50	5,50	VLX5005	71,9	71,3	69,4	66,3	61,6	55,3	51,3	45,9	
DPVF 18-60	5,50	VLX5006	86,3	85,5	83,3	79,5	73,9	66,4	61,5	55,1	
DPVF 18-70	7,50	VLX5007	100,6	99,8	97,1	92,8	86,2	77,4	71,8	64,3	
DPVF 18-80	7,50	VLX5008	115,0	114,0	111,0	106,0	98,5	88,5	82,0	73,5	
DPVF 18-100	11,00	VLX5010	143,8	142,5	138,8	132,5	123,1	110,6	102,5	91,9	

## 4.2 Depuración de agua residual

Los cruceros tienen una problemática diferente a otros tipos de barcos en lo que respecta a la gestión del agua, como por ejemplo: consumo de grandes cantidades de agua, navegación habitualmente cerca de la costa y muy a menudo en aguas sensibles con alto valor ecológico y una normativa [28] muy restrictiva. Debido a ello, se hace necesario instalar una depuradora a bordo, ante la imposibilidad de dotar al crucero de unos tanques de almacenamiento de agua residual con volumen suficiente.

La depuradora se encarga de gestionar los residuos generados por el uso y consumo de agua por parte del pasaje y la tripulación, para su posterior reutilización o vertido final en unas condiciones adecuadas. Los residuos a tratar se dividen en: **aguas grises**, las procedentes de las duchas, bañeras, lavabos, cocina, lavandería y las **aguas negras**, procedentes de los inodoros, servicios médicos y espacios destinados a los animales.

Las aguas residuales llegan a la depuradora con gran cantidad y diferentes tipos de contaminantes como se puede observar en la tabla inferior (tabla 19).

Tabla 19: Principales contaminantes del agua residual y su efecto [5]

Contaminante	Tipo contaminación	Efecto
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	Materia biodegradable	Crecimiento de microorganismos que agotan el oxígeno disuelto
Demanda química oxígeno (DQO) o Carbón orgánico total (COT)	Materia orgánica total	Toxicidad e igual que la DBO
Sólidos suspendidos totales (SST)	Materia sedimentable y coloidal	Sedimentación, digestión de la materia orgánica
Nitrógeno (NTK, NH <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> ) y Fósforo (Pt, PO <sub>4</sub> )	Nitrógeno y fósforo	Nutrientes que provocan eutrofización en el agua
Grasa y Aceites	Grasas y Aceites	Impacto visual y reducen transferencia de oxígeno
Coliformes totales y huevos helmitos	Patógenos y parásitos	Transmisión de enfermedades

Para eliminar toda esta contaminación se tienen que realizar una serie de procesos [29]:

**Pretratamiento:** La finalidad de este proceso es eliminar la materia que pueda interferir en procesos posteriores, principalmente: se eliminan cuerpos voluminosos, arenas, grasas, trapos, palos que llegan a través de los colectores. Las etapas realizadas son desbaste, desarenado y desengrasado.

**Tratamiento primario:** El objetivo principal es la separación y eliminación de las partículas en suspensión que pasan el pretratamiento. El proceso más común es el de decantación, aunque existen otros como el de flotación.

**Tratamiento secundario:** El objetivo es la reducción y eliminación de la materia orgánica y nutrientes que están presentes en el agua residual. Los principales son los fangos activos y los lechos bacterianos.

**Tratamiento terciario:** La función es la de eliminar materia particulada y coloidal, nutrientes y patógenos. Los procesos básicos son: la floculación, filtración, eliminación de nutrientes y desinfección.

La siguiente (tabla 20) muestra los procesos físico-químicos que se pueden desarrollar en los distintos tipos de tratamiento del agua residual:

**Tabla 20:** Procesos en los distintos tipos tratamiento del agua residual [29]

Pretratamiento	Tratamiento Primario	Tratamiento Secundario	Tratamiento Terciario	Desinfección
Desbaste	Decantación	Fangos Activos	Tratamiento físico-químico	Cloración
Desengrasado	Flotación	Lecho bacteriano	Sistemas de filtración	Ozonización
Desarenado	Coagulación Floculación	Biodisco	Filtración membranas	Radiación UV
Preaireación	Precipitación Química	Degradación Anaerobia	Desalación	Térmica
Neutralización		Coagulación Floculación		
Homogenización		Oxidación Química		
		Precipitación Química		

Atendiendo a los diferentes tipos de tratamiento y como se puede observar en la (tabla 21), a medida que se incrementa el tipo de tratamiento aumenta la calidad del efluente y el rendimiento de la depuración. Por ejemplo, la eliminación de carga orgánica contaminante (DQO) si se realiza un tratamiento solamente primario se elimina en un 30%, pero en cambio si se somete a un tratamiento terciario está prácticamente queda eliminada en un 99%.

**Tabla 21:** Porcentaje de eliminación de contaminantes según el tipo de tratamiento [30]

Parámetro	Tratamiento Primario	Tratamiento Secundario	Tratamiento Terciario
DQO	30	80	99,8
DBO5	35	90	99,9
Sólidos Suspensión	60	90	100
Nitrógeno	20	50	99,5
Fósforo	10	30	99,3

En la tabla inferior (tabla 22) se muestra, a modo de resumen, una comparativa referente a los costes de operación y mantenimiento de los diferentes procesos de depuración de aguas residuales. Atendiendo a dicha tabla se desea que la implantación no se alta y que los costes referentes a la operación y mantenimiento sean bajos. Respecto al consumo de energía se procura que sea lo más bajo posible.

**Tabla 22:** Comparativa del coste de los distintos procesos de depuración del agua residual [29]

Proceso	Operación	Mantenimiento	Seguridad	Coste inversión	Coste Operación	Energía
Decantación	Bajo	Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Bajo
Flotación	Alto	Alto	Medio	Alto	Medio	Alto
Coagulación Floculación	Bajo	Bajo	Medio	Bajo	Medio	Bajo
Precipitación Química	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Bajo
Fangos Activos	Bajo	Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Alto
Lecho bacteriano	Alto	Bajo	Medio	Alto	Medio	Bajo
Biodisco	Bajo	Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Medio
Degradación Anaerobia	Alto	Medio	Bajo	Alto	Medio	Medio
Oxidación Química	Alto	Alto	Bajo	Alto	Alto	Alto
Filtración	Bajo	Alto	Medio	Medio	Medio	Bajo
Intercambio Iónico	Bajo	Alto	Medio	Alto	Alto	Alto
Membranas	Bajo	Medio	Medio	Medio	Medio	Bajo
Osmosis Inversa	Bajo	Alto	Medio	Alto	Alto	Alto
Evaporación	Bajo	Alto	Medio	Alto	Medio	Alto
Tratamientos Electroquímicos	Bajo	Alto	Medio	Alto	Alto	Alto
Oxidación Húmeda	Alto	Alto	Medio	Alto	Alto	Alto
Adsorción	Bajo	Alto	Medio	Bajo	Bajo	Medio

#### 4.2.1 Instalación propuesta para la depuración del agua residual

A partir de los datos anteriormente comentados, se realiza una propuesta para la depuración de las aguas residuales, que en la figura inferior (figura 12) se representa en modo básico.



**Figura 12:** Esquema básico propuesto para la depuradora del agua residual

Una vez enumerados los sistemas más representativos de depuración de agua y después de analizar los costes inversión inicial además de los de operación, mantenimiento y energéticos, se propone la instalación, que consta de un pretratamiento, un tratamiento secundario de fangos activos, un tratamiento terciario con membranas de ultrafiltración y, para terminar, una desinfección de mantenimiento.

A continuación, se detallan los equipos que componen la instalación, así como su funcionamiento. Es importante señalar que estos equipos están diseñados para un funcionamiento autónomo. En el centro de control, se dispondrán de todas las señales necesarias de la instalación para controlar su correcto funcionamiento, además de las alarmas que se generarán ante un funcionamiento anómalo.

#### 4.2.2 Equipamiento para la depuración del agua residual

##### 4.2.2.1 Pretratamiento

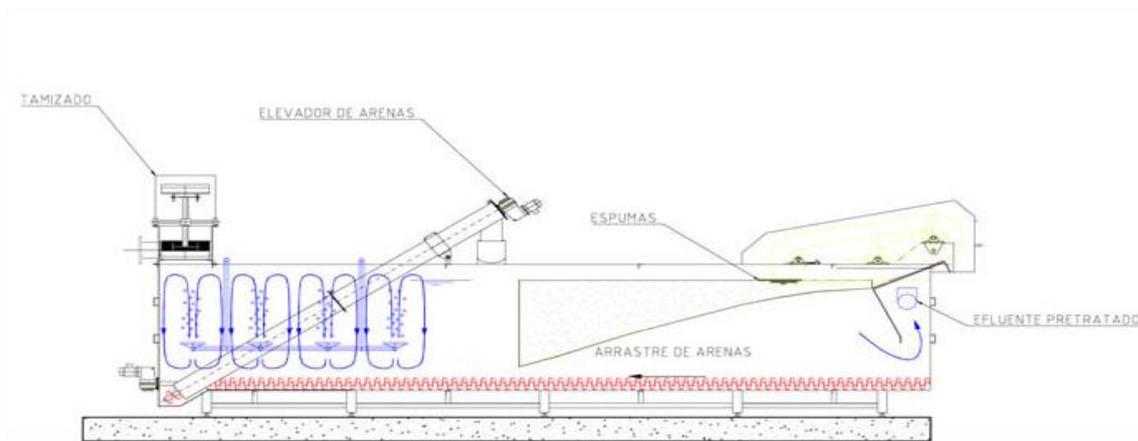
Para el pretratamiento de las aguas residuales se instalará una planta compacta ajustada al caudal oportuno (Figura13). Este equipo realizará una serie de operaciones a través de las cuales se retira del agua residual la mayor cantidad de materias (toallitas, arenas, aceites, grasas,...) que pueden ocasionar problemas en tratamientos posteriores. Es por esto, que cualquier depuradora dispone de un sistema de pretratamiento para evitar muchos problemas. Las operaciones que se realizan son:

**Desbaste:** En este proceso se eliminan los sólidos de tamaño grande y mediano que son arrastrados por el agua residual. Generalmente tienen un paso de entre  $\varnothing = 3$  y 6 mm. Los equipos utilizados para ello son los tamices y las rejillas.

**Desarenado:** cuya función es la de eliminar arenas cuyo tamaño sea superior a  $\varnothing = 0,2\text{mm}$  para proteger a los equipos posteriores frente al desgaste y, evitar sedimentaciones en tuberías. El proceso de separación de las arenas se realiza mediante la inyección de aire al agua residual provocando una disminución de la velocidad del agua por debajo del límite de sedimentación de dichas arenas, pero por encima del límite de sedimentación de la materia orgánica.

**Desengrasado:** el objeto es eliminar aceites y grasa del agua con el fin de evitar problemas en procesos posteriores. Este proceso se suele realizar en la misma cuba de desarenado, y aprovechando el aire suministrado, que hace que floten las grasas, para posteriormente ser extraídas del proceso.

El funcionamiento instalación de pretratamiento (Figura 13) es el siguiente: el agua residual entra en un tanque compacto en el que en cual se realiza el tamizado, el agua pasa a través de un tamiz el cual poco a poco va tupiéndose por lo que el nivel de la cuba va subiendo y cuando llega a un valor predeterminado actúa sobre el tamiz arrancándolo y retirando los residuos atrapados. En la siguiente fase, el agua pasa a la zona de desarenado y desengrasado. Se inyecta aire en forma de burbujas gruesas que separan por una parte las arenas, caen al fondo y son extraídas por una serie de tornillos, y por otra parte las grasas y aceites, que flotan y se retiran mediante una rasqueta de superficie.



Figuras 13: Esquema del equipo compacto de pretratamiento [31]

#### 4.2.2.2 Tratamiento secundario

Tanto el tratamiento secundario como el terciario se realizarán en un MBR (membrane biological reactor) (figura14) que es una combinación de un reactor de lodos convencional y de un sistema de filtración por membranas.

Entre las ventajas de esta tecnología destacan:

- Una mayor calidad del agua tratada, de manera que puede ser reutilizada para otros usos.
- Reducción del tamaño de la instalación, gracias a la alta concentración a la que pueden trabajar.
- Sistema fiable y de bajo mantenimiento.
- Sistema ampliable de manera modular.

En cuanto a las desventajas:

- Las membranas son frágiles y se ensucian mucho.
- La inversión económica inicial es alta.

El tratamiento secundario es el encargado de eliminar la materia orgánica y los nutrientes presentes en las aguas residuales. La instalación propuesta consta de un depósito compartimentado para que en el interior de las diferentes cámaras se realice un proceso concreto. Mediante el tratamiento secundario se realizan las siguientes operaciones en distintas zonas:

**Anaerobia:** En esta zona se trata de que el oxígeno disuelto en el agua sea nulo, para que las bacterias PAO (*Poliphosphate Accumulating Organisms*) que se desarrollan en esas condiciones se alimenten de las grasas y elementos rápidamente biodegradables, y a la vez excreten el fósforo que poseen internamente. Para que la mezcla sea completa, se añade un agitador en la cámara.

**Anóxica:** Esta zona tiene la finalidad de eliminar el nitrógeno procedente de los nitratos. Es una zona en la que no existe oxígeno solamente el aportado por el nitrato ( $\text{NO}_3$ ). Las bacterias que se desarrollan en esta zona son las desnitrificantes, que consumen el oxígeno del nitrato dejando el nitrógeno en forma libre  $\text{N}_2$ , que se liberará a la atmósfera.

**Óxica:** Esta zona tiene por objeto eliminar nitrógeno mediante la nitrificación. Las bacterias nitrificantes que predominan en esta zona convierten el amonio  $\text{NH}_4$  en nitrato  $\text{NO}_3$  al añadir oxígeno.

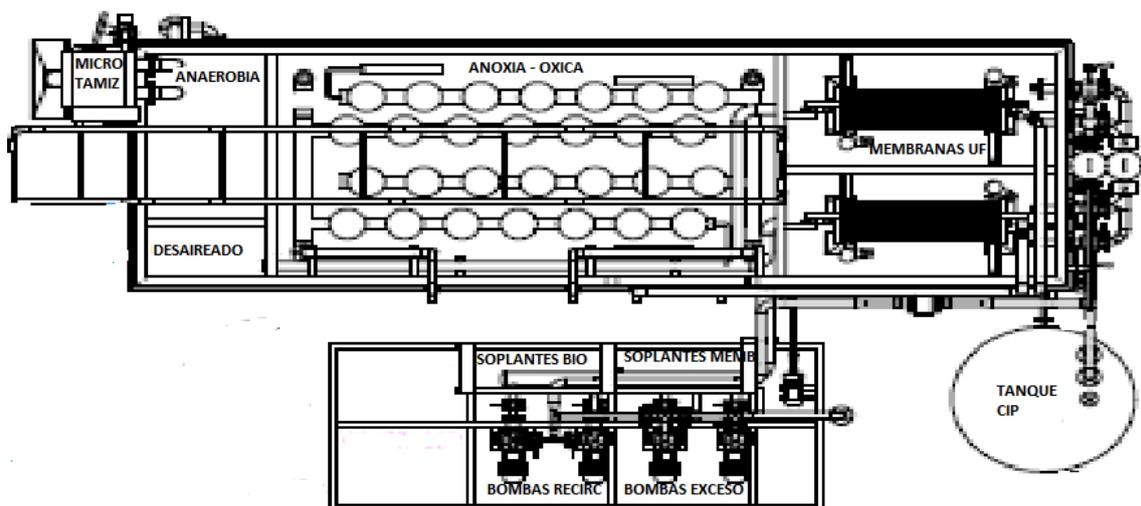
Tanto la zona anóxica como la óxica comparten la misma cámara. Se crearán las condiciones óxicas y anóxicas mediante el arranque y paro de las soplantes que aportan el oxígeno. En el tiempo de anóxica se paran las soplantes y arranca el agitador para tener una mezcla homogénea de agua residual y bacterias.

**Desaireación:** En esta zona se recibe el licor mixto procedente del tratamiento terciario, y su función es la eliminación del oxígeno presente en el retorno para devolverlo al sistema a través de la cámara anaerobia. Esta cámara dispone de un agitador que se encargará de mantener en suspensión la biomasa.

El funcionamiento es el siguiente: el agua pretratada pasa inicialmente por un microtamizado, cuya función es eliminar los sólidos con tamaño superior a  $\varnothing > 1\text{mm}$ . Con esto se evitan posibles roturas de los equipos de tratamiento terciario. Una vez realizado el tamizado, el agua residual entra en la cámara anaerobia, y en ella los compuestos presentes rápidamente biodegradables son consumidos por las PAO, bacterias para eliminar fósforo, a la vez que excretan el fósforo que contienen en su interior.

A la salida de la cámara anaerobia, el agua residual entra en la cámara anóxica – óxica. En ésta, primeramente se realiza la nitrificación, es decir, la eliminación del nitrógeno en forma amoniacal. Esta reacción la realizan las bacterias nitrificantes junto con el oxígeno aportado por las soplantes, y a la vez se absorbe el fósforo que viene de la zona anaerobia para que las PAO alcancen sus concentraciones necesarias en la célula, para su subsistencia. Además, en este proceso se realiza la purga del exceso de fango, con lo que de esta manera se elimina el fósforo, nitrógeno y la materia orgánica. La segunda reacción que realiza es la desnitrificación, es decir, la eliminación del nitrato generado en la nitrificación. Para ello, se paran las soplantes y arranca la agitación. Las bacterias que viven y se desarrollan en condiciones anóxicas eliminan el nitrato consumiendo el oxígeno de éste y dejando el nitrógeno en forma de gas  $\text{N}_2$ , que se dispersará en la atmosfera.

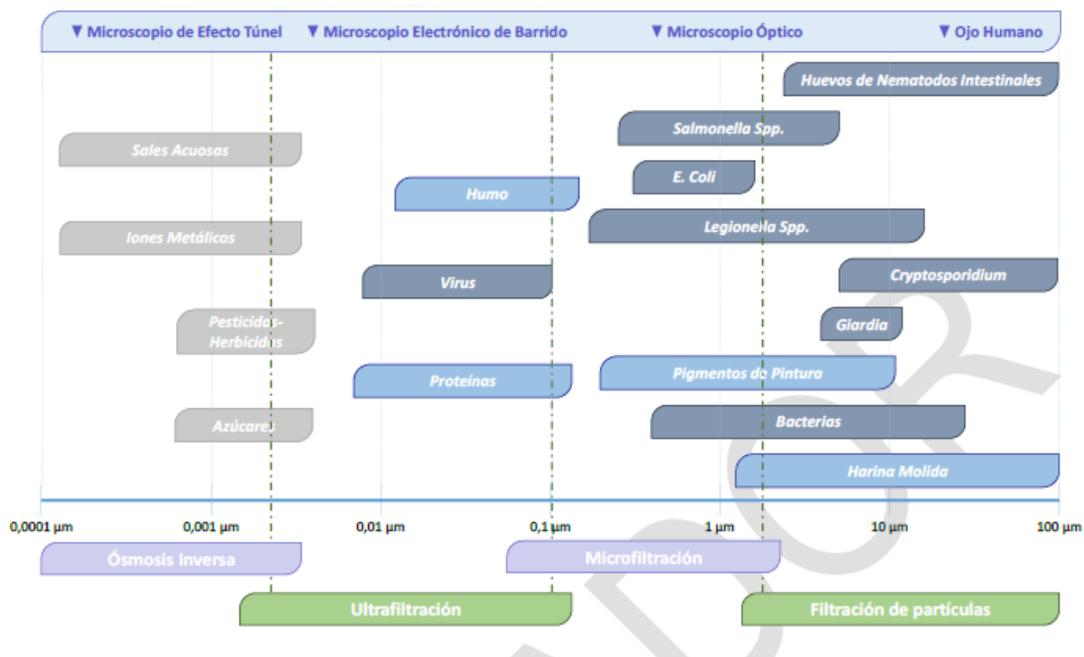
El reactor dispone de una zona de desaireación para recepcionar el licor mixto que retorna del tratamiento terciario, puesto que éste llega con exceso de oxígeno. Desde esta cámara se incorporará a la cámara anaeróbica, en ausencia total de oxígeno.



**Figuras 14:** Esquema de la instalación MBR

#### 4.2.2.3 Tratamiento terciario

La instalación dispondrá de un tratamiento terciario con el fin de poder darle un uso posterior al agua residual tratada. Para ello se instalarán unas **membranas de ultrafiltración** después del tratamiento secundario y dentro del mismo módulo. Como se puede observar en la figura inferior (Figura 15) con el tamaño del poro que se retiene en la ultrafiltración y en la ósmosis inversa, se pueden retener todo tipo de bacterias y virus.

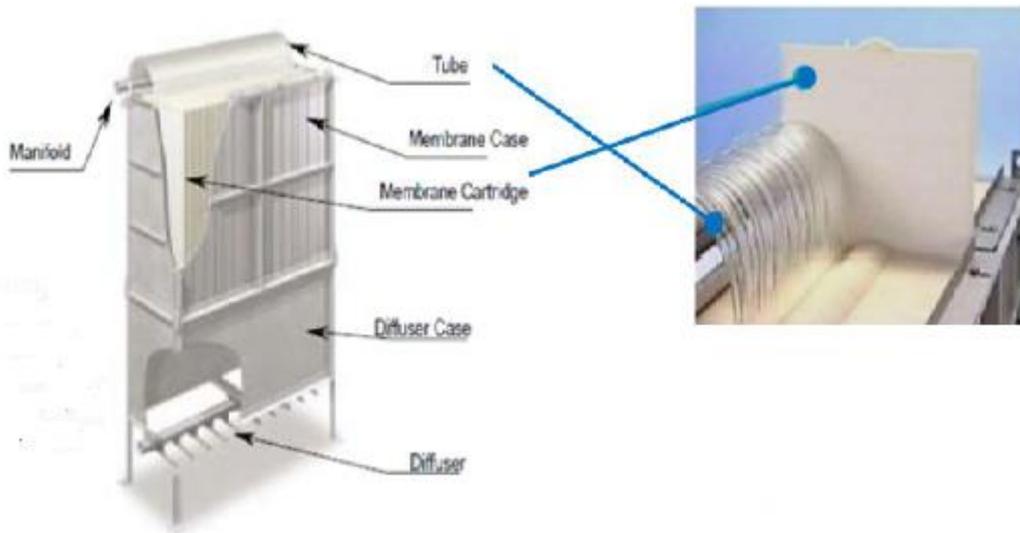


**Figuras 15:** Eliminación de compuestos en función del tipo de membrana [32]

El biorreactor de membrana (MBR) es una modificación del proceso de fangos activados, donde la separación del fango del agua tratada se realiza por medio de un sistema de membranas en vez de por un decantador secundario.

Las membranas instaladas son de placa plana. Están formadas por dos capas del material poroso que sirve como barrera selectiva, y permite el paso del agua pero retiene determinadas partículas, moléculas o sustancias que están adheridas a una placa o panel, que actúa como soporte, y por el cual se extrae el agua depurada o permeado.

Este tipo de membranas son generalmente rectangulares y las placas se van agrupando para formar un módulo y la agrupación de varios módulos forma un bastidor (Figura 16). Cada bastidor tiene su propio sistema de aireación en la parte inferior. El aire aportado se mezcla con el licor mixto procedente del reactor y la mezcla fluye a través de los elementos de la membrana. Además, este aire ayuda a retirar el fango adherido de la superficie de la membrana.



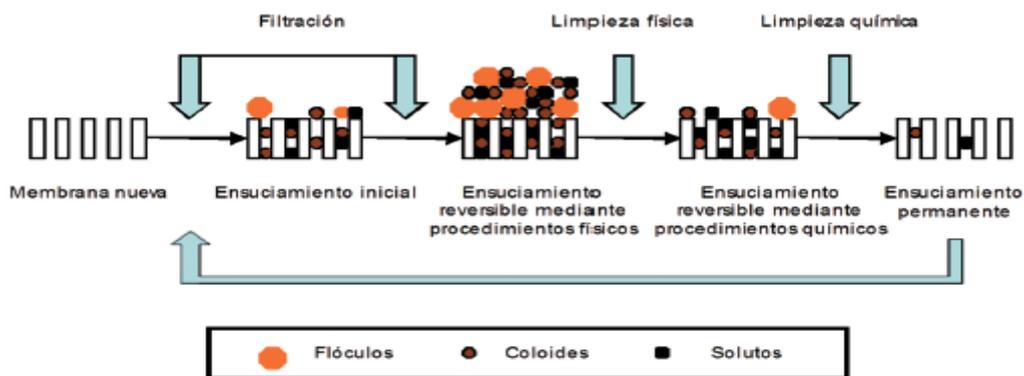
Figuras 16: Bastidor de placas planas [34]

A medida que las membranas están trabajando, se produce un ensuciamiento que disminuye la permeabilidad hasta un punto en que la filtración es insuficiente y energéticamente inviable. Existen tres tipos de ensuciamiento de las membranas (Figura17):

**Ensuciamiento reversible mediante limpieza física**, se puede limitar o eliminar mediante ciclos de trabajo (permeado-relajación-contralavado), a la vez que se airean las membranas.

**Ensuciamiento reversible mediante limpieza química** se realiza mediante soluciones químicas básicas para eliminar contenido orgánico (hipoclorito sódico), y soluciones ácidas para eliminar sales inorgánicas (ácido cítrico). Para realizar dichas limpiezas la instalación dispone de un tanque CIP, que es utilizado para contener el reactivo químico con el que se va a realizar la limpieza mediante la recirculación a través de la membrana en circuito cerrado.

**Ensuciamiento permanente**, que no se puede eliminar, y que es el limitante de la vida útil de las membranas



Figuras 17: Diferentes tipos de ensuciamiento de las membranas [33]

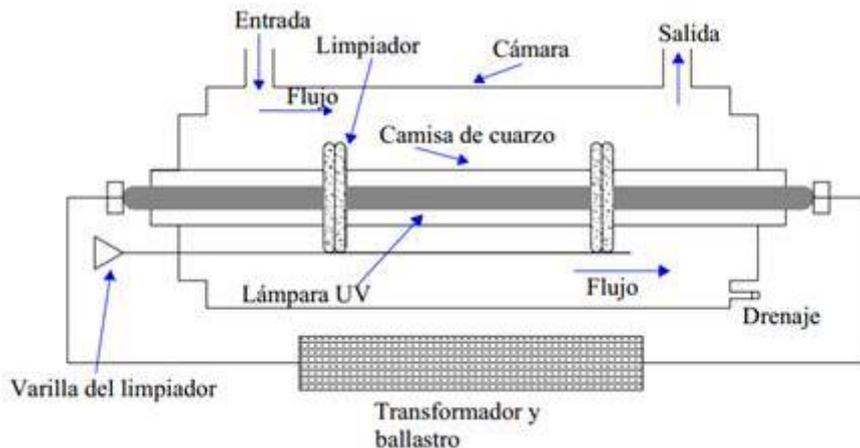
Las membranas se operan generalmente por ciclos de funcionamiento filtración–contralavado–relajación de duración y secuencia variable en función del fabricante. Este ajuste de los ciclos de funcionamiento junto con las limpiezas físicas y químicas tiene por objeto mantener un flujo lo más alto posible.

**Filtración:** este periodo está limitado por el ensuciamiento de las membranas, durante el cual se realiza la separación del fango y del agua a la vez que se airean.

**Relajación:** en este periodo se detiene la filtración, pero se mantiene la aireación de la membrana para su limpieza.

**Contralavado,** en este periodo la filtración está parada y se invierte el sentido del flujo; es decir, se fuerza al paso del agua filtrada a contracorriente por la membrana, para eliminar partículas acumuladas en los poros. Este ciclo se suele realizar cada cierto tiempo.

Posterior al paso a través de las membranas, el agua tratada se someterá a un **tratamiento de desinfección** que será realizado mediante un equipo de radiación ultravioleta (Figura 18). Esta tecnología aporta mayor seguridad a la operación y es respetuosa con el medio ambiente, puesto que no genera residuos químicos y no es corrosivo como el cloro. La salida se conectará al depósito de almacenamiento de agua regenerada, y será utilizada para diferentes usos internos del barco.



Figuras 18: Equipo de radiación UV para la desinfección del agua residual [35]

## 4.2.3 Dimensionamiento de la depuradora de agua residual

Con la base para el cálculo de caudales que se ha utilizado para la generación de agua potable (Apartado 4.1.3) se dimensionará la depuradora de agua residual.

### 4.2.3.1 Pretratamiento

Para el pretratamiento del agua residual se dispondrá de dos equipos compactos con capacidad de tratamiento de  $Q=15\text{m}^3/\text{h}$ .

### 4.2.3.2 Tanque de homogenización

Con el fin de controlar las características del agua residual y del caudal de alimentación del MBR, se dispone de un tanque de homogenización que irá dotado de un sistema de aireación y agitación para mantener en suspensión y completamente mezclada el agua residual, y para que los sólidos no decanten. Estará diseñado para un tiempo de retención de  $t=12\text{h}$ , por ello el volumen necesario será de  $V=60\text{m}^3$ .

### 4.2.3.3 Tratamiento biológico

Los cálculos de partida de caudales se obtienen del capítulo de agua dulce. Para el dimensionamiento del reactor biológico, se utilizan las fórmulas de la norma ATV-A131-2000 [36], mientras que los de contaminación y parámetros de salida se obtienen de las diferentes normativas del Marpol capítulo IV.

#### Caudales de diseño

$$Q_{\text{diario}} = 110 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$Q_{\text{medio}} = 4,7 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$Q_{\text{punta}} = 60,8 \text{ m}^3/\text{día}$$

#### Contaminación de entrada

$$\text{DBO}_5 = 60\text{g}/\text{hab día}$$

$$\text{Carga} = Q_{\text{DBO}_5} = 60\text{g}/\text{hab día} * 400 \text{ hab} = 24 \text{ Kg DBO}_5/\text{día}$$

$$\text{Concentración} = [\text{DBO}_5] = 24\text{Kg} * 110 \text{ m}^3/\text{día} * 10^3 = 218 \text{ mg}/\text{l}$$

$$\text{DQO} = 120\text{g}/\text{hab día}$$

$$\text{Carga} = Q_{\text{DQO}} = 120\text{g}/\text{hab día} * 400 \text{ hab} = 48 \text{ Kg DBO}_5/\text{día}$$

$$\text{Concentración} = [\text{DQO}] = 48\text{Kg} * 110 \text{ m}^3/\text{día} * 10^3 = 436 \text{ mg}/\text{l}$$

**NTK= 12g/hab día**      **Carga=  $Q_{NTK}$  = 12g/hab día \* 400 hab = 4,8 Kg DBO<sub>5</sub>/día**  
**Concentración= [NTK]= 4,8Kg \* 110 m<sup>3</sup>/día \* 10<sup>3</sup> = 43,6 mg/l**

**P= 12g/hab día**      **Carga=  $Q_P$  = 12g/hab día \* 400 hab = 0,72 Kg DBO<sub>5</sub>/día**  
**Concentración= [P]= 0,72Kg \* 110 m<sup>3</sup>/día \* 10<sup>3</sup> = 6,5 mg/l**

**MES= 80g/hab día**      **Carga=  $Q_{MES}$  = 80g/hab día \* 400 hab = 32 Kg DBO<sub>5</sub>/día**  
**Concentración= [MES]= 32Kg \* 110 m<sup>3</sup>/día \* 10<sup>3</sup> = 291 mg/l**

### Características del agua de salida

En la tabla inferior (tabla 23) se pueden observar las características mínimas requeridas del agua de salida de la EDAR (Estación depuradora de agua residual) de acuerdo a la norma actual MECP 227(64) y los resultados esperados o previstos tras la depuración del agua residual. Como se puede observar, con la instalación propuesta los valores que se conseguirán son muy inferiores a los marcados por la normativa actual.

**Tabla 23:** Normativa actual de vertido y previsión con la instalación propuesta

	MECP 227(64)	Previsto
Ecoli ud/100ml	100	Ausencia
SST mg/l	35	< 3
DBO <sub>5</sub> mg/l	25	< 5
DQO mg/l	125	< 50
N <sub>T</sub> mg/l	6-8,5	< 5
P <sub>T</sub> mg/l	20	< 0,5
pH	1	
Cl mg/l	0,5	

Para los cálculos del reactor biológico se toma como base las características particulares de un MBR que se pueden observar en la Tabla 24.

**Tabla 24:** Parámetros típicos de un biorreactor MBR [33]

Parámetro	Valores habituales operación
Edad fango d	20-30
Concentración LM g/l	5-10
Carga másica	<0,1
Recirculación %	300-400
Carga volumétrica KgDBO <sub>5</sub> /m <sup>3</sup>	0,2-0,5
THR h	6-12

Con esta base, el volumen del reactor biológico será el dado por la ecuación 7.

$$V_R = \frac{X \cdot DBO_5}{X \cdot C_m}$$

Ecuación 7

Siendo

$X_{DBO_5}$  : Carga DBO entrada (KgDBO<sub>5</sub>/día)

X : Concentración en el reactor (Kg/día)

$C_m$  : Carga másica

$$V_R = \frac{24 \text{ Kg DBO}_5/\text{d}}{8 \text{ Kg}/\text{m}^3 * 0,08 \text{ Kg DBO}_5/\text{Kg SSLV}} = 37,5 \text{ m}^3$$

Por tanto, se tomará un volumen del reactor biológico de  $V_R=40 \text{ m}^3$  que se repartirá, en  $V_1=2\text{m}^3$  para la zona de desaireación,  $V_2= 6\text{m}^3$  para la zona anaeróbica y  $V_3= 32\text{m}^3$  para la zona óxica-anóxica.

A continuación, y en base al volumen del bioreactor, se calculan los parámetros de control para comprobar que están dentro del rango de los valores de operación.

#### Tiempo de retención (THR)

$$THR = \frac{V_r}{Q_d}$$

Ecuación 8

$$THR = \frac{50}{110} = 10,9\text{h}$$

#### Carga volumétrica ( $C_v$ )

$$C_v = \frac{X_{DBO_5}}{V_r}$$

Ecuación 9

$$C_v = \frac{24}{50} = 0,48 \text{ KgDBO}_5/\text{m}^3$$

#### Carga másica ( $C_m$ )

$$C_m = \frac{X_{DBO_5}}{X \cdot V_r}$$

Ecuación 10

$$C_m = \frac{24}{8 \cdot 50} = 0,06 \text{ KgDBO}_5/\text{KgSSLM}/\text{día}$$

#### Edad del fango (EF)

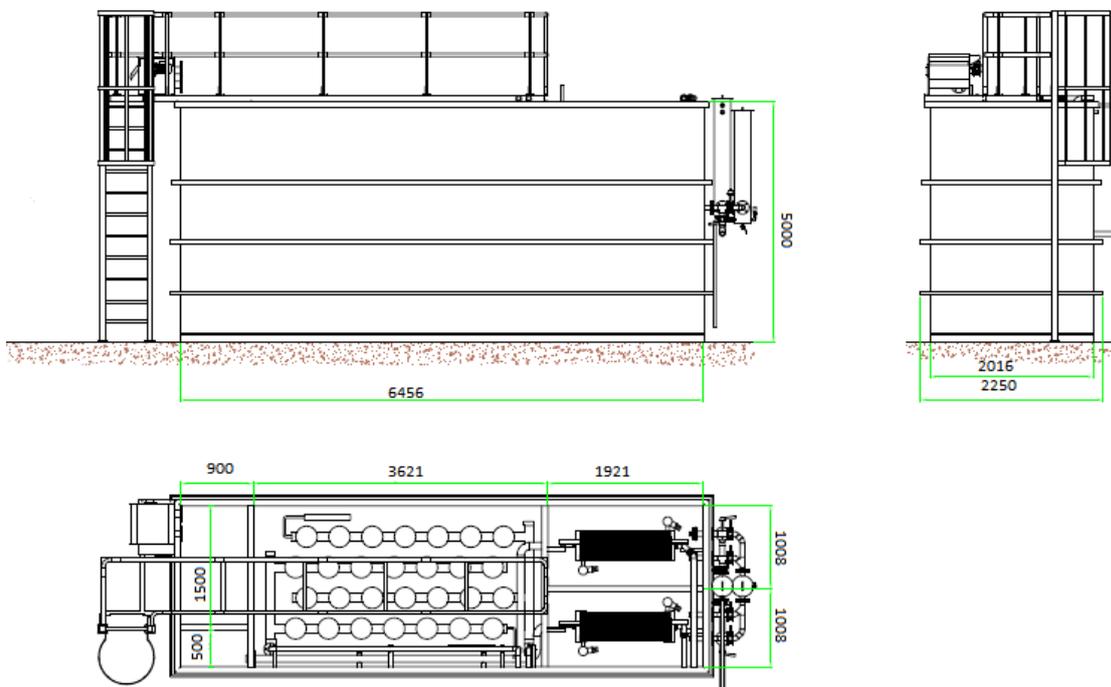
$$EF = \frac{1}{(0,2 \cdot C_m + C_m^{1,445})}$$

Ecuación 11

$$EF = \frac{1}{(0,2 * 0,06 + 0,06^{1,445})} = 34,3 \text{ días}$$

Como se puede observar, los resultados obtenidos están dentro de los parámetros que se indican en la tabla superior (tabla 24), por lo que el reactor está perfectamente dimensionado.

En la figura 19 se pueden observar las dimensiones del biorreactor MBR necesario para la instalación compacta propuesta. La base del equipo tendría una anchura de a=6456mm y b=2250mm, con un altura de h=5000mm



**Figuras 19:** Plano dimensiones MBR

En cuanto a la instrumentación asociada para su correcto funcionamiento, se puede observar en la figura 20. Una vez que el nivel del pozo de bombas llega al punto superior arranca una de las bombas que alimenta al biorreactor MBR con un caudal consignado. Dentro del MBR se realizan una serie de reacciones diferentes para eliminar los contaminantes la materia orgánica, nitrógeno y fósforo. Una vez realizadas las reacciones el agua y fango resultante se envía al tanque de las membranas por medio de las bombas de recirculación y con un caudal consignado. A la salida de las membranas hay una válvula que controla el caudal de salida que se enviará al tanque de agua tratada.

Con el fin de evitar el ensuciamiento de las membranas se dispone de dos soplantes para airear la membrana. Además la instalación dispone de un depósito CIP para realizar la limpieza química cuando sea necesario.

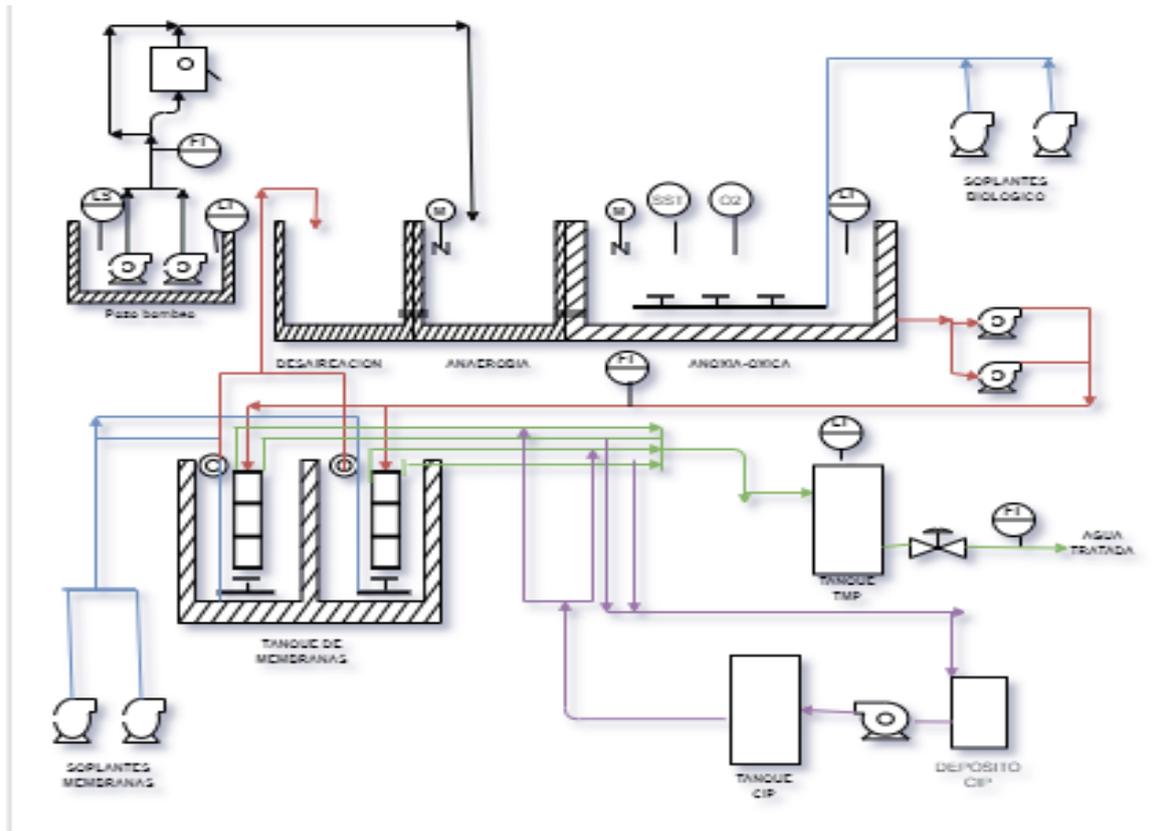


Figura: 20: Diagrama de flujo e instrumentación del biorreactor MBR

### Producción de fangos

A continuación, se calcula la cantidad de fangos producidos y, por lo tanto, la cantidad de fango de purga que hay que extraer del reactor biológico para mantener los parámetros en valores de operación normales (tabla 21).

$$P_x (SSV) = \frac{0,57}{1+0,16 \cdot EF} + 0,14 + 0,2 \cdot \frac{0,6 \cdot SS}{DBO5} \cdot (\%DBO5 \cdot DBO5) \quad \text{Ecuación 12}$$

$$P_x (SSV) = \frac{0,57}{1+0,16 \cdot 34,3} + 0,14 + 0,2 \cdot \frac{0,6 \cdot 32}{24} \cdot (0,977 \cdot 24) = 9,1 \text{ Kg SSV/día}$$

$$P_x (SST) = \frac{0,57}{1+0,16 \cdot EF} + 0,14 + 0,5 \cdot \frac{0,6 \cdot SS}{DBO5} \cdot (\%DBO5 \cdot DBO5) \quad \text{Ecuación 13}$$

$$P_x (SST) = \frac{0,57}{1+0,16 \cdot 34,3} + 0,14 + 0,5 \cdot \frac{0,6 \cdot 32}{24} \cdot (0,977 \cdot 24) = 14,72 \text{ Kg SST/día}$$

Por lo tanto, para calcular la masa a purgar:

$$\text{Masa a purgar} = \text{Incremento biomasa} - \text{SS efluente} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$\text{Masa a purgar} = 14,72 \text{ KgSST/d} - 1,1 \text{ KgSST/día}$$

$$\text{Si } X_{LM} = 8 \text{ Kg/m}^3$$

El volumen de purga es:

$$Q_{\text{purga}} = \frac{13,62}{8} = 1,71 \text{ m}^3/\text{día}$$

Este volumen de purga se llevará a un depósito de fango de  $V = 50 \text{ m}^3$ , por lo que se tendrá una **autonomía de 30 días** de almacenamiento y se descargará en puerto.

### Necesidades de oxígeno

Para el cálculo de la necesidad de oxígeno, y por lo tanto la dimensión de las soplantes, hay que tener en cuenta que se utilizará para eliminar la materia carbonosa y el nitrógeno del agua residual, y para la síntesis y respiración de las bacterias del reactor biológico.

$$O_2 \text{ demandado} = O_2 \text{ materia carbonosa y síntesis} + O_2 \text{ nitrificar} - O_2 \text{ desnitrificar} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$O_2 \text{ mat carbón y sint} = a' * \frac{Q * (S_o - S_e f)}{10^3} + b' * V_r * X_{LM} \quad \text{Ecuación 16}$$

Siendo:

$$a': 0,66$$

$$b': 0,42$$

$$O_2 \text{ mat carbón y sint} = 0,66 * \frac{110 * (218 - 5)}{10^3} + 0,42 * 50 * 8 = 183,46 \text{ KgO}_2/\text{d} = 7,64 \text{ KgO}_2/\text{h}$$

$$O_2 \text{ nitrificar} = \frac{K_n * Q_d * (NTK)}{10^3} \quad \text{Ecuación 17}$$

Siendo:

$$K_n = \text{coeficiente nitrificación } 4,57 \text{ KgO}_2/\text{KgN}$$

$$O_2 \text{ nitrificar} = \frac{4,57 * 110 * 4,8}{10^3} = 2,41 \text{ KgO}_2/\text{d} = 0,1 \text{ KgO}_2/\text{h}$$

$$O_2 \text{ desnitrificar} = N_d * C_2$$

Ecuación 18

Siendo:

$N_d$  : N-N<sub>2</sub> nitrificado cuyo valor es 4,8 Kg/d

$C_2$  : coeficiente desnitrificación cuyo valor es 2,8KgO<sub>2</sub>/Kg N

$$O_2 \text{ desnitrificar} = 4,8 * 2,8 = 13,44 \text{Kg/d} = 0,56 \text{ Kg/h}$$

$$O_2 \text{ demandado} = 7,64 + 0,1 - 0,56 = 7,18 \text{ KgO}_2/\text{h}$$

Referido a la eliminación de materia carbonosa

$$\frac{7,18 \text{KgO}_2}{8 \text{KgDBO}_5} = 0,3 \text{ KgO}_2/\text{KgDBO}_5$$

Esta aportación de oxígeno se tiene que corregir con una constante de transferencia  $K_t$ , cuyo valor es de 0,55. Por lo tanto, la necesidad real de oxígeno será:

$$O_2 \text{ real} = \frac{O_2 \text{ teorico}}{K_t} = \frac{172,32}{0,55} = 313,31 \text{KgO}_2/\text{d} = 13,05 \text{ KgO}_2/\text{h}$$

Si cada m<sup>3</sup> de aire contiene 0,286 Kg O<sub>2</sub>, el caudal total real de O<sub>2</sub> necesario será:

$$Q \text{ real} = \frac{O_2 \text{ real}}{0,286} = \frac{13,05}{0,286} = 45,63 \text{ m}^3/\text{h}$$

### Bombas de recirculación

Para el cálculo del caudal de recirculación se tomará el valor de 400% con respecto al caudal de entrada; por ello, la capacidad de las bombas debe ser:

$$Q = Q_m * 4 = 4,7 \text{ m}^3/\text{h} * 4 = 18,8 \text{m}^3/\text{h}$$

#### 4.2.3.4 Membranas

Se tomarán datos de referencia de la membrana de la marca Alfa Laval modelo MFM 100 (tabla 25) dado que se ajusta a las necesidades de la instalación propuesta

**Tabla 25:** Parámetros de funcionamiento membrana Alfa Laval [33]

	Parámetros fabricante
Marca	Alfa Laval
Tipo	MFM 100
Sup modulo (m <sup>2</sup> )	85
Sup bastidor (m <sup>2</sup> )	154
Flujo (l/m <sup>2</sup> h)	20-25
Q aireación (m <sup>3</sup> /h)	72-84

$$Q_{\text{total}} = S_{\text{filtración}} * \text{Flujo} * 24\text{h}$$

Ecuación 19

Suponiendo que se colocarán 2 bastidores de membranas se tiene que:

$$Q_{\text{total}} = 308 * 20 * 24 = 147840 \text{ l/d} = 147,84 \text{ m}^3/\text{día}$$

### 4.3 Reutilización del agua depurada

Una vez realizado el tratamiento terciario al agua residual y aprovechando las características de salida del agua que se obtiene, se propone destinarla para usos no potables y así se cerrará el ciclo integral del agua. Además, se logrará un importante ahorro de agua generada.

Para realizar este cometido, se dispondrá de un depósito de almacenamiento de agua regenerada de  $V= 50\text{m}^3$ , que podrá suministrar agua regenerada para los siguientes equipos:

- Circuito de refrigeración alta  $T^a$  motores principales y auxiliares(Cilindros, camisas, bloque)
- Circuito de refrigeración baja  $T^a$  motores principales y auxiliares(aire, inyectores, aceite lubricación)
- Caldera generación recuperación gases de escape de los motores
- Depuradora de combustible
- Purificadoras de aceite
- Separadoras de sentinas
- Limpieza de ancla
- Servicios de cubierta (limpieza y baldeo)
- Sala de máquinas
- Dosificación de químicos
- Sistema contra incendios
- Agua de lastre
- Inodoros

A continuación, se detalla la cantidad de agua regenerada que es susceptible de ser reutilizada para otros usos en el crucero:

#### 4.3.1 Consumos de agua en los motores

##### Motor principal

El crucero estará dotado de dos motores principales tipo Wartsila 7L46F [37], los cuales disponen de dos circuitos de agua de refrigeración el de alta temperatura (HT) y el de baja temperatura (LT). El circuito de alta temperatura se encarga de refrigerar los cilindros, camisas y del bloque del motor, mientras que el circuito de baja temperatura refrigera el aire de carga, inyectores y aceite de lubricación del motor. Para el cálculo del contenido de agua de los circuitos de alta y baja temperatura se estimará que el circuito tendrá una longitud de  $L= 100\text{m}$  y un diámetro de tubería  $D_{HT}=194\text{mm}$  y  $D_{LT}= 194\text{mm}$ . El tanque de expansión del circuito se calcula como especifica el fabricante, es decir, considerando un 10% del volumen total del circuito.

La tabla 26 muestra un resumen los valores extraídos de las especificaciones técnicas del fabricante del motor principal.

**Tabla 26:** Parametros calculo motor principal [37]

Parámetro	Unidad	Valor
Cilinder output	KW	1200
Engine speed	rpm	600
Engine output	KW	8400
<b>Exhaust gas system</b>		
Tª after turbo 85% load	ºC	336
<b>HT cooling water system</b>		
Water volume in engine	m <sup>3</sup>	1,3
<b>LT cooling water system</b>		
Water volume in engine	m <sup>3</sup>	0,4

El volumen de agua necesario para el *Circuito de Alta temperatura*, se obtiene:

$$V_{\text{agua HT}} = V_{\text{int motor}} + V_{\text{circuito}} + V_{\text{T Expansión}}$$

$$V_{\text{agua HT}} = 1,3\text{m}^3 + (100\text{m} * (3,14*0,097\text{m}*0,097\text{m})) + 0,425\text{m}^3$$

$$V_{\text{agua HT}} = 4,68\text{m}^3$$

La necesidad de agua se estima en un 10% de pérdidas diarias, por lo tanto la necesidad de agua que hay que aportar al circuito al día es:

$$V_{\text{diaria agua HT}} = 0,468\text{m}^3$$

En el caso del agua necesaria para el *Circuito Baja temperatura*, el volumen se calcula

$$V_{\text{agua LT}} = V_{\text{int motor}} + V_{\text{circuito}} + V_{\text{T Expansión}}$$

$$V_{\text{agua LT}} = 0,4\text{m}^3 + (100\text{m} * (3,14*0,097\text{m}*0,097\text{m})) + 0,425\text{m}^3$$

$$V_{\text{agua HT}} = 3,69\text{m}^3$$

La necesidad de agua se estima en un 10% de pérdidas diarias, por lo tanto la necesidad de agua que hay que aportar al circuito al día es:

$$V_{\text{diaria agua HT}} = 0,369\text{m}^3$$

## Motores auxiliares

El crucero estará dotado de dos motores auxiliares tipo Wartsila 6L32 [38], al igual que el motor principal, éstos tienen dos circuitos de agua de refrigeración el de alta temperatura (HT) y el de baja temperatura (LT). El circuito de alta temperatura se encarga de refrigerar los cilindros, camisas y del bloque del motor, mientras que el circuito de baja temperatura refrigera el aire de carga, inyectores y aceite de lubricación del motor. Para el cálculo del contenido de agua de los circuitos de alta y baja temperatura y se estimará que el circuito tendrá una longitud de  $L = 100\text{m}$  y un diámetro de tubería  $D_{HT} = 125\text{mm}$  y  $D_{LT} = 125\text{mm}$ . El tanque de expansión del circuito se calcula teniendo en cuenta la especificación del fabricante, es decir, 10% del volumen total del circuito.

La tabla 27 muestra un resumen los valores extraídos de las especificaciones técnicas del fabricante del motor principal.

Tabla 27: Parametros calculo motor auxiliar [38]

Parámetro	Unidad	Valor
Cilinder output	KW	660
Engine speed	rpm	720
Engine output	KW	3360
<b>Exhaust gas system</b>		
Tª after turbo 85% load	°C	305
<b>HT cooling water system</b>		
Water volume in engine	m <sup>3</sup>	0,41
<b>LT cooling water system</b>		
Water volume in engine	m <sup>3</sup>	0,12

El volumen de agua para el *Circuito Alta temperatura*, resulta

$$V_{\text{agua HT}} = V_{\text{int motor}} + V_{\text{circuito}} + V_{T \text{ Expansión}}$$

$$V_{\text{agua HT}} = 0,41\text{m}^3 + (100\text{m} * (3,14 * 0,0625\text{m} * 0,0625\text{m})) + 0,16\text{m}^3$$

$$V_{\text{agua HT}} = 1,79\text{m}^3$$

La necesidad de agua se estima en un 10% de pérdidas diarias, por lo tanto la necesidad de agua que hay que aportar al circuito al día es:

$$V_{\text{diaria agua HT}} = 0,179\text{m}^3$$

En el caso del agua necesaria para el *Circuito Baja temperatura*:

$$V_{\text{agua LT}} = V_{\text{int motor}} + V_{\text{circuito}} + V_{T \text{ Expansión}}$$

$$V_{\text{agua LT}} = 0,12\text{m}^3 + (100\text{m} * (3,14 * 0,0625\text{m} * 0,0625\text{m})) + 0,134\text{m}^3$$

$$V_{\text{agua HT}} = 1,36\text{m}^3$$

La necesidad de agua se estima en un 10% de pérdidas diarias, por lo tanto la necesidad de agua que hay que aportar al circuito al día es:

$$V_{\text{diaria agua HT}} = 0,136\text{m}^3$$

#### 4.3.2 Consumos de agua en las calderas

##### Caldera de recuperación de los gases de escape de los motores

Con el fin de aprovechar la temperatura de salida de los gases de escape de los motores se instalan unas calderas de recuperación de gases de escape [39] para generar vapor. Dos calderas de  $m= 3,5\text{Tn}$  de vapor para los motores principales y otras dos de  $m= 1,7\text{Tn}$  para los motores auxiliares. El circuito de vapor tiene una longitud de  $L= 150\text{m}$  y las tuberías un diámetro de  $\varnothing= 125\text{mm}$ . Los valores de cálculo son los de las tablas 26, 27 y 28.

**Tabla 28:** Resumen datos del fabricante de las calderas de recuperación de gases de los motores [39]

Exhaust gas boiler		
Steam capacity	Desing presure	Water content
T/h	Mpa	m <sup>3</sup>
1,7	1	5
3,5	1	15

El volumen de agua para la *Caldera de recuperación del motor principal*, se calcula:

$$V_{\text{circuito vapor}} = V_{\text{caldera}} + V_{\text{circuito}} + V_{\text{tanque expansión}}$$

$$V_{\text{circuito vapor}} = 15\text{m}^3 + (150\text{m} * (3.14 * 0,0625\text{m} * 0,0625\text{m})) + 1,69\text{m}^3$$

$$V_{\text{circuito vapor}} = 18,6\text{m}^3$$

La necesidad de agua se estima en un 10% de pérdidas diarias, por lo tanto la necesidad de agua que hay que aportar al circuito al día es:

$$V_{\text{diaria caldera}} = 1,86\text{m}^3$$

En el caso de la *Caldera de recuperación del motor auxiliar*, el volumen de agua se calcula:

$$V_{\text{circuito vapor}} = V_{\text{caldera}} + V_{\text{circuito}} + V_{\text{tanque expansión}}$$

$$V_{\text{circuito vapor}} = 5\text{m}^3 + (150\text{m} * (3.14 * 0,0625\text{m} * 0,0625\text{m})) + 0,69\text{m}^3$$

$$V_{\text{circuito vapor}} = 7,6\text{m}^3$$

La necesidad de agua se estima en un 10% de pérdidas diarias, por lo tanto la necesidad de agua que hay que aportar al circuito al día es:

$$V_{\text{diaria caldera}} = 0,76\text{m}^3$$

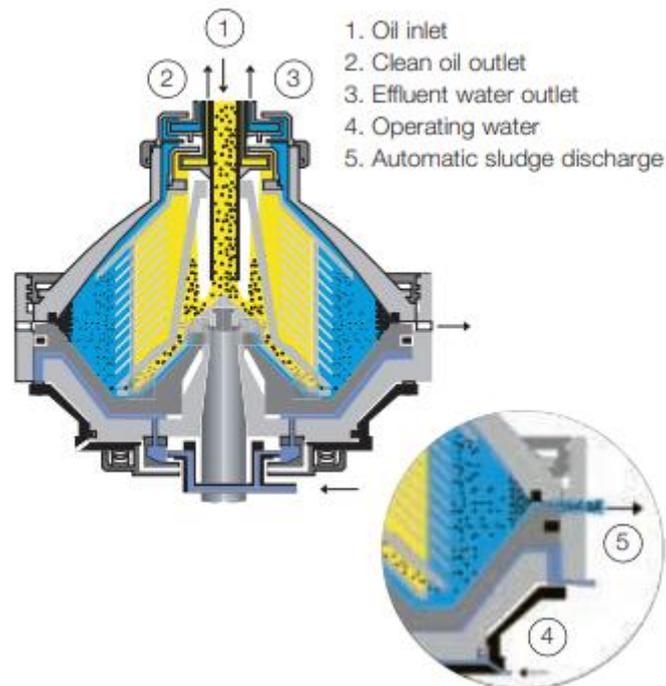
El vapor generado en las distintas calderas se utilizará para los siguientes cometidos:

- Tanques de fuel oil de uso diario de los motores
- Calentadores de combustible
- Tanque de lodos, aceite lubricante
- Calentadores de las separadoras de combustible y aceite
- Sistema generación de agua dulce
- Sistema de agua caliente para la tripulación

#### 4.3.3 Consumos de agua en las separadoras de combustible y aceite

##### Depuradoras fuel oil, diesel y aceite

El combustible y el aceite antes de ser utilizados necesitan un pretratamiento, que básicamente consiste en eliminar los sólidos y el fango de éstos. Para ello, el crucero dispone de las **separadoras** (Figura 21) que son una especie de bombos giratorios que aprovechan la fuerza centrífuga para separar la parte sucia y la limpia.



Figuras 21: Esquema de una separadora con descarga de fango automática [40]

El crucero tendría instaladas unas separadoras o depuradoras de la marca Alfa Laval [40]. Para el FO para el aceite llevaría dos separadoras: una en funcionamiento y otra de repuesto, mientras que para el diésel solamente una.

**Tabla 29:** Características de las separadoras Alfa Laval [40]

Unit type	FOCUS 12	FOCUS 18	FOCUS 25	FOCUS 40	FOCUS 50
Main supply voltage	3-phase 400/ 440 / 480 V ± 10 %				
Control voltage	24 V DC / 230 V AC				
Frequency	50 or 60 Hz ± 5 %				
Water supply pressure	200 to 600 kPa				
Oil inlet pressure	Flooded suction				
Oil outlet pressure, max.	350 kPa	250 kPa	350 kPa	400 kPa	400 kPa
Instrument air pressure	500 kPa to 750 kPa				
Sludge outlet pressure, max.	300 kPa at 500 kPa air pressure				
Enclosure class, min.	IP 54				
Electric power consumption	14.0 KW	15.4 KW	19.5 KW	28.0 KW	28.5 KW
Water consumption (per discharge)	24 litres	40 litres	40 litres	40 litres	40 litres
Air consumption (per discharge)	Approximately 1 Nm <sup>3</sup> , max. flow 150 Nl/min.				

Se instalaría el modelo FOCUS 50 que funciona 24h al día y tiene un consumo de V=40l de agua por cada descarga, y esta se realiza cada hora, por tanto:

$$V_{\text{separadora}} = 40\text{l/descarga} * 24\text{descarga/día} = 960\text{l/día} = 0,96\text{m}^3/\text{día}$$

#### 4.3.4 Consumos de agua en aseos

##### Inodoros

El agua utilizada en los inodoros también es agua reutilizada y además hay instalados inodoros de vacío [41] que consumen V= 1,2l por descarga.

$$V_{\text{agua inodoros}} = 1,2 \text{ l/descarga} * 6 \text{ descarga/día} * 200 \text{ inodoros} = 1440 \text{ l/día} = 1,44\text{m}^3/\text{día}$$

#### 4.3.5 Resumen de los consumos del agua reutilizada

En resumen, aparte de los consumos variables como pueden ser los de limpieza y baldeo, limpieza del ancla, o l sala de máquinas, la tabla 30

se pueden ver los principales consumos del agua reutilizada. Se observa que el mayor volumen de agua se destinará a la generación de vapor en la caldera que aprovecha los gases de escape de los motores principales. Por el contrario, el menor consumo se destina a la refrigeración de los motores auxiliares.

**Tabla 30:** Resumen de los consumos de agua regenerada

Equipo	Unidades	Volumen utilizado (m <sup>3</sup> )
<b>Motor principal</b>	2	1,67
<b>Motor auxiliar</b>	2	0,63
<b>Caldera gases MP</b>	2	3,72
<b>Caldera gases MAux</b>	2	1,52
<b>Separadoras</b>	3	2,88
<b>Inodoros</b>		1,44
<b>TOTAL</b>		11,86

## 5 Conclusiones

En el presente trabajo se ponen de manifiesto los **grandes volúmenes de agua** que se utilizan tanto para el funcionamiento como para el ocio del pasaje en los cruceros. Concretamente, para el crucero a estudio de 400 pasajeros y dos motores principales, el volumen total de agua generada es  $V_T = 130 \text{ Tn/día}$ .

En consecuencia, está totalmente justificada la implantación de un sistema compacto y autónomo para el abastecimiento y la depuración de agua en el crucero.

En cuanto a la **tecnología de desalación de agua** de mar, se ha propuesto la instalación de **equipos multifecto**. Aunque el consumo de combustible de dicha tecnología es elevado, se propone el aprovechamiento de la energía proveniente del circuito de agua de refrigeración de los motores. Además la operación y el mantenimiento de dicha instalación es bajo y produce un agua de excelente calidad.

Las exigencias de vertido de las aguas residuales al mar tienden a ser cada vez más exigentes y restrictivas para preservar el medioambiente. Por lo que se debe disponer de un tratamiento de aguas residuales con un mayor rendimiento.

El sistema para el tratamiento de aguas residuales propuesto se basa en un **biorreactor MBR** que consigue reducir la contaminación del agua en materia orgánica, nitratos y fosfatos por debajo de la normativa actual aplicable. Además, se trata de un sistema de gran versatilidad en cuanto a su capacidad para adaptarse a diferentes cambios de carga que se pueden producir.

La calidad del agua obtenida tras el tratamiento del agua residual permite la implantación de un **sistema de reutilización** del agua para operaciones tan importantes como: la refrigeración de los motores principales y auxiliares, la obtención de vapor auxiliar, el pretratamiento de combustible y el aceite en los separadores y su uso en los inodoros del crucero.

Por tanto, con la reutilización del agua depurada se consigue valorizar el consumo de aguas, es decir, darle un uso posterior antes de ser devuelta al mar en perfectas condiciones. Todo esto redundará en una menor generación de agua con el consiguiente ahorro de recursos y costes económicos. Además, se desmitifica al sector de cruceros, que a día de hoy está considerado un gran generador de contaminación ambiental.

## Bibliografía

- [1]: O.M.S “Directrices para la calidad del agua potable” 1993.  
“Calidad del agua para el consumo humano” Directivo 98/83/EC, 1998.
- [2]: <https://www.scheepvaartwest.be/CMS/> ,visitada 01/04/2020
- [3]: <https://www.solocruceros.com/blog/historia-de-los-cruceros/> Visitada 30/04/2020
- [4]: <https://cruisemarketwatch.com/growth/> , Visitada 01/05/2020.
- [5]: Rodriguez, J. P. y Nottebbon, T. “Trends and strategies in cruise industry: Main áreas of tourism in the world”,(2013)
- [6]: O.M.S “Guías para la calidad del agua de consumo humano: cuarta edición que incorpora la primera adenda”, 2018.
- [7]: O.M.S “Manual para la inspección de buques y emisión de certificados de sanidad a bordo”, 2012.
- [8]: O.I.T “Convenio relativo al alojamiento de la tripulación a bordo (disposiciones complementarias)”. Ginebra, 55\ reunión CIT, 30 octubre 1970.
- [9]: O.M.S. “Manual para la inspección de buques y emisión de certificados de sanidad a bordo”, 2012.
- [10]: OMI “MARPOL 73/78”, edición refundida 2002.
- [11]: OMI “Resolución MEPC.227 (64)”, 2012.
- [12]: State of Florida department of health chapter 64E-6 “Administrative code standards for onsite sewage treatmentand disposal systems”, 2018.
- [13]: [http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda/pdfs/Capitulo\\_13.pdf](http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda/pdfs/Capitulo_13.pdf) , visitada 15/02/2020
- [14]: California State Water Resources Control Board,Office of wáter recycling. Bulletin, Nº 78-3, july 1978.
- [15]: U.S. Agency for International Developmen “Guidelines for wáter reuse 2012”. EPA/600/R-12/618 ,2012.
- [16]: O.M.S.“Guidelines for the safe use of wastewater, excdreta and greywater” Vol IV, 2006.
- [17]: “Régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas”. BOE RD1620/2007, 7 de diciembre de2007.

[18]: LATTEMANN, S. y HOEPNER, T. Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. Science Direct Publications. Vol. 220,, pp. 1-15, 2007.

[19]:

<https://www.facebook.com/marina.mercante2/photos/pcb.286075628210687/286069131544670/?type=3&theater> visitada 17/04/2020

[20]: <https://www.e-zigurat.com/blog/es/lograr-ahorro-energetico-grupos-presion/> visitada 15/04/2020

[21]: <https://www.alfalaval.es/productos-y-soluciones/soluciones-de-proceso/soluciones-para-agua-dulce/bucle-de-agua-caliente-basado-en-placas/hwl-bucle-de-agua-caliente/> visitada 17/04/2020

[22]: (ISO 15748-2:2002) Tabla A1. “Embarcaciones y tecnología marina. Suministro de agua potable en buques y estructuras marinas”. Parte 2: Método de cálculo.

[23]: (ISO 15748-2:2002) Tabla A12. “Embarcaciones y tecnología marina. Suministro de agua potable en buques y estructuras marinas”. Parte 2: Método de cálculo.

[24]: (ISO 15748-2:2002) Gráfica A3. “Embarcaciones y tecnología marina. Suministro de agua potable en buques y estructuras marinas”. Parte 2: Método de cálculo.

[25]: (UNE-149202: 2013) Anexo E. “Abastecimiento de agua. Instalaciones de agua para el consumo humano en el interior de los edificios. Equipos de presión”.

[26]: (UNE-149202: 2013) Tabla 1. “Abastecimiento de agua. Instalaciones de agua para el consumo humano en el interior de los edificios. Equipos de presión”.

[27]: (ISO 15748-2:2002) Tabla A6. “Embarcaciones y tecnología marina. Suministro de agua potable en buques y estructuras marinas”. Parte 2: Método de cálculo.

[28]: OMI “Resolución MEPC.227 (64)”, 2012.

[29]: Llorens Pascual del Riquelme, M. “Alternativas para el tratamiento de los efluentes industriales” Cátedra del agua y Sostenibilidad Universidad de Murcia, 2016.

[30]: Ramalho, R.S: “Tratamiento de aguas residuales”, editorial Reverte S.A. 1996

[31]: <http://www.filtramas.com/catalogo/varios/pretratamiento-compacto-pc/> visitada 30/04/2020

[32]: “Estaciones de Depuración de Aguas Residuales: Funcionamiento y explotación”, curso online impartido por FACSA, marzo 2020.

[33]: Iglesias,R. et al. “Guía técnica para la implantación de biorreactores de membrana” CEDEX 1ª edición, 2014.

[34]: <http://www.ifatcc.org/wp-content/uploads/2017/12/C57.-MARTI-CRESPI.pdf> visitada 08/05/2020.

[35]: <https://www.monografias.com/trabajos99/tratamiento-aguas-residuales/tratamiento-aguas-residuales.shtml> visitada 08/05/2020. Visitada 10/05/2020

[36]: Norma ATV-A131, "Dimensionamiento de plantas de fangos activos de una etapa", año 2000.

[37]:

[https://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/engines/ms-engine/product-guide-o-e-w46f.pdf?utm\\_source=engines&utm\\_medium=dieselengines&utm\\_term=w46f&utm\\_content=productguide&utm\\_campaign=msleadscoring](https://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/engines/ms-engine/product-guide-o-e-w46f.pdf?utm_source=engines&utm_medium=dieselengines&utm_term=w46f&utm_content=productguide&utm_campaign=msleadscoring) visitada 04/09/2020

[38]:

[https://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/engines/ms-engine/product-guide-o-e-w32.pdf?utm\\_source=engines&utm\\_medium=dieselengines&utm\\_term=w32&utm\\_content=productguide&utm\\_campaign=msleadscoring](https://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/engines/ms-engine/product-guide-o-e-w32.pdf?utm_source=engines&utm_medium=dieselengines&utm_term=w32&utm_content=productguide&utm_campaign=msleadscoring) visitada 04/09/2020

[39]:

[https://www2.saacke.com/fileadmin/Media/Documents/pdfs/EN/Technical\\_Data\\_SAACKE\\_Marine\\_Systems/Boiler/0-0750-0067a-02-WEB.pdf](https://www2.saacke.com/fileadmin/Media/Documents/pdfs/EN/Technical_Data_SAACKE_Marine_Systems/Boiler/0-0750-0067a-02-WEB.pdf) visitada 04/09/2020

[40]:

<https://www.alfalaval.es/productos-y-soluciones/separacion/separadoras-centrifugas/separadoras/focus/> visitada 04/09/2020

[41]:

<https://www.dometic.com/es-es/es/productos/higiene-y-soluciones-sanitarias/soluciones-sanitarias/inodoros-para-n%C3%A1utica/dometic-masterflush-mf-7120--25598> visitada 05/09/2020

[42]: <https://pdf.nauticexpo.com/pdf/alfa-laval-mid-europe/desalt-dpu-2-36-c-series/30729-109701-4.html> visitada 06/09/2020

[43]: <https://www.itur.es/CE-PRODOMO.pdf>