

Conservación del medio marino a través de tecnologías que eliminan la contaminación microbiológica en el agua de lastre

J. Jaime Sadhwani Alonso, B. Del Río-Gamero, César Méndez Montes

Departamento de Ingeniería de Procesos. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Campus de Tafira Baja, 35017, Las Palmas de Gran Canaria, España.

Resumen

Dentro de los principales aspectos acordes con la higiene en buques, la gestión del agua a bordo y el cumplimiento de la normativa referente a las calidades de aguas se posicionan como prioridad vital. Como norma general, la mayor preocupación siempre se ha encontrado en el circuito de agua potable, cuyo rango de volumen se encuentra alrededor de 32 litros (consumo) y 88 litros (lavado) por tripulante y día [1]; la cual, ha de ser absolutamente independiente del resto de las canalizaciones del buque, especialmente de los circuitos de aguas residuales. No obstante, este trabajo se centra en el recurso hídrico que un barco precisa para adquirir la estabilidad de navegación. Volúmenes de agua que alcanzan desde centenares de litros hasta 100.000 toneladas [2-3], en función del tamaño de barco; y que desde hace siglos provoca efectos adversos que favorecen la homogenización biológica de mares y océanos, las denominadas aguas de lastre. Alrededor de 10.000 especies marinas viajan diariamente por el mundo a través de este proceso, acompañadas de piedras, sedimentos y fango. Organismos grandes y pequeños (desde bacterias hasta peces) se han documentado en las muestras del agua de lastre de los barcos, confirmando la incorporación de uno o varios miembros de especies exóticas y/o invasoras en un ecosistema acuático distinto al de su hábitat nativa. En la actualidad, factores determinantes como la velocidad de las naves modernas y el volumen de agua de lastre, abruma el éxito de las invasiones e incentivan la destrucción del ecosistema. Para evitar los efectos potencialmente devastadores de la propagación de organismos acuáticos dentro de los 3 y 5 billones de toneladas de aguas de lastre que anualmente son transferidas en el planeta [4], y tras las directrices del “*International Convention for the Control and Management of Ships’ Ballast Water and Sediments (BWM Convention)*”, adoptado por la Organización Marítima Internacional en el año 2004, se establecieron una serie de cambios normativos por parte de varias entidades, tanto nacionales, como internacionales. Los operadores del sector marítimo, que desde entonces han centrado la atención en el proceso de homologación del continente americano, muestran su preocupación por la implantación del “*BWM Convention*” debido a las diferencias existentes entre lo que se exige en el país norteamericano y los distintos organismos internacionales. Todo lo anteriormente mencionado justifica la necesidad de avanzar en el conocimiento para la lucha contra este problema, tanto por su complejidad, como por otras razones, ya sean medioambientales (lugar de vertido, zonas afectadas, residuos generados), políticas, y/o tecno-económicas (tratamientos específicos, superficies requeridas, costes). El objetivo principal de este trabajo pretende aportar una revisión de la actual normativa y adecuación de la misma, profundizando en el estado del arte de tecnologías aplicadas, para analizar hasta ahora la frontera del conocimiento y plantear nuevas estrategias que minimicen el impacto ambiental generado por estas aguas de lastre, atendiendo a la arbitrariedad de las calidades de aguas captadas y otras consideraciones, con la intención de conservar el medio marino y promover una navegación más sostenible.

Palabras clave

Aguas de lastre; buques; medio marino; tecnologías de tratamiento; contaminación oceánica.

1. Introducción

1.1 Origen del problema

Las aguas de lastre se componen del agua de mar acompañada de limos, sedimentos, y de millares de especies vivas. Alrededor de 10.000 especies marinas viajan diariamente por del mundo a través de este proceso [5]. Organismos grandes y pequeños, desde bacterias hasta peces se han documentado en las muestras del agua de lastre de los barcos. Estas especies son exóticas [6], extranjeras o invasoras [7], las cuales suelen provenir de áreas marítimas cercanas en su mayoría; Lo cual, significa que un miembro, o miembros de un grupo o de una población de una especie se incorpora en un ecosistema acuático fuera de su habitat nativa.

Las especies invasoras exóticas son consideradas la mayor amenaza para la diversidad biológica después de la destrucción del hábitat [8]. Anualmente se transfieren millones de toneladas de aguas de lastre de un lado a otro del planeta, con la consiguiente amenaza de contaminación biológica y con impactos negativos en el medio ambiente, las economías y la salud pública [9].

Por todo lo anteriormente mencionado, se puede confirmar que los océanos del mundo comenzaron biológicamente a ser homogeneizados hace siglos. La actividad humana ha intervenido en el proceso de dispersión de especies durante toda la historia de la navegación marítima, principalmente a través de la dispersión de especies adheridas al casco de los buques [10]. En las décadas pasadas se puede decir que hubo un movimiento aparentemente acertado de centenares de especies; pero hoy en día los dos factores determinantes que abruman el éxito de las invasiones son la velocidad de las naves modernas y el volumen de agua de lastre (pues realizan viajes de mayores distancias en menos tiempo). Para una mayor comprensión se adjunta una figura (1a) que representa el ciclo general de las aguas de lastre y las rutas marítimas mayormente empleadas (1b).

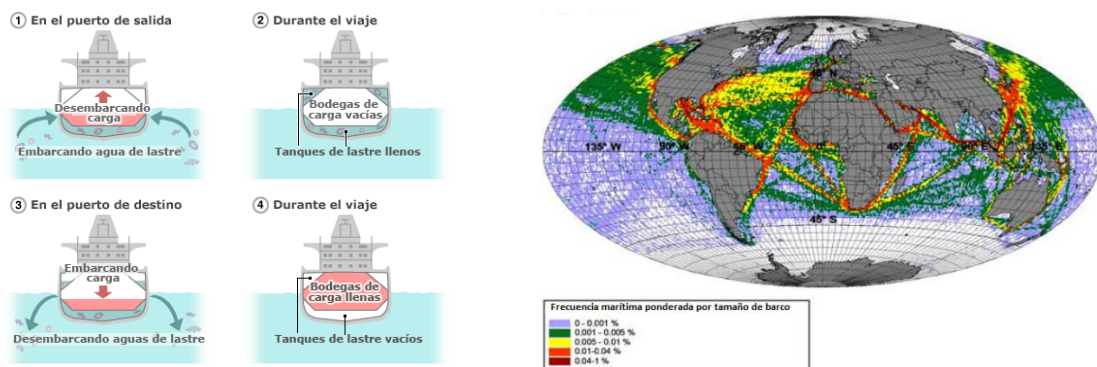


Fig 1a: Ciclo general de las aguas de lastre (Fuente: [10])

Fig 1b: Rutas marítimas a escala global (Fuente: Adaptado de [8])

1.2 Legislación

La Organización Marítima Internacional (OMI), es el primer organismo internacional dedicado exclusivamente a cuestiones marítimas. Los objetivos generales de la OMI se recogen en el lema “Una navegación segura, protegida y eficiente en mares limpios”.

En un primer momento, la Organización Marítima Internacional confirma que el método recomendado para controlar la introducción de especies no indígenas en el proceso de intercambio de agua de lastre, es realizar el mismo en mar abierto (2003). El problema surge cuando se comprueba que este intercambio oceánico abierto no siempre es biológicamente efectivo y en ocasiones no se puede realizar debido a la seguridad del buque y/o a la existencia de problemas operativos. Estas consideraciones indican que una parte del agua de lastre tendrá que ser tratada por otros métodos. Para determinar el enfoque y las directrices de las estrategias necesarias en la mitigación y control de este tipo de aguas, nuevamente se plantean desafíos que las próximas normativas deben de tener en cuenta [8].

A raíz de lo anteriormente comentado, la OMI adoptó el 13 de febrero de 2004 el Convenio Internacional para el Control y la Gestión del Agua de Lastre y los sedimentos de los buques “*Ballast Water Management Convention, BWM Convention*”, el cual, tiene una fecha de entrada en vigor del día 8 de septiembre del 2017. En dicho convenio se instauró que todos los buques en tráfico internacional están obligados a gestionar sus aguas de lastre de conformidad con un plan de gestión de lastre de las embarcaciones, habiendo una persona encargada de este procedimiento en todo momento. A su vez, deberán llevar un libro de registro de agua de lastre y un certificado internacional que corrobore su gestión. Estas actuaciones, expuestas a lo largo de 22 artículos y un anexo de cinco secciones, se han introducido gradualmente durante un período de tiempo con ayuda de una serie de directrices elaboradas para facilitar el procedimiento a seguir. Asimismo, cabe hacer mención a ciertas normativas, como la A868(20) “Guidelines for control and management of ship’s ballast water to minimize the transfer of harmful aquatic organism and pathogens” [11], o las directrices de la organización marítima mundial (a través del *Marine Environment Protection Comité*, MEPC), las cuales nacen con un claro efecto orientativo hacia el conjunto de países participantes al Convenio respecto a cualquier materia que, aun habiéndose regulado a través de éste, tanto a juicio de una parte como de la misma Organización Internacional, puede resultar modificable o alterable mediante una guía orientativa [12].

Dentro del artículo que trata las obligaciones generales del convenio (Art 2), se otorga el derecho de tomar, individual o conjuntamente, medidas más estrictas con respecto a la prevención, reducción o eliminación de la transferencia de organismos acuáticos y patógenos dañinos de los buques con el derecho internacional, siempre y cuando están sujetas a los criterios establecidos en el Convenio y a las directrices de la OMI [13]. En este aspecto, y en lo que respecta a España (país perteneciente a la convención), la temática a estudio se regula a partir de la Ley 41/2010 del 29 de Diciembre sobre Protección del Medio Marino, en la que se recoge la implicación que se ha de tener sobre el medio marino como patrimonio a proteger y conservar; y el Real Decreto 630/2013 que conforma el catálogo español de especies tóxicas invasoras estableciendo como tales a las especies que se introducen o se establecen en un ecosistema o hábitat natural suponiendo un agente de cambio y amenaza para la diversidad nativa.

Para poder realizar un análisis global de la problemática, los siguientes apartados rigen su contenido en función de la normativa estipulada en el convenio de la OMI.

2. Aplicaciones tecnológicas en el tratamiento de las aguas de lastre

Antes de decidir cuál será el mejor procedimiento para el tratamiento de este tipo de aguas, se debe de estudiar el mecanismo empleado en el intercambio de agua de lastre en el mar que comúnmente se designa en dos grupos; el de bombeo único y el de bombeo continuado. Cada uno presenta distintas medidas de control de la seguridad en referencia a los esfuerzos de torsión, los momentos flectores del casco, nivel de presión de los tanques, resistencia de materiales, etc.; Factores a tener en cuenta en la elección de la tecnología de tratamiento de aguas de lastre a emplear. Se adjunta tabla en la que se esquematizan estos procesos.

MÉTODOS		
Bombeo único	SECUENCIAL	Cada tanque de agua de lastre se vacía y se vuelve a llenar con un lastre reemplazado que supere el 95% de volumen.
Bombeo continuo	FLUJO CONTINUO	Bombeo del agua de lastre de reemplazo permitiendo que el agua fluya o rebose.
	DILUCIÓN	Intercambio dentro del tanque del agua de lastre mediante su parte superior descargando simultáneamente el volumen de agua que se carga por la parte inferior.

Tabla 1. Formas de cambio de agua de lastre (Fuente: adaptado de [12]).

Asimismo, y de conformidad con lo dispuesto en la regla B-4, propia de la sección B del anexo del convenio de la OMI, el cambio del agua de lastre, debería ajustarse a las siguientes prescripciones:

- Siempre que sea posible, efectuar el cambio del agua de lastre a por lo menos 200 millas marinas de la tierra más próxima y en aguas de 200 metros de profundidad como mínimo.
- En los casos en que el buque no pueda efectuar el cambio del agua de lastre de conformidad con lo dispuesto anteriormente, tal cambio debería llevarse a cabo tan lejos como sea posible (teniendo un mínimo de 50 millas marinas de la tierra más próxima y en aguas de 200 metros de profundidad).
- Cuando no sea posible cumplir estas prescripciones, se podrán designar zonas en las que se permita al buque efectuar el cambio del agua de lastre.

Independientemente de las situaciones comentadas que se puedan presentar, al tomar o descargar agua de lastre se debe tomar nota, como mínimo, de las fechas, la ubicación geográfica, la temperatura y salinidad del agua de lastre, así como de la cantidad embarcada o desembarcada. Las autoridades marítimas portuarias están en la obligación

de informar al buque, situaciones en las que convendrá reducir al mínimo la toma del agua de lastre [14].

Por otro lado, también se debe de tener en cuenta las diferentes disposiciones del proceso de tratamiento, pues esta instalación se puede encontrar dentro o fuera del buque. El principal problema del caso en el que el proceso de tratamiento se encuentre fuera del buque, es decir, en el puerto de destino, es el enorme tráfico marítimo que surca hoy en día los mares; lo cual acarrea una inevitable acumulación de largos turnos de espera que se traducen en grandes pérdidas económicas. Además, con este tipo de tratamiento y siguiendo las estipulaciones previstas en el artículo 5 del convenio de la OMI, los puertos y terminales se deben de comprometer a garantizar la existencia de instalaciones adecuadas para la recepción de sedimentos. La otra opción (más viable) es un tratamiento individualizado a bordo de cada buque, ya sea durante el trayecto o al llegar a puerto.

Pese a existir diferentes tratamientos convencionales mecánicos o físicos, a día de hoy son los tratamientos químicos los que están cogiendo mayor proyección industrial conllevando en la mayoría de los casos el uso de sustancias activas como aditivos para la gestión a bordo del buque. El principal problema de estos es que además de suponer un método efectivo resulta también un proceso potencialmente peligroso para el medio, pues en la mayoría de los casos se generan subproductos tóxicos y nocivos para cualquier tipo de hábitat.

Para evitar el posible efecto nocivo provocado por una mala manipulación en la gestión y tratamiento de agua, así como para asegurar la eficacia del sistema implantado, el convenio estipula la normativa D-2 (dentro de la sección D del anexo), en la cual se concreta que los buques descargarán el agua de lastre con menos de 10 organismos viables por metro cúbico cuyo tamaño mínimo sea igual o superior a 50 micras y menos de 10 organismos viables por mililitro cuyo tamaño mínimo sea inferior a 50 micras y superior a 10 micras; Además la descarga de los microbios indicadores no excederá de las concentraciones especificadas.

Los microbios indicadores, a efectos de la salud de los seres humanos, comprenderán, entre otros, los siguientes:

- a. *Vibrio cholerae* toxicógeno: menos de 1 unidad formadora de colonias (ufc) por 100 mililitros o menos de 1 ufc por gramo (peso húmedo) de muestras de zooplancton.
- b. *Escherichia coli*: menos de 250 ufc por 100 mililitros;
- c. Enterococos intestinales: menos de 100 ufc por 100 mililitros.

Conociendo la eficacia necesaria del sistema, se desarrollan sistemas de gestión del agua de lastre, métodos de tratamiento y tecnologías. En un primer momento, se adjunta un diagrama (véase figura 2) en el que se clasifican las tecnologías en función de su ubicación, y de la naturaleza del proceso que lo conforma, siendo todas ellas avaladas por el convenio para la posible ratificación del mismo.

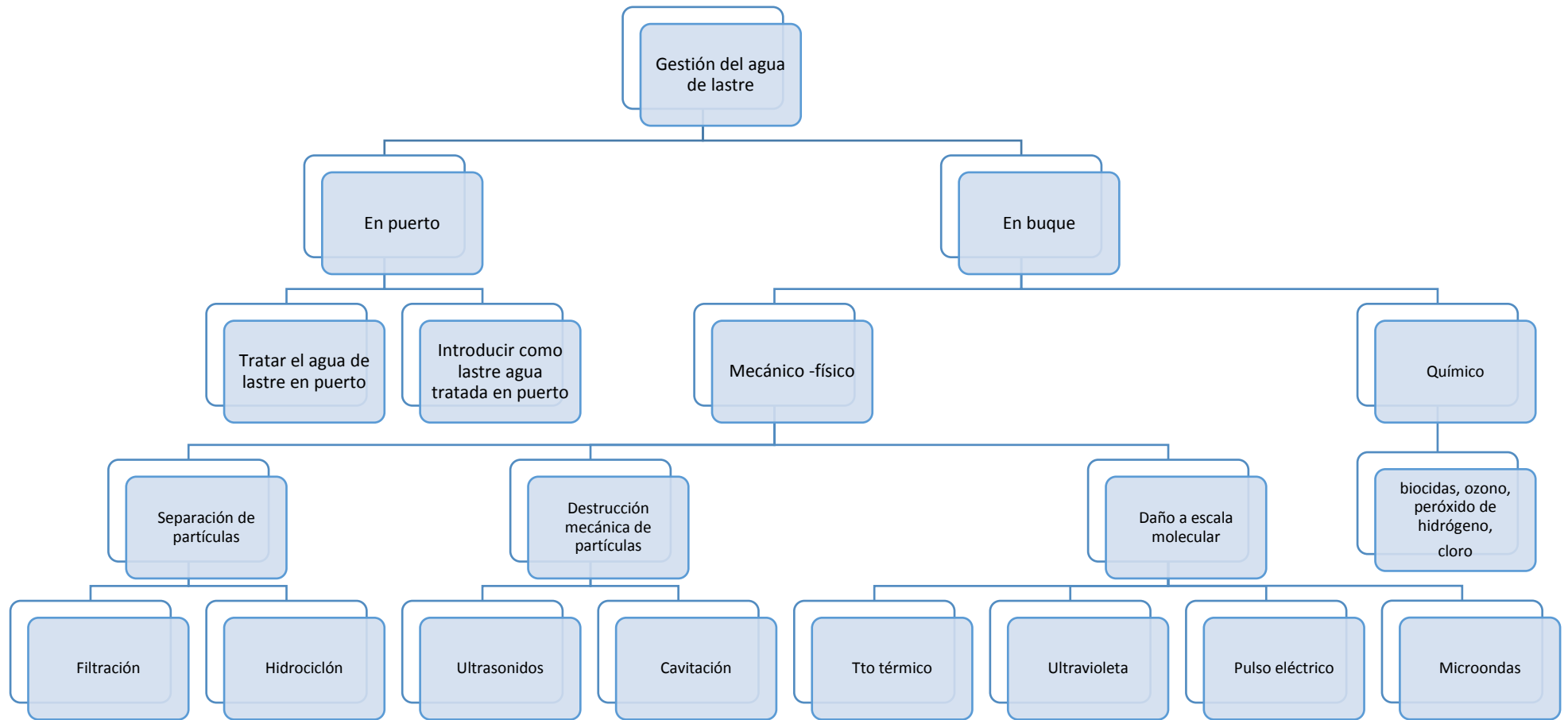


Figura 2. Clasificación de las aplicaciones tecnológicas en el tratamiento de aguas de lastre (Fuente: adaptado de [4 y 9])

Todas estas tecnologías de tratamiento deben de ser sistemas integrados en el equipo de tratamiento del agua de lastre (según la norma D-4) que participen en un programa de prueba o evaluación y que tengan posibilidades de cumplir la regla D-2 (incluyendo su equipo de tratamiento, control y vigilancia y sus instalaciones de muestreo) pudiendo para ello ser un proceso tanto físico, químico, mecánico o biológico (expuestos en la figura anterior); Todo ello se encuentra implícito en la sección D de los anexos del convenio de la OMI.

No obstante, y finalizando esta evaluación de las posibles tecnologías de tratamiento a implantar; se puede confirmar que, aunque el artículo 6 del convenio anima y fomenta la labor de investigación científica y técnica sobre la gestión del agua de lastre (para vigilar los efectos provocados en el proceso), no existe un protocolo claro y exhaustivo que identifique parámetros y/o estime rangos de calidad de agua vertida atendiendo a factores como son la temperatura, el pH, la demanda química y biológica de oxígeno, los sólidos totales disueltos, la conductividad, etc. En este documento se pretende resaltar la importancia de las variables anteriormente mencionadas en el vertido, el cual, al ser directo y localizado, también pueden afectar a las especies marinas que se encuentran en la ubicación receptora de este vertido, incrementando el efecto dañino que propician las especies invasoras.

A modo de ejemplo, se adjuntan dos figura que identifican el diferencial de concentración salina y de temperatura en la superficie del mar expresando en unidades prácticas de salinidad y grados centígrados respectivamente (las áreas sombreadas en color gris y negro representan la tierra).

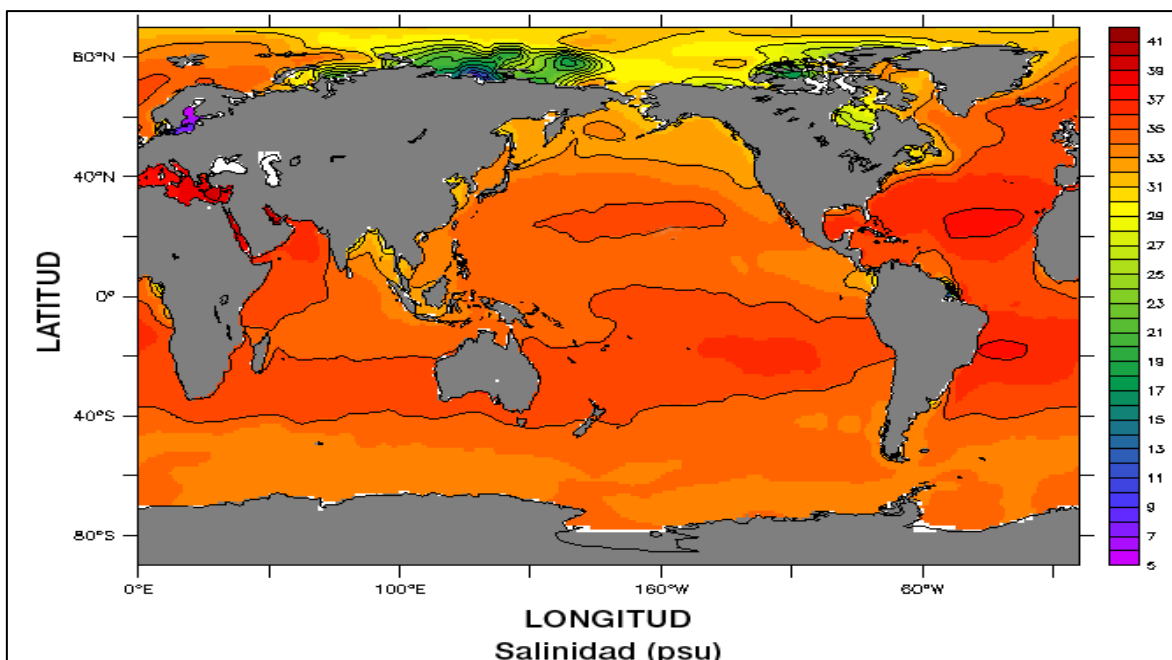


Figura 3. Salinidad media en la superficie del mar [UPS]. (Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration)

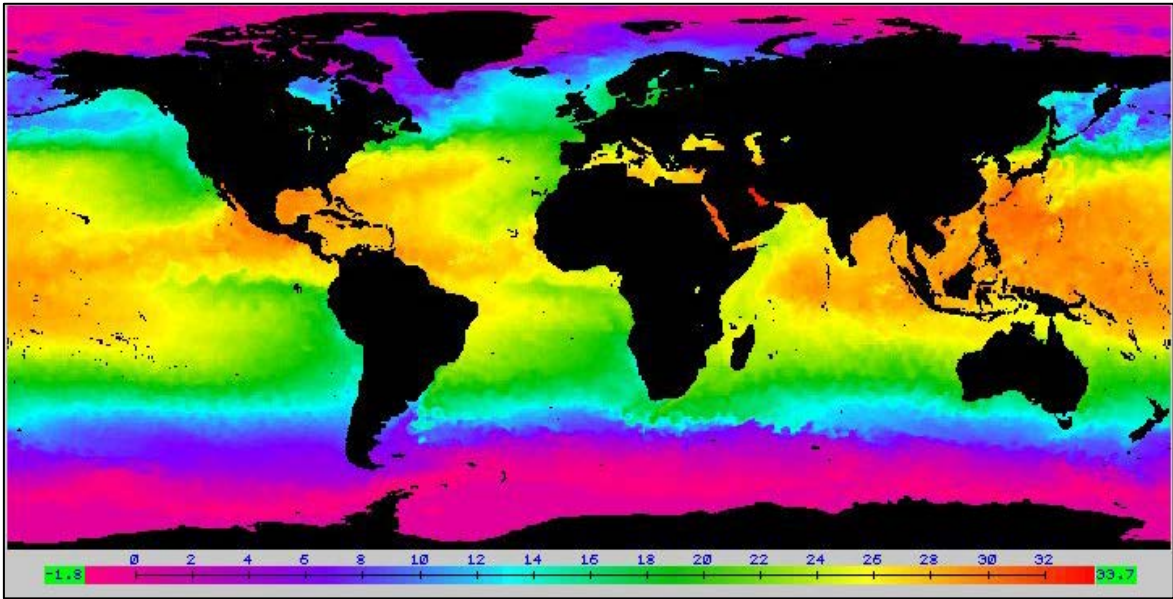


Figura 4. Temperatura del agua en la superficie [°C]. (Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration)

Como conclusión a la reflexión propuesta en lo referente a la variabilidad de los parámetros físicos y químicos en las aguas, se puede observar que el diferencial de temperatura y de salinidad que se obtiene en un buque que recoge su agua de lastre próximo a un puerto del Norte de Rusia (Océano Ártico), y la descarga en aguas españolas (Océano Atlántico Norte) adopta valores de entre un 87% y 36% respectivamente, afectando tanto uno como otro al entorno y a la vida acuática.

Varios subcomités propios de la Organización Marítima Internacional, como es el caso del Comité de Protección del Medio Marino (en el que se encuentran representantes de nuestro país), han informado acerca de la importancia de detallar las analíticas necesarias, pero aún no han sido estipuladas. Asimismo, y en las normativas actuales (como puede ser la Ley española 41/2010 del 29 de Diciembre sobre Protección del Medio Marino), únicamente se aconseja ciertos estudios, pero no se formaliza como requisito o exigencia. En lo que respecta a la aplicación de la normativa, la sociedad de clasificación ABS (American Bureau of Shipping), la cual opera por medio de tres divisiones localizadas en Houston (ABS Americas), Londres (ABS Europe) y Singapur (ABS Pacific), lanza una guía con los principales objetivos que deben de cumplir sus buques, para que estos sean certificados y estén de acuerdo con lo establecido en el convenio, llevando un control de la regulación de los buques a través de sus más de 150 oficinas en 70 países [15]. A modo de ejemplo de aplicación de la normativa, en la tabla 2 se esquematiza la adaptación de las reglas D-1 y D-2 en los buques, según su capacidad de lastre y su año de fabricación.

Capacidad de agua de lastre (m ³)	Fecha de construcción	Año									
		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
<1500	<2009	D1 ó D2									D2
	En 2009	D1; D2 (con excepciones, D1 no más allá del 31 Diciembre)									
	>2009	D2									
≥1500 ó ≤5000	<2009	D1 ó D2							D2		
	En 2009	D1; D2 (con excepciones, D1 no más allá del 31 Diciembre)									
	>2009	D2									
>5000	<2012	D1 ó D2									D2
	≥2012	N/D			D2						

Tabla 1. Aplicación de la regla D-1 y D-2 según capacidad de lastre y año de fabricación (Fuente: adaptado de [15]).

El reacondicionamiento típico instala un sistema de tratamiento de aguas de lastre en el sistema existente de agua de lastre. Dependiendo del sistema en uso, se requiere un tratamiento específico; pero independientemente del sistema seleccionado, éste ha de ser validado por la Administración pasando por el reconocimiento inicial y la consecuente renovación anual (expuestas en las prescripciones de la sección E del anexo del convenio).

Además, los buques deberán ser objeto de reconocimiento y certificación (art 7 del Convenio) y podrán ser inspeccionados por funcionarios de supervisión del Estado rector del puerto (art 9), quienes podrán verificar que el buque cuente con un certificado válido, inspeccionar el Libro registro del agua de lastre, y/o realizar un muestreo de dicha agua. En caso de duda, podrá efectuarse una inspección pormenorizada y la parte que efectúe la inspección tomará las medidas necesarias para garantizar que el buque no descargará agua de lastre hasta que pueda hacerlo sin presentar un riesgo para el medio ambiente, la salud de los seres humanos, los bienes o los recursos".

Por último, indicar que en cada uno de estos procesos evaluadores se hará todo lo posible para evitar que los buques sufran una detención o demora innecesaria (art 12).

En el siguiente apartado, se describe cada una de las tecnologías existentes para un posterior análisis empresarial y tecnológico de las mismas.

3. Tecnologías empleadas para la eliminación de los contaminantes en las aguas de lastre

En este apartado se pretende llevar a cabo un análisis más exhaustivo de cada una de las tecnologías clasificadas en la figura 2. Una vez descritos y analizados todas y cada uno de los procesos, se podrá comenzar el estudio de los equipos comerciales que a día de hoy presenta cada uno de los tratamientos.

En la selección de la tecnología se debe de tener en cuenta la adecuación de la misma en el tratamiento de las especies invasoras identificadas en la ruta marítima del buque. El problema surge cuando el barco no tiene una ruta fija, pasando por diferentes ecosistemas (diferentes especies invasivas). Por esta razón, algunos sistemas incluyen más de un método a la hora de tratar el agua de lastre.

3.1 Tratamiento en puerto

En algunos puertos puede haber suficiente espacio para establecer un sistema de instalaciones para tratar el agua de lastre. El tamaño del tratamiento dependería del número, el calendario y el tipo de buques del sistema portuario. El sistema de tuberías debe ser apropiado para la transferencia del agua entre el buque y la instalación costera.

De esta manera, sólo los países interesados intervendrían en esta inversión y aun así, las instalaciones no estarían actualmente equipadas para tratar especies no autóctonas del agua de lastre. Es por ello que la Organización Marítima Internacional no promueve los sistemas regionales, pues el problema del agua de lastre es un problema mundial. Por tanto, esta vía queda eliminada dentro de nuestro análisis de estudio.

3.2 Tratamiento en buque.

La principal normativa a cumplir antes de seleccionar la posible tecnología, es la de que el sistema de lastre y la planta de tratamiento deberán de ir conectadas en by-pass de manera que el buque se pueda lastrar y deslastar sin necesidad de pasar el lastre por la planta de tratamiento (pudiendo operar de esta forma en caso de emergencia).

3.2.1 Tratamiento mecánico-físico: Separación de partículas.

La filtración es el método medioambiental más frecuente para el tratamiento del agua de lastre. La mayoría de las técnicas de filtración son eficaces contra sedimentos y muchos tipos de organismos. Se puede llevar a cabo durante las operaciones de lastrado con un sistema de filtración a bordo. La separación física y la eliminación de los organismos se pueden mantener tanto en la carga de agua de lastre o durante el viaje. En muchos ensayos, la filtración a bordo se utiliza como tratamiento primario. Normalmente, la separación ciclónica se realiza utilizando **hidrociclones**. Dependiendo del diseño y la aplicación, los hidrociclones requieren menos presión de la bomba que los filtros de tamiz y permiten la separación de sedimentos y otros sólidos en suspensión a aproximadamente 20 µm.

3.2.2 Tratamiento mecánico-física. Destrucción mecánica de partículas.

A) Ultrasonido

La tecnología de ultrasonidos o sonicación se puede utilizar como una opción de tratamiento secundario. Los resultados no son todavía demasiado eficaces para ser empleada a gran escala.

B) Cavitación

La cavitación es un efecto hidrodinámico producido cuando un fluido con una baja presión pasa a gran velocidad por una arista afilada, produciendo una descompresión del fluido, de tal manera que al aumentar la velocidad del fluido y disminuir la presión interna, se alcance la presión de vapor del fluido de tal forma que las moléculas que lo componen, cambien inmediatamente de estado a vapor, formándose las burbujas. La cavitación es lograda cuando las burbujas formadas muestran un gran crecimiento seguidas de un rápido y violento colapso; las membranas celulares se rompen liberando las partículas de las superficies sólidas, destruyendo partículas u organismos a través de las colisiones con otras partículas.

Erradica el crecimiento bacteriano y de algas (eliminada las biopelículas); Destruye los cationes, como el calcio mediante su precipitación; Elimina los sólidos en suspensión y los gases nocivos que pueden acidificar el agua mediante el cambio de presión.

No obstante, la cavitación es, en la mayoría de los casos, un suceso indeseable. En dispositivos como hélices y bombas, la cavitación puede causar mucho ruido, daño en los componentes y una pérdida de rendimiento. Las burbujas formadas producen una estela de gas y un arranque de metal de la superficie en la que origina este fenómeno. En el arranque de metal, la capa de óxido que lo protege, desaparece de tal forma que entre esta zona (ánodo) y la que permanece pasivada (cubierta por óxido) se forma un par galvánico, diferencia de potencial que se forma entre dos metales con un electrolito (agua) y que crea una pila, como consecuencia el ánodo se corroe y a mayor diferencia de carga, mayor velocidad de corrosión para el metal electronegativo.

3.2.3 Tratamiento mecánico-física. Daño a escala molecular.

A) Calor - tratamiento térmico

Con este tipo de tratamiento, existen las siguientes opciones:

(1) El uso de calor residual producido por los motores del barco y (2) el uso de calor creado por los sistemas de calderas de reserva instalados a bordo del buque. La temperatura mínima necesaria para desactivar las especies no deseadas es superior a 40°C. La idea del tratamiento térmico puede ser más aplicable al agua de lastre que se origina en entornos más cálidos. El calor necesario para el tratamiento térmico podría reducirse cuando la temperatura del agua se encuentre en niveles tropicales o de verano (30°C o más). La temperatura del agua de lastre podría aumentarse: (1) conectando el agua de lastre con el circuito de refrigeración del motor; (2) calentamiento por paso repetido del agua de lastre a través del sistema de refrigeración; Y (3) generar calor adicional. En general, el tratamiento térmico está limitado por la disponibilidad de calor residual, el método de intercambio de este calor, la duración del viaje, el efecto de enfriamiento en

tiempo frío, el efecto de la remoción de calor sobre el rendimiento del motor, el potencial de aumento de la corrosión y la probabilidad de un alto mantenimiento con los intercambiadores de calor. Las nuevas técnicas similares al tratamiento térmico son microondas, ultrasonido y pulso eléctrico.

En el tratamiento por calor no es necesario el uso ni el almacenamiento a bordo de sustancias químicas. No hay subproductos de procesos químicos o residuos que se descarguen al medio ambiente. No obstante, para producir calor se requiere un alto consumo de energía; El casco puede estar expuesto a estrés térmico basado en el potencial de expansión y contracción de la estructura de acero del buque. El calor del agua de lastre puede incrementar la corrosión de los sistemas y promover el crecimiento de las algas que crecen con el calor. Además, el espacio necesario para realizar la instalación para el tratamiento por calor es casi imposible en retrofits y se necesita una cuidadosa organización y gestión para un buque de nueva construcción, particularmente si se necesitan calderas adicionales. Esa agua descargada tiene una temperatura más elevada y puede afectar a la vida marina autóctona. Por otro lado, si es necesario el consumo de fuel para incrementar la temperatura, la contaminación del aire puede volverse más alta, ya que el rango de temperaturas del sistema de las aguas de lastre es de 5°C a 45°C y consume aproximadamente 1,8m³ de fuel.

B) Tratamiento de radiación ultravioleta

La radiación UV se utiliza comúnmente para la desinfección de desechos y aguas superficiales. Con la dosificación adecuada, la radiación ultravioleta ha demostrado ser un bactericida y virucida efectivo para las aguas residuales, sin contribuir a la formación de subproductos peligrosos. La radiación UV opera provocando reacciones fotoquímicas con componentes biológicos como los ácidos nucleicos (ADN y ARN) Y proteínas. La eficacia del tratamiento UV depende del tamaño y la morfología de los organismos. Se considera como una opción secundaria para el tratamiento de residuos de lastre. La mayor parte del tiempo se combina con filtración (screening) o uso de hidrociclones o filtros cerámicos.

C) Pulso eléctrico

Se han realizado experimentos a pequeña escala aplicando tensión eléctrica en el rango de 15 a 45 kV con una duración de impulso de 1 μ s. Se requerirían grandes fuentes de energía para sistemas capaces de tratar grandes volúmenes de agua de lastre.

D) Microondas

Las microondas tienen altas tasas de calentamiento en comparación con la calefacción convencional. La inactivación de los microorganismos seleccionados se consigue a 55°C y un tiempo de retención de entre 100-200 s.

3.2.4 Separación química.

Una amplia gama de sustancias o procesos químicos se utiliza en todo el mundo para el tratamiento de agua y aguas residuales. Un resumen de los métodos de tratamiento químico para el tratamiento del agua de lastre se expone a continuación.

A) Biocidas

La adición de productos químicos que matarían o inactivarían una variedad de organismos que se encuentran en el agua de lastre es una tecnología de tratamiento atractiva debido a la facilidad de aplicación.

Un biocida podría simplemente añadirse al tanque de lastre y dejar que reaccione durante un período determinado. Los biocidas están entre los productos químicos industriales más ampliamente utilizados y hay un gran conocimiento sobre su uso en el tratamiento de agua y aguas residuales. Existen cinco mecanismos principales que han sido propuestos para explicar la acción de los biocidas: daño a la pared celular, alteración de la permeabilidad celular, alteración de la naturaleza coloidal del protoplasma, alteración del organismo ADN o ARN e inhibición de la actividad enzimática. Los biocidas se clasifican en dos grupos: biocidas oxidantes y biocidas no oxidantes. Los primeros se usan generalmente en sistemas de agua dulce, debido a que su actividad está agotada por la materia orgánica presente en las aguas. Los compuestos no oxidantes abarcan una amplia gama de compuestos químicos que incluyen dibromonitrilo-propionamida, formaldehído, glutaraldehído, sales de amonio cuaternario, diversas sales de amonio cuaternario, Compuestos organo-azufrados, agentes tensoactivos aniónicos y no aniónicos.

El uso de biocidas para el tratamiento del agua de lastre ha sido cuestionado por varias razones, incluyendo la renuencia a agregar productos químicos tóxicos al agua que pueden ser devueltos al océano, la eficacia desconocida de los biocidas contra los organismos objetivos y el cumplimiento de las regulaciones de descarga en todo el mundo.

B) Cloro

El cloro es un agente oxidante fuerte. Independientemente de la fuente de cloro (gas de cloro o sales de hipoclorito), las principales especies desinfectantes son el ácido hipocloroso tanto en forma iónica como protonada, y las cloraminas. Su eficacia como desinfectante depende de la temperatura, el cloro residual y el tiempo de reacción. El cloro puede ser fácilmente añadido a los tanques de lastre a través de un clorador instalado en línea.

Antes de descargar el agua de lastre, sería necesario eliminar el exceso de cloro libre mediante la descloración. Esto puede lograrse añadiendo dióxido de azufre, que reacciona con cloro residual para formar iones cloruro. Los riesgos ambientales son muchos, por lo que el agua de lastre que se está tratando con cloro debe examinarse en profundidad.

C) Dióxido de cloro-ClO₂

El dióxido de cloro es un desinfectante fuerte. Las principales preocupaciones con el dióxido de cloro son el costo y la posible toxicidad ambiental de los subproductos. El dióxido de cloro es tóxico para los organismos acuáticos.

D) Generación de cloro electrolítico

Se puede usar agua de mar u otra agua que contenga NaCl para generar una solución desinfectante que contenga cloro pasando una corriente eléctrica a través de la solución. La generación in situ de hipoclorito de agua de mar se ha utilizado durante más de 25 años.

El proceso se basa en la electrólisis parcial del NaCl presente en el agua de mar. El NaCl se disocia en Na⁺ (catión sódico) y Cl⁻ (anión cloruro) que reacciona en el ánodo para producir cloro libre (Cl₂). Se producen reacciones sucesivas en el agua de mar incluyendo la formación de OH⁻ (hidróxido) que migra al cátodo y reacciona con Na⁺ y Cl₂, produciendo NaOCl (hipoclorito de sodio) y H₂ (hidrógeno). El H₂ que se produce se ventila. La reacción química general que se produce en el generador electrolítico de cloro puede describirse como: $\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaOCl} + \text{H}_2$.

E) Ozono

El ozono es un agente oxidante muy potente pero inestable que destruye virus y bacterias, y así como su eficacia en la eliminación de zooplancton es muy alta, en lo que se refiere a la eliminación de organismos que forman esporas, el resultado no es tan positivo y las dosis de Ozono han de ser demasiado elevadas.

Los subproductos de desinfección (DBP) se forman cuando los desinfectantes oxidantes (cloro, dióxido de cloro u ozono) reaccionan con bromuro o cloruro y / o materia orgánica natural presente en la fuente de agua. Ellos representan una preocupación ambiental o de salud muy seria, ya que estos compuestos son carcinógenos. Los trihalometanos (THMs) son DBPs predominantes y se forman como resultado de una reacción compleja entre cloro libre o bromo y materia orgánica natural. El mecanismo de formación implica la sustitución de los átomos de hidrógeno en la molécula de metano (CH₄) con átomos de halógeno. Estos compuestos incluyen triclorometano (también conocido como cloroformo) (CHCl₃), bromodiclorometano (CHBrCl₂), dibromoclorometano (CHBr₂Cl) y tribromometano (o bromoformo) (CHBr₃). La concentración de cloro libre y bromo, el pH, la temperatura y el nivel de materia orgánica acuática son parámetros que influyen en la producción de subproductos de desinfección.

F) Desoxigenación

Normalmente, implica burbujear nitrógeno u otros gases inertes en el agua de lastre para reducir el contenido de oxígeno. Otras tecnologías de tratamiento de desoxigenación más complejas implican el uso de glucosa, monóxido de carbono o biorreactores que contienen lechos fijos de bacterias de remoción de oxígeno, todas diseñadas para agotar los niveles de oxígeno del agua de mar.

El uso de nitrógeno o gases inertes en cualquier estado del tratamiento necesita de pocas partes móviles. Los grandes volúmenes y caudales de bombeo de las aguas de lastre, sin un límite máximo de la capacidad de flujo, se pueden manejar independientemente de la salinidad, turbidez, temperatura o carga orgánica.

Los sistemas permiten una reducción de la corrosión en los tanques de lastre creando una atmósfera con deficiencia de oxígeno que inhibe la corrosión en los tanques. Además, no es necesario el transporte o el uso de ningún químico peligroso, o la descarga de ningún tóxico producido a través de las aguas de lastre.

Las limitaciones del sistema, implican que la generación de nitrógeno gas o gases inertes requieren de un equipo muy complejo. El nitrógeno puede ser producido a bordo a partir de dos métodos:

- Absorción por cambio de presión.
- Tecnología de membranas.

G) Electro-ionización de separación magnética

El tratamiento con esta tecnología requiere varios procesos secuenciales. En primer lugar, se introduce en el agua un flujo continuo de gas ionizado (que contiene oxígeno y nitrógeno). A continuación, el aire pasa a través de fuertes campos ultravioletas y magnéticos creando iones de oxígeno y nitrógeno. Una vez que estos iones se inyectan en el agua, causan contaminantes en el agua para coagular. Los grupos de sólidos son floculados en suspensión y separados por filtración por separación magnética.

3.3 Métodos combinados

Los métodos combinados se usan mucho para el tratamiento del agua de lastre. La eficacia de los sistemas combinados es mucho mayor.

Todos los métodos potenciales de tratamiento del agua de lastre implican un coste operativo que, en general es de gran preocupación para los propietarios de buques y, a menudo, el parámetro más importante para la elección de una tecnología de tratamiento de agua de lastre a instalar a bordo. A partir del tratamiento mecánico, las unidades de filtración e hidrociclón son la solución preferida para un primer paso que, además, se puede aplicar fácilmente durante la absorción de agua de lastre. Estos sistemas tienen la ventaja de dejar a los organismos locales en su ambiente familiar. Ambos son más eficaces para las partículas más grandes.

La limpieza apropiada debe ser el siguiente paso para evitar los efectos del ensuciamiento. En este aspecto UV, calor y desoxigenación constituyen los métodos físicos más comunes.

El tratamiento UV es una tecnología muy conocida en aplicaciones de tratamiento de aguas residuales y es eficaz contra una amplia gama de microorganismos. Dado que la alta eficiencia del proceso requiere una buena transmisión UV, la absorción de agua debe caracterizarse por una baja turbidez. La combinación de la desinfección UV con la adición de agentes oxidantes, como el ozono o el peróxido de hidrógeno, en general, mejora el rendimiento de los sistemas UV.

Los procesos de calor y desoxigenación requieren largos períodos de tiempo para entrar en efecto. Si el viaje del barco es largo, entonces el período de tiempo probablemente no sea un obstáculo.

En lo que respecta a la desinfección química incluye cloración, ozonización, así como la adición de dióxido de cloro, ácido peracético, peróxido de hidrógeno y otros biocidas. Además, el proceso de ozonización implica la producción in situ de ozono, por lo que requiere equipos complejos para su implementación. Por otro lado, el dióxido de cloro es un reactivo peligroso y necesita un manejo adecuado por parte de la tripulación.

Cabe destacar que una consideración importante en la aplicación de cada método es el impacto que el sistema de tratamiento de agua de lastre puede tener sobre el nuevo medio marino. En este sentido, la toxicidad es un parámetro que debe ser evaluado. Las sustancias añadidas en el medio marino no deben producir efectos de toxicidad en toda la gama de vida marina. La eficacia de cada tratamiento debe evaluarse paralelamente.

Por último, las tecnologías de tratamiento electrolítico son también otro método alternativo. El proceso electrolítico de agua de mar produce cloro libre a partir de agua de mar natural tomada a bordo. Es una técnica rentable ya que no hay necesidad de almacenar y transportar sustancias químicas. Otra ventaja del sistema electrolítico es que la desinfección electrolítica puede tener lugar a bordo durante el procedimiento de descarga (descarga) con un diseño de electrodo de paso. De esta manera, se puede evitar la corrosión de los tanques de lastre.

4. Análisis Empresarial

Desde el punto de vista de I+D+i, en la actualidad, una gran cantidad de empresas (tanto emergentes, como relacionadas con el sector) se encuentran en fase de investigación, y desarrollo de nuevas tecnologías, así como mejorando y optimizando las anteriormente explicadas. En total, se identificaron 86 fabricantes de tratamientos de aguas de lastre, y de estos, 67 utilizan algún tipo de tecnología de pre-tratamiento (51 usan filtración, mientras que 16 usan otros métodos diferentes para separar mecánicamente los organismos, o una combinación de estos como pre-tratamiento). Como paso de tratamiento secundario, la mayoría de los sistemas (60) utilizan algún tipo de "Sustancia Activa" como tratamiento químico. Las sustancias activas más frecuentemente utilizadas se generan por electrólisis/electrocloración (25 sistemas diferentes encontrados), que se aplican principalmente en combinación con otras técnicas. Mediante estos métodos, las sustancias activas se generan en todo el flujo de agua o en una corriente secundaria y luego se reinyectan en la tubería de agua de lastre del recipiente.

El segundo método más frecuente utilizado se basa en la tecnología UV (24 sistemas en desarrollo); 16 de estos sistemas usan UV como tratamiento único, mientras que los ocho restantes emplean UV en combinación con una o más técnicas, entre las cuales destacan el TiO_2 , ultrasonido, ozonización, electrólisis y el plasma [16].

Tras el análisis y evaluación del desarrollo tecnológico-empresarial en este tipo de tratamiento; a continuación, se adjunta una tabla en la que se compilan cada uno de las empresas que disponen de sistemas comercialmente existentes y acreditados (cumpliendo por tanto con lo estipulado en el convenio de la OMI). En ella se explicita el nombre de la empresa, así como del dispositivo creado, el tipo de tratamiento utilizado (simple o combinado) y el país en el que se encuentra dicha empresa.

EMPRESA	TECNOLOGÍA	TRATAMIENTO	PAÍS
ALFALAVAL	PUREBALLAST 2.0	Filtración + UV	Suecia
TECHCROSS	ELECTRO-CLEEN SYSTEM	Tratamiento electroquímico	Corea
OCEAN SAVER	OCEAN SAVER	Filtración + nitrógeno supersaturado + desinfección electrodiálítica	Noruega
NEI TREATMENT	THE VOS™	Desoxigenación + cavitación	EE.UU
HYDE MARINE	HYDE MARINE	Filtración + UV	EE.UU
NUTECH O ₃ , INC	NUTECH O ₃	Ozono	EE.UU
OPTIMARIN	OPTIMARIN	Microfiltración + UV	Noruega
HITACHI PLANT TECH.	CLEARBALLAST	Coagulación + Separación magnética	Japón
PANASIA	GLOENPATROL™	Filtración + UV	Corea
WILHELMSSEN	UNITOR BWT	(En pruebas por fallos de equipos)	Noruega
JFE ENGINEERING	BALLASTACE JFE	Cloro + Agente reductor	Japón
MARINE WATER TECH.	CLEANBALLAST	Disco de filtración + Desinfección electroquímica	Alemania
HAMWORTHY	AQUARIUS TM	Filtración + (UV ó Electrocloración)	Inglaterra
MITSUI ENGINEERING	FINEBALLAST	Ozono	Japón
ECOCHLOR	ECOCHLOR	Filtración + Desinfección con Dióxido de Cloro	EE.UU
SUNRUI MARINE	BALCLOR	Filtración + Desinfección + Neutralización	China
HEADWAYTECHNOLOGY	OCEAN GUARD™	Filtración + Oxidación Avanzada por electrocatálisis	China
SEVERN TRENT DE NORA	BALPURE	Desinfección electrolítica	Italia
DAMEN	LOFLO BWTS	Filtración + UV	Holanda
HYUNDAI HEAVY INDUSTRIES	ECOBALLAST	Filtración + UV	Corea
	HIBALLAST	Filtración + Electrólisis + Neutralización	

Tabla 2. Análisis empresarial. (Fuente: adaptado de [15])

5. Análisis tecnológico

Este apartado pretende aportar una visión más técnica al documento expuesto con la intención de facilitar la selección del tipo de tecnología a instalar en un buque. En el siguiente análisis se clasifican los tratamientos descritos en la sección tres, en función de las ventajas y desventajas de cada uno de ellos. A continuación, se exponen los parámetros analizados, los cuales han sido estipulados en función de las necesidades del buque y de sus tripulantes, así como de las normativas propias del convenio:

- Seguridad de la tripulación y de los pasajeros (SEG).
- Facilidad de operación del equipo de tratamiento (FAC).
- Evaluación de los posibles daños al medio ambiente (EMA).
- Cantidad de interferencia con las operaciones normales del buque y los viajes (INT).
- Integridad estructural del buque, dificultad de instalación (DIF).
- Compra de productos durante el empleo de la tecnología (PROD).
- Formación de sub-productos durante el empleo de la tecnología (SUB).

Tecnologías	Parámetros de análisis							Observaciones
	SEG	FAC	EMA	INT	DIF	PROD	SUB	
Tratamiento mecánico-físico								
Separación de partículas								
Filtración/hidrociclones	Sí	Sí	Sí	No	No	No	No	Necesario combinar con otra tecnología para obtener un buen rendimiento
Destrucción mecánica de partículas								
Ultrasonido	Sí	No	Sí	Sí	No	No	No	No se emplea a gran escala
Cavitación	Sí	No	Sí	Sí	No	No	No	
Daño a Escala molecular								
Tratamiento térmico	Sí	No	Sí	Sí	Sí	No	No	
Radiación ultravioleta	Sí	Sí	Sí	No	No	No	No	
Pulso Eléctrico	Sí	No	Sí	Sí	No	No	No	No se emplea a gran escala y tienen un elevado consumo energético
Microondas	Sí	No	Sí	Sí	No	No	No	
Tratamientos Químicos								
Biocidas	Sí	Sí	No	No	No	Sí	Sí	
Cloro	Sí	No	No	No	No	Sí	Sí	Su fácil empleo está limitado por la necesidad de tratar el cloro en exceso antes de verter el agua
Dióxido de cloro	Sí	No	No	No	No	Sí	Sí	
Cloro-electrolito	Sí	Sí	No	No	No	No	Sí	
Ozono	Sí	No	No	No	Sí	Sí	Sí	
Desoxigenación	Sí	No	Sí	No	Sí	Sí	No	
Electro-ionización	Sí	No	No	No	Sí	Sí	Sí	

Pros

Contras



Tabla 3. Análisis tecnológico.

6. Conclusiones

Las aguas de lastre, y la respectiva contaminación que estas generan, son un problema vetusto que ha abierto un nuevo campo de investigación y desarrollo.

Como consecuencia de la masiva colonización de los mares y océanos, la Organización Marítima internacional adoptó el 13 de febrero de 2004 el Convenio Internacional para el Control y la Gestión del Agua de Lastre y los sedimentos de los buques, de la cual se rige este documento a través de sus diversas reglamentaciones.

La puesta en vigor de dicho convenio el día 8 de septiembre del 2017, confirma la clara y urgente necesidad del estudio e integración de las tecnologías de tratamiento de este tipo de aguas en el sector marítimo.

La visión actual corrobora la preocupación de los ingenieros y técnicos de buques acerca de esta situación; así como confirma la implantación de alguna tecnología en un pequeño porcentaje del sector marítimo.

Con el tiempo, diferentes tecnologías de tratamiento se han adaptado para su posible aplicación y empleo dentro de los propios buques. Este documento contempla una descripción y análisis de cada una de ellas, las cuales se encuentran avaladas y recomendadas por el propio convenio de la OMI.

En el desarrollo y optimización de estas tecnologías destacan los países asiáticos, EE.UU y Noruega por su mayor grado de implicación tanto social como técnico.

No obstante, en estas implantaciones el principal objetivo es el de acreditarse como embarcación susceptible de superar las normativas estipuladas al respecto, y no la de asegurar o medir la eficiencia y el rendimiento de estas tecnologías en lo que se refiere a la calidad del agua.

A raíz de lo anteriormente explicitado, es necesario añadir a los parámetros que se estudian en el análisis técnico de los tratamientos de agua (estipulados por parte del convenio), una serie de variables e indicadores que generen un análisis más exhaustivo en lo que respecta a la calidad y emisión de las aguas tratadas en su destino/origen, el mar.

En este sentido, el documento resalta la necesidad de profundizar los análisis de validación de estas tecnologías incrementando el estudio de parámetros físicos y químicos; los cuales, junto con los análisis microbiológicos y toxicológicos demandados, aportarán unos resultados mucho más completos en lo que respecta a la calidad del agua de vertido.

Asimismo y en relación a una mejora para la conservación del medio marino, se podría precisar con mayor grado de detalle un protocolo analítico previo al vertido, que se produzca tanto in situ como a posteriori del proceso.

Con ello se pretende mejorar las instrucciones estipuladas por la OMI, incrementando el rigor de control y seguimiento de dichos vertidos. Para ello se debe de implementar instrumentación así como adoptar medios y técnicas de análisis a los buques que sirvan como medida de protección ambiental

Estas nuevas aportaciones y consejos facilitarían el estudio del impacto ambiental provocado en el entorno del vertido e incluso minimizarían el mismo.

Referencias

- [1] Ministerio de Empleo y Seguridad Social. Guía Sanitaria a Bordo. Bloque IV. Prevención Higiene y Muerte en el mar. Capítulo 14. Higiene del medio a bordo. http://www.seg-social.es/ism/gsanitaria_es/ilustr_capitulo14/cap14_3_aguabordo.htm
- [2] García Mendoza, R. E., & Pallares Bossa, J. A. (2015). Regulación para el control y prevención de la contaminación marina ocasionada por las aguas de lastre en el puerto marítimo del distrito de Cartagena (Doctoral dissertation, Universidad de Cartagena).
- [3] Sutherland, T. F., Levings, C. D., Elliott, C. C., & Hesse, W. W. (2001). Effect of a ballast water treatment system on survivorship of natural populations of marine plankton. *Marine Ecology Progress Series*, 210, 139-148.
- [4] Tsolaki, E., & Diamadopoulos, E. (2010). Technologies for ballast water treatment: a review. *Journal of Chemical technology and Biotechnology*, 85(1), 19-32.
- [5] The North Sea Ballast Water Opportunity Project. Volume 2, 2012. www.northseaballast.eu
- [6] Chu, K. H., Tam, P. F., Fung, C. H., & Chen, Q. C. (1997). A biological survey of ballast water in container ships entering Hong Kong. In *Asia-Pacific Conference on Science and Management of Coastal Environment* (pp. 201-206). Springer Netherlands.
- [7] Olenin, S., Gollasch, S., Jonusas, S., & Rimkute, I. (2000). En-route investigations of plankton in ballast water on a ship's voyage from the Baltic Sea to the open Atlantic coast of Europe. *International Review of Hydrobiology*, 85(5), 577-596.
- [8] Endresen, Ø., Behrens, H. L., Brynstad, S., Andersen, A. B., & Skjong, R. (2004). Challenges in global ballast water management. *Marine Pollution Bulletin*, 48(7), 615-623.
- [9] Werschkun, B., Banerji, S., Basurko, O. C., David, M., Fuhr, F., Gollasch, S., ... & Kehrer, A. (2014). Emerging risks from ballast water treatment: The run-up to the International Ballast Water Management Convention. *Chemosphere*, 112, 256-266.
- [10] García Calvo, A. (2015). Diseño e instalación de una unidad de tratamiento de agua de lastre en un buque.
- [11] Resolución A. 868(20). Guidelines for control and management of ship's ballast water to minimize the transfer of harmful aquatic organism and pathogens. Aprobadas por la Asamblea de la Organización Marítima Internacional, OMI, el 27 de Noviembre de 1997.
- [12] Bartolomé Lamarca, I. (2014). Sistemas de gestión de agua del lastre: Fundamentos jurídicos y esquemas operativos.
- [13] International Maritime Organization.
[http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Control-and-Management-of-Ships'-Ballast-Water-and-Sediments-\(BWM\).aspx](http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Control-and-Management-of-Ships'-Ballast-Water-and-Sediments-(BWM).aspx)
- [14] Árias-Lafargue, T. (2014). Alternativa de solución a la contaminación marina por agua de lastre. *Tecnología Química*, 34(2), 170-177.

[15] Usero García, J. D. (2014). Definición y cálculo de sistema de lastre de un buque LNG de 176.000 m³: selección planta tratamiento para cumplimiento: convención IMO aguas de lastre.

[16] Emerging Risks from Ballast Water Treatment, Chapter: 4, Publisher: Federal Institute for Risk Assessment, Editors: Barbara Werschkun, Thomas Höfer, Matthias Greiner, pp.23-30.