



Trabajo Final Integrador para el curso de Hidrografía - Oceanografía

Tecnología aplicada a los Sistemas de Tratamiento de agua de Lastre

Autor: Tc Leticia Paola RAMOS
Tutor: Licenciada Leila RON

AÑO 2025

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN.....	4
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL TRABAJO	7
1.1 Introducción	7
1.2 Objetivos.....	8
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS.....	8
CAPÍTULO 3. MARCO REGULATORIO NORMAS D-1 A D-4	10
3.1 Norma D-1: El Intercambio de Agua de Lastre	10
3.2 Norma D-2: El Estándar de Rendimiento Biológico	11
3.3 Norma D-3 Requisitos de Aprobación para BWMS	12
3.4 Norma D-4: Disposiciones Relativas a Tecnologías Prototipo.....	12
CAPÍTULO 4. TECNOLOGÍAS APLICADAS A LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA DE LASTRE (BWMS)	12
4.1. Tratamientos Mecánicos: La Filtración	13
4.2. Tratamientos Físicos: La Inactivación por Energía - Radiación Ultravioleta (UV).....	13
4.2.1. Otros Métodos Físicos	15
4.3 Tratamientos Químicos: Biocidas y Electrólisis	17
4.4. Sistemas Híbridos y Protagonistas	18
CAPÍTULO 5. IMPLEMENTACIÓN Y DESAFÍOS TECNOLÓGICOS A BORDO	19
5.1 Inspección y Control del Cumplimiento de la Certificación a Bordo.....	19
5.3. Evaluación y Gestión de Modificaciones en los BWMS Homologados.....	20
CAPÍTULO 6. MECANISMO DE REVISIÓN (REGLAMENTO D-5)	24
6.1. La Cooperación Internacional y Asistencia Técnica.....	25
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES:	25
REFERENCIAS.....	27

AGRADECIMIENTOS

La finalización de este Trabajo Final Integrador ha sido posible gracias al apoyo y la colaboración de varias instituciones y personas clave, a quienes extiendo mi más sincero agradecimiento.

En primer lugar, a la Licenciada Leila RON, mi tutora, por su guía, su disponibilidad constante, y por el conocimiento y la predisposición demostrada. Su dirección y asesoramiento han sido fundamentales para dar forma a la investigación y lograr la coherencia y profundidad técnica exigidas en el estudio de las tecnologías de tratamiento de agua de lastre.

A la Escuela de Ciencias del Mar (ESCM), por ser el ámbito de formación y capacitación profesional, y por proporcionar el marco académico y los recursos necesarios para el desarrollo de este trabajo.

Finalmente, a la Armada Argentina, por el apoyo institucional constante y por el ambiente que fomenta la investigación y el estudio, permitiendo la integración de la instrucción recibida con las exigencias operativas y tecnológicas actuales del ámbito marítimo internacional.

Mi gratitud a todos los que, de una u otra manera, contribuyeron a la concreción de este proyecto.

RESUMEN

A lo largo de la historia, la problemática de las especies exóticas transportadas a través del agua de lastre de los buques ha sido ampliamente estudiada, lo que impulsó el desarrollo e innovación de tecnologías destinadas a mitigar este fenómeno.

El presente Trabajo Final Integrador aborda el estudio de dichas tecnologías aplicadas a los sistemas de tratamiento de agua de lastre en buques, en el marco de la normativa internacional establecida por la Organización Marítima Internacional (OMI). El agua de lastre, esencial para la estabilidad de las embarcaciones, constituye una de las principales fuentes de transporte involuntario de especies exóticas e invasoras. El aumento del comercio marítimo y el uso de buques con cascos de acero han provocado un constante aumento de las mismas. Para mitigar este riesgo, la Organización Marítima Internacional (OMI) adoptó en 2004 el Convenio Internacional para el Control y la Gestión del Agua de Lastre y los Sedimentos de los Buques (BWM, 2004).

Las tecnologías de tratamiento aplicadas en los Sistemas de Gestión de Agua de Lastre (BWMS) se clasifican principalmente en las siguientes categorías: tratamientos mecánicos, tratamientos físicos y tratamientos químicos. No obstante, la tendencia tecnológica dominante es el sistema híbrido o combinado, que generalmente involucra la filtración como pretratamiento, seguida de una desinfección avanzada. De estas últimas, la electrólisis y la irradiación ultravioleta (UV) son las técnicas más extendidas y aprobadas. Finalmente, el éxito del Convenio depende de abordar los desafíos de la implementación, la importancia de la fiscalización a través del Control del Estado Rector del Puerto y las perspectivas futuras en la revisión de los estándares por parte de la OMI.

ABSTRACT

Throughout history, the issue of exotic species transported through ships' ballast water has been widely studied, leading to the development and innovation of technologies aimed at mitigating this phenomenon. This Final Integrative Project examines these technologies as applied to ballast water treatment systems on board ships, within the framework of the international regulations established by the International Maritime Organization (IMO). Ballast water, essential for the stability of vessels, represents one of the main vectors for the unintentional transport of exotic and invasive species. The growth of maritime trade and the widespread use of steel-hulled ships have contributed to the continuous increase of such species. To address this risk, the IMO adopted in 2004 the International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments (BWM, 2004).

The treatment technologies applied in Ballast Water Management Systems (BWMS) are primarily classified into mechanical, physical, and chemical methods. Nevertheless, the dominant technological trend is the hybrid or combined system, which generally involves filtration as a pretreatment step followed by advanced disinfection. Among these, electrolysis and ultraviolet (UV) irradiation are the most widely implemented and approved techniques. Finally, the effectiveness of the Convention depends on addressing implementation challenges, the importance of oversight through Port State Control, and future perspectives regarding the IMO's ongoing review of performance standards.

GLOSARIO:

OMI: Organización Marítima Internacional.

MEPC: Comité de Protección del Medio Marino.

IOPP: Prevención de la Contaminación por Hidrocarburos.

ADN: Ácido Desoxirribonucleico, es una molécula que contiene el material genético que porta las instrucciones para el desarrollo, funcionamiento, crecimiento y reproducción de todos los seres vivos.

ARN: Ácido ribonucleico, es una molécula vital para todas las células vivas que ayuda a crear proteínas a partir de la información del ADN y participa en otras funciones celulares importantes.

BWM: Convenio internacional para el control y la gestión del agua de lastre y los sedimentos de los buques.

BWMS: Sistema de Gestión del Agua de Lastre.

UV-C: Luz ultravioleta de onda corta.

TRC: Cloro Residual Total.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL TRABAJO:

1.1 Introducción:

El agua de lastre, transportada en tanques específicos, es fundamental para la estabilidad, el asiento y la integridad estructural de los buques. El problema surge cuando esta agua es cargada en un puerto y descargada en otro. Durante la carga, el agua de lastre arrastra consigo la biota del puerto de origen, incluyendo una vasta gama de organismos acuáticos. Al ser descargada en un nuevo ecosistema, los organismos que sobreviven al viaje son liberados, compitiendo con las especies nativas y, en muchos casos, convirtiéndose en Especies Acuáticas Invasoras (EAI).

Las consecuencias de estas especies exóticas son ecológicas produciendo una pérdida de biodiversidad, económicas causando daños a infraestructuras pesqueras y acuícolas y sanitarias producen la transferencia de patógenos como *Vibrio cholerae* toxicogénico (Ron, Correa y Paolucci, 2013). La respuesta de la comunidad internacional a este desafío se materializó con el “Convenio internacional para el control y la gestión del agua de lastre y los sedimentos de los buques” (BWM, 2004). El espíritu del mismo, tal como se establece en su Artículo 2, Obligaciones Generales, compromete a las Partes Contratantes a dar “plena y completa aplicación a las disposiciones del Convenio y sus Anexos con el fin de prevenir, minimizar y, en última instancia, eliminar la transferencia de organismos acuáticos nocivos y patógenos”.

El Convenio exige a todos los buques de tráfico internacional:

1. Llevar un Plan de Gestión del Agua de Lastre específico para el buque y aprobado por la Administración (Reglamento B-1).
2. Disponer de un Libro de Registro de Agua de Lastre para documentar todas las operaciones de carga, tratamiento y descarga.
3. Poseer un Certificado Internacional de Gestión de Agua de Lastre.
4. Aplicar procedimientos de gestión del agua de lastre conforme a una norma establecida (D-2). Además, el Convenio establece obligaciones para las Partes en tierra, como garantizar que los puertos cuenten con instalaciones de recepción adecuadas para sedimentos (Artículo 5).

1.2 Objetivos:

El presente trabajo tiene por objetivo exponer de manera integral las tecnologías actuales de tratamiento de agua de lastre empleadas en el ámbito marítimo, describiendo su funcionamiento, ventajas y desventajas operativas, así como su impacto en los costos y tiempos de operación de los buques; incorporando además una cronología del surgimiento, evolución y adecuaciones del Convenio Internacional para el Agua de Lastre frente a los desafíos técnicos, ambientales y económicos que se manifestaron a lo largo del tiempo, con el fin de brindar una síntesis informativa, clara y actualizada para toda la comunidad marítima.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS:

El “Convenio Internacional para el Control y la Gestión del Agua de Lastre y los Sedimentos de los Buques” (BWM, 2004) es el resultado de un prolongado proceso diplomático y tecnológico impulsado por la creciente crisis ecológica de las Especies Acuáticas Invasoras (EAI).

El punto de inflexión se sitúa a finales de la década de 1980, cuando eventos catastróficos, como la rápida y masiva invasión del mejillón cebra en Norteamérica, dejaron de manifiesto el impacto destructivo, consecuencia de haber sido transportadas en el agua de lastre. La presión de países con ecosistemas costeros sensibles, especialmente Australia, Canadá y Estados Unidos, llevó a la Organización Marítima Internacional (OMI) a reconocer formalmente el agua de lastre como un vector de dispersión biológica, señalando la necesidad urgente de una acción internacional coordinada.

Como respuesta inicial, en 1991, el Comité de Protección del Medio Marino adoptó la Resolución MEPC.50 (31). Esta resolución promovía las primeras directrices internacionales que recomendaban el Intercambio de Agua de Lastre (BWE) en alta mar, lo que se consolidaría en el futuro como el Reglamento D-1. Esta medida era la única solución operacional viable en aquel momento, exigiendo el recambio del 95% del volumen del lastre lejos de la costa para minimizar el riesgo biológico. Sin embargo, la medida era voluntaria y, por lo tanto, inconsistente en su cumplimiento, además de presentar riesgos operacionales para la estabilidad de los buques en condiciones climáticas adversas. Esta insuficiencia, junto con la continuidad de las invasiones biológicas, forzó a la OMI, entre 1994 y 1999, a iniciar el desarrollo de un instrumento legal que fuera obligatorio, poniendo el foco en un estándar de Rendimiento (D-2) basado en la tecnología, y no solo en el

intercambio operacional.

La fase culminante se alcanzó en febrero de 2004 en Londres, con la aprobación formal del Convenio Internacional BWM. Este documento histórico introdujo las obligaciones futuras: mantener el D-1 para la transición y, crucialmente, adoptar el Reglamento D-2, que exige a los buques descargar agua con concentraciones biológicas por debajo de límites estrictos, haciendo indispensable el uso de Sistemas de Gestión de Agua de Lastre (BWMS).

No obstante, la entrada en vigor del Convenio quedó supeditada a una doble condición: la ratificación de al menos 30 Estados que representaran el 35% del tonelaje mercante mundial. Esta condición, pensada para garantizar la participación global, generó un largo período de espera y desarrollo. Entre 2005 y 2010, el MEPC se dedicó a elaborar un conjunto esencial de Directrices Técnicas (Serie G), siendo las G8 y G9 las más críticas, pues definieron los procedimientos para homologar los BWMS (Ron, Correa y Paolucci, 2013).

Un hito crucial para la industria fue el establecimiento del Calendario IOPP en 2009, el cual vinculó la obligación de instalar el D-2 a la primera renovación del Certificado Internacional de Prevención de la Contaminación por Hidrocarburos después de una fecha límite. Este mecanismo proporcionó una transición estructurada, pero el periodo de espera continuó. A medida que se acercaba la entrada en vigor, entre 2014 y 2016, la industria, preocupada por la robustez de los sistemas aprobados inicialmente, exigió una revisión de la Directriz G8. Este esfuerzo condujo a la creación de un Código para la Aprobación de Sistemas BWMS, enfatizando pruebas más rigurosas para asegurar que la tecnología fuera fiable en las condiciones extremas de la operación marítima.

Entrada en Vigor y el Dominio Tecnológico

Finalmente, tras la ratificación de Finlandia, el Convenio alcanzó la cuota de tonelaje requerida y entró en vigor globalmente el 8 de septiembre de 2017, transformando la gestión del lastre en una obligación legal.

La entrada en vigor marcó el inicio de la era del tratamiento obligatorio. Se adoptó el nuevo y más estricto Código BWMS (revisión de G8) entre 2017 y 2018, elevando el estándar de la tecnología de tratamiento. La fase obligatoria de instalación masiva (D-2) arrancó seriamente a partir de 2019, siguiendo el calendario de renovación IOPP. Este periodo obligó a miles de buques existentes a invertir en la instalación de los robustos sistemas

híbridos de filtración más desinfección (principalmente UV o electrólisis) (Núñez Arellano, 2021; Rodríguez González, 2019).

Este esfuerzo culmina alrededor de 2024, año en el que se espera que la gran mayoría de la flota mundial haya completado la instalación de su BWMS, dejando la Norma D-1 (intercambio) obsoleta y consolidando la Norma D-2 como el estándar operativo universal. Actualmente, el enfoque de la OMI y de las autoridades marítimas se ha trasladado del qué instalar al cómo operar. La fiscalización a través del Control del Estado Rector del Puerto (PSC) se intensifica para verificar el funcionamiento continuo, el mantenimiento y la documentación del BWMS a bordo, asegurando que la tecnología cumpla consistentemente con su misión biológica. El éxito final del Convenio dependerá de la fiabilidad tecnológica y la vigilancia rigurosa para garantizar la protección a largo plazo de los ecosistemas marinos.

CAPÍTULO 3. MARCO REGULATORIO NORMAS D-1 A D-4

La transición entre las dos principales normas de gestión es el elemento clave del Convenio, marcando la evolución desde una práctica operativa a una solución tecnológica permanente.

3.1 Norma D-1: El Intercambio de Agua de Lastre

La Norma D-1, o Estándar de Intercambio de Agua de Lastre, se estableció como una medida transitoria. Se basa en el principio de sustituir el agua de lastre costera por agua de alta mar, ya que esta última contiene generalmente menos organismos marinos costeros y patógenos. El Reglamento D-1 exige una eficiencia de intercambio volumétrico del 95%.

El intercambio debe realizarse en alta mar:

- Al menos a 200 millas náuticas de la tierra más cercana y en aguas de al menos 200 metros de profundidad, siempre que sea posible.
- Si no es posible, se debe realizar lo más lejos posible y, en todos los casos, al menos a 50 millas náuticas de la tierra más cercana y en aguas de un mínimo de 200 metros de profundidad.

Si bien fue un avance inicial, la práctica de intercambio presenta limitaciones: 1) es peligrosa para la seguridad estructural del buque en condiciones meteorológicas adversas, 2) no siempre se garantiza la eliminación de todas las especies costeras o sedimentos, y 3) no es aplicable a todas las rutas marítimas. Esto impulsó la necesidad de una solución permanente y más eficaz: la Norma D-2.

3.2 Norma D-2: El Estándar de Rendimiento Biológico

La Norma D-2, o Estándar de Rendimiento del Agua de Lastre, representa la solución tecnológica definitiva y es la que rige el diseño y la aplicación de los BWMS (Sistemas de Gestión de Agua de Lastre). El Reglamento D-2 exige que la descarga de agua de lastre cumpla con límites de concentración de organismos viables, medidos por unidad de volumen, lo que obliga al tratamiento a bordo.

Los límites de descarga son:

- Organismos con dimensión mayor o igual a 50 micrómetros: Menos de 10 organismos viables por metro cúbico.
- Organismos con dimensión menor a 50 micrómetros y mayor o igual a 10 micrómetros: Menos de 10 organismos viables por mililitro.

3.2.1. Estándar de Salud Humana (Microorganismos Indicadores)

Además de los límites biológicos, se incluye un estándar sanitario para proteger la salud humana. Los mismos para microorganismos indicadores, incluyendo patógenos clave, son críticos:

- *Vibrio cholera* toxicogénico (O1 y O139): Menos de 1 unidad formadora de colonias (UFC) por 100 mililitros.
- *Escherichia coli*: Menos de 250 UFC por 100 mililitros.
- Enterococos intestinales: Menos de 100 UFC por 100 mililitros.

Estos límites son notoriamente rigurosos y solo pueden alcanzarse mediante la aplicación de tecnologías avanzadas de desinfección, lo que ha impulsado la innovación en los sistemas de tratamiento.

3.3 Norma D-3 Requisitos de Aprobación para BWMS: exige que los sistemas de gestión del agua de lastre utilizados para cumplir con el Convenio deben ser aprobados por la Administración teniendo en cuenta las Directrices para la aprobación de sistemas de gestión del agua de lastre (G8), ahora reemplazadas por el Código BWMS.

Para obtener la homologación de tipo por parte de una Administración, los sistemas de gestión del agua de lastre deben someterse a pruebas en una instalación terrestre y a bordo de buques para demostrar que cumplen la norma de rendimiento establecida en la regla D-2 del Convenio BWM. El Código BWMS establece las especificaciones técnicas y los procedimientos de aprobación y certificación que la Administración debe utilizar para conceder la homologación de tipo. El cumplimiento satisfactorio de las disposiciones del Código BWMS debería dar lugar a la emisión de un Certificado de Aprobación de Tipo, que permite el uso de un sistema de gestión del agua de lastre a bordo de buques.

3.4 Norma D-4: Disposiciones Relativas a Tecnologías Prototipo

Consciente de la curva de aprendizaje tecnológica, la OMI incluyó el Reglamento D-4 sobre tecnologías prototipo. Este permite a los buques que participan en programas aprobados para probar y evaluar tecnologías prometedoras de tratamiento de agua de lastre disponer de un plazo de cinco años antes de tener que cumplir plenamente con los requisitos del Convenio. Esta disposición ha sido clave para fomentar la innovación y la validación de nuevos y más eficientes sistemas.

CAPÍTULO 4. TECNOLOGÍAS APLICADAS A LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA DE LASTRE (BWMS):

La tecnología de gestión de agua de lastre ha evolucionado rápidamente desde la adopción del Convenio, resultando en diversos Sistemas de Gestión de Agua de Lastre (BWMS) que se agrupan en tres grandes categorías, siendo la combinación de ellas la más efectiva para el cumplimiento de la Norma D-2.



Figura 1: Ejemplo de un tanque de agua de lastre.

<https://es.paint-in-china.com/products/modified-epoxy-ballast-tank-anticorrosive-coating.html>

4.1. Tratamientos Mecánicos: La Filtración

La filtración es casi universalmente el primer paso de tratamiento en un BWMS. Su principal función es:

1. Eliminar los organismos más grandes (zooplancton y fitoplancton grandes) y partículas de sedimento, reduciendo la carga biológica inicial.
2. Proteger el sistema de desinfección posterior, ya que los organismos y sedimentos pueden interferir con la eficacia de los tratamientos físicos (como la radiación UV) o reducir la vida útil de los equipos.

Los filtros utilizados suelen ser de malla fina (típicamente entre 20 y 50 micrómetros), y cuentan con sistemas de retrolavado automático para evitar obstrucciones durante la operación de lastrado. (BWM, 2004)

4.2. Tratamientos Físicos: La Inactivación por Energía - Radiación Ultravioleta (UV)

Una vez filtrada, el agua de lastre requiere un proceso que inactive o destruya a los organismos más pequeños (bacterias, virus, fitoplancton pequeño) que lograron pasar el filtro.

La desinfección por UV es un proceso físico que no introduce productos químicos activos. La radiación ultravioleta a una longitud de onda específica (principalmente UV-C) penetra

la membrana celular de los organismos y daña irreversiblemente su material genético ADN y ARN, impidiendo su reproducción y, por lo tanto, su viabilidad.

Este método físico es el más común, utilizado a menudo en sistemas híbridos después de la filtración.

Mecanismo de Acción Inactivación: La radiación UV-C (luz ultravioleta de onda corta) es absorbida por el material genético ADN y ARN de los organismos. Esta absorción causa daños fotoquímicos que alteran la estructura del ADN, impidiendo que la célula pueda replicarse o repararse. Como resultado, los organismos quedan "inactivados" (incapaces de reproducirse), lo que significa que no pueden establecerse ni invadir el ecosistema receptor.

El ciclo inicia con la captación, donde la entrada de Agua de Lastre se realiza directamente desde el medio marino. Este caudal, intrínsecamente cargado con organismos, sedimentos y una turbidez variable, es inmediatamente dirigido a la primera etapa crítica: el Pre-tratamiento. Esta fase se materializa a través de un sistema de Filtración. La función es reducir la carga biológica y, crucialmente, disminuir la turbidez para asegurar una óptima transmitancia UV, al mismo tiempo que se protege el equipo subsiguiente de posibles obstrucciones o daños mecánicos. Tras ser clarificada, el agua filtrada ingresa al centro del sistema y en esa cámara especializada, el flujo es expuesto a la intensa emisión de radiación en la banda UV-C generada por lámparas de alta o media presión. La energía fotónica de la radiación UV penetra las paredes celulares e impacta directamente el ADN y ARN de los microorganismos. Esta interacción provoca la formación de dímeros de pirimidina, alterando irreversiblemente la estructura genética y neutralizando la capacidad de replicación celular. El resultado es la inactivación de los organismos, volviéndolos inofensivos para un nuevo ecosistema. Una vez completada la dosificación letal, el agua tratada (biológicamente inactiva) es canalizada para ser confinada en el Tanque de Lastre del buque. Finalmente, durante la maniobra de Descarga o deslastre, el agua es bombeada fuera del tanque. En algunos diseños, el sistema incorpora una segunda etapa de tratamiento UV post-tanque para garantizar la erradicación de cualquier crecimiento residual que pudiera haber ocurrido durante el almacenamiento o para confirmar el cumplimiento con los rigurosos estándares de descarga de la Norma D-2 de la OMI antes de su liberación final al medio marino. Este proceso asegura la mitigación del riesgo de transferencia de especies acuáticas invasoras.

La limitación de este sistema es la eficacia del UV se ve fuertemente reducida en aguas turbias; con muchos sólidos en suspensión o con alta concentración de materia orgánica. Estas partículas absorben o dispersan la luz UV, creando un "efecto sombra" que protege a los microorganismos. Por ello, la filtración previa es un paso indispensable en todos los sistemas UV.

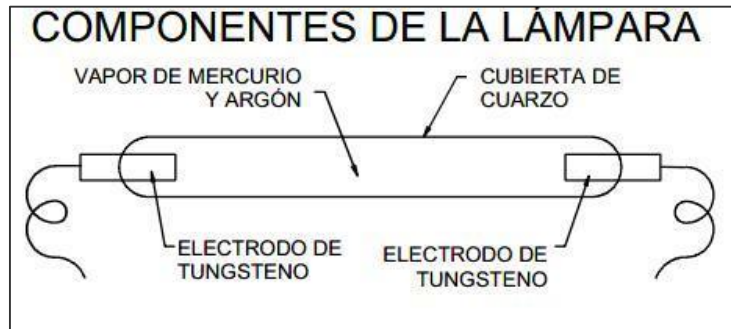


Figura 2: Componentes de una lámpara utilizada para Radiación Ultravioleta (UV)
<https://www.acondicionamientos.com.ar/tratamiento-de-agua-con-luz-ultravioleta/>

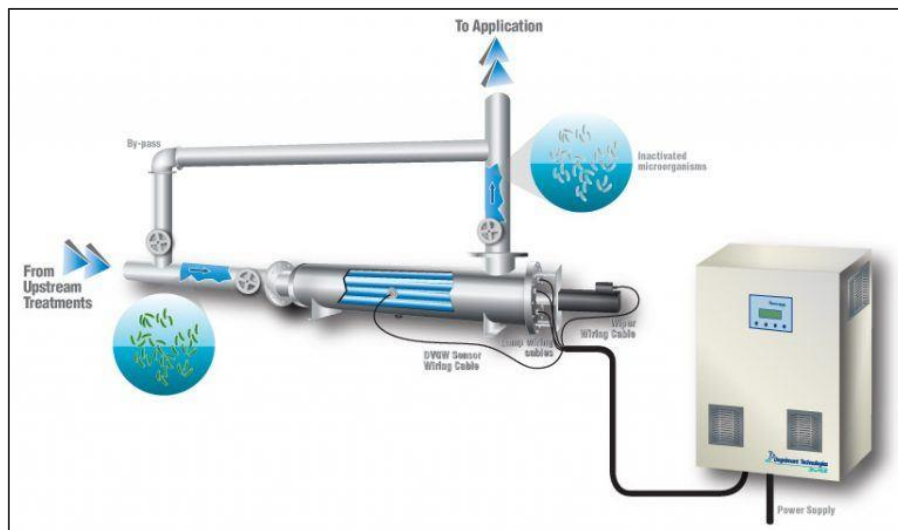


Figura 3: Planta de Tratamiento de agua de lastre con Radiación UV.
<https://honestcable.com/es/sistema-de-tratamiento-de-agua-de-lastre/>

4.2.1. Otros Métodos Físicos

Otros métodos incluyen el uso de ultrasonido, el calentamiento (tratamiento térmico), y la desoxigenación. El tratamiento térmico es altamente eficaz, pero la energía requerida para calentar grandes volúmenes de agua de lastre hace que no sea rentable ni práctico para la mayoría de los buques.

La desoxigenación: Es un tratamiento efectivo para eliminar la vida marina que depende del oxígeno en este mecanismo se utiliza gas inerte (usualmente nitrógeno, generado a bordo o almacenado) para inyectarlo en los tanques de lastre. Esto reduce drásticamente la concentración de Oxígeno Disuelto en el agua hasta niveles anóxicos (cerca de 0 ppm). La falta de oxígeno inhibe las funciones vitales de los organismos aeróbicos (que necesitan oxígeno para respirar), llevándolos a la inactivación o muerte. La inyección de nitrógeno también se utiliza para inertizar la atmósfera dentro del tanque. Esto reduce el riesgo de incendio o explosión si en el tanque se hubieran introducido vapores inflamables, algo crucial en los tanques de buques tipo Tanque o Petroleros.

Aunque es viable como tratamiento, el principal problema de la desoxigenación es la creación de un ambiente peligroso de Atmósfera Inerte (Asfixia). Esto es peligroso al realizar trabajos o inspecciones en espacios cerrados a bordo, como los tanques de lastre, tanques adyacentes o compartimentos de servicio. La inyección de gas requiere, por lo tanto, la implementación de protocolos de seguridad extremadamente estrictos (como el uso de aparatos respiratorios autónomos) y un monitoreo constante de oxígeno para cualquier entrada a estos espacios. Además, el control riguroso de la presión dentro del tanque es esencial, ya que los tanques de lastre no están diseñados para operar bajo alta presión. Por lo tanto, se requiere un sistema de control de presión robusto con válvulas de alivio para liberar el exceso de gas inerte y evitar daños estructurales al tanque; si estas válvulas fallan o si la presión no se maneja adecuadamente, la integridad del casco del buque podría verse seriamente comprometida. Debido a la extrema peligrosidad que representa para la tripulación el manejo constante de atmósferas inertes letales y la complejidad del manejo de la presión, métodos como la Radiación UV y la Electrólisis han predominado en el mercado de BWMS, relegando la desoxigenación a un uso limitado o especializado (Rodríguez González, 2019; Ron et al., 2013).

Tratamiento Térmico (Calor): Se calienta el agua a temperaturas letales. El calor desnaturaliza las proteínas y destruye las membranas celulares, matando a los organismos. Una de sus limitaciones más importantes es el alto consumo de energía para calentar grandes volúmenes de agua en poco tiempo. Calentar grandes volúmenes de agua de lastre (que pueden ascender a miles de metros cúbicos) desde la temperatura ambiente del mar hasta el umbral letal (generalmente 40°C a 45°C o más) en el tiempo limitado que dura una operación de lastrado o deslastrado, exige una demanda energética masiva (Saifilter, S.A., 2023).

4.3 Tratamientos Químicos: Biocidas y Electrólisis

Los tratamientos químicos se basan en el uso de biocidas o en la generación in situ de sustancias activas para destruir los organismos.

Electrólisis

El método electroquímico es uno de los más extendidos y efectivos, especialmente en buques que operan en agua de mar. El proceso de electrólisis aplica una corriente eléctrica al agua de lastre salada, generando una mezcla de oxidantes activos, siendo el hipoclorito de sodio (NaClO) el principal agente biocida. El sistema toma agua de mar y la pasa a través de un reactor electrolítico. El hipoclorito generado se inyecta en el flujo principal del agua de lastre, asegurando la desinfección.

Estos sistemas son altamente efectivos para cumplir con la Norma D-2. Sin embargo, dado que se introducen sustancias activas en el agua, deben garantizar que, al momento de la descarga, los niveles de estos subproductos (como el Cloro Residual Total, TRC) no excedan los límites permitidos, requiriendo obligatoriamente una etapa de neutralización antes del deslastre.

Uso directo de Biocidas

Algunos BWMS utilizan la dosificación de biocidas, como el dióxido de cloro o el peróxido de hidrógeno. Al igual que la electrólisis, estos sistemas requieren una aprobación rigurosa por parte de la OMI y deben demostrar que los químicos residuales se neutralizan antes de ser descargados para evitar la toxicidad en las aguas receptoras.

El uso directo de biocidas como tratamiento de agua de lastre no está aprobado por la Organización Marítima Internacional (OMI) como método de gestión independiente; sin embargo, pueden ser parte de un sistema de tratamiento que debe ser aprobado por la OMI y seguir la Regla D-3 del Convenio sobre Gestión del Agua de Lastre. El Convenio sobre el Agua de Lastre (BWM, 2004) permite sistemas que usan biocidas para cumplir con los estándares de tratamiento, pero estos sistemas deben ser aprobados de acuerdo con el Código BWMS y utilizados según un Plan de Gestión del Agua de Lastre.

4.4. Sistemas Híbridos y Protagonistas

La mayoría de los BWMS que han recibido la aprobación de la OMI son sistemas combinados, capitalizando las fortalezas de cada método: BWMS Aprobado = Tratamiento Mecánico (Filtración) más Tratamiento de Desinfección UV o Electrólisis

Ejemplos de BWMS Comunes:

Por un lado, se encuentran los sistemas mecánicos que combinan la filtración con un tratamiento físico mediante luz ultravioleta (UV). Este tipo de tecnología es muy utilizada en buques que operan principalmente en aguas claras, donde la efectividad del UV es óptima.

Por otro lado, los sistemas mecánicos que integran filtración con un tratamiento químico basado en electrólisis son preferidos en buques de gran capacidad que navegan en zonas con alta salinidad y turbidez variable. En estos entornos, el tratamiento UV pierde eficiencia, por lo que la electrólisis resulta más adecuada. Sistemas como el “JFE BallastAce” y otros basados en electrólisis son ampliamente reconocidos por su rendimiento y fiabilidad.

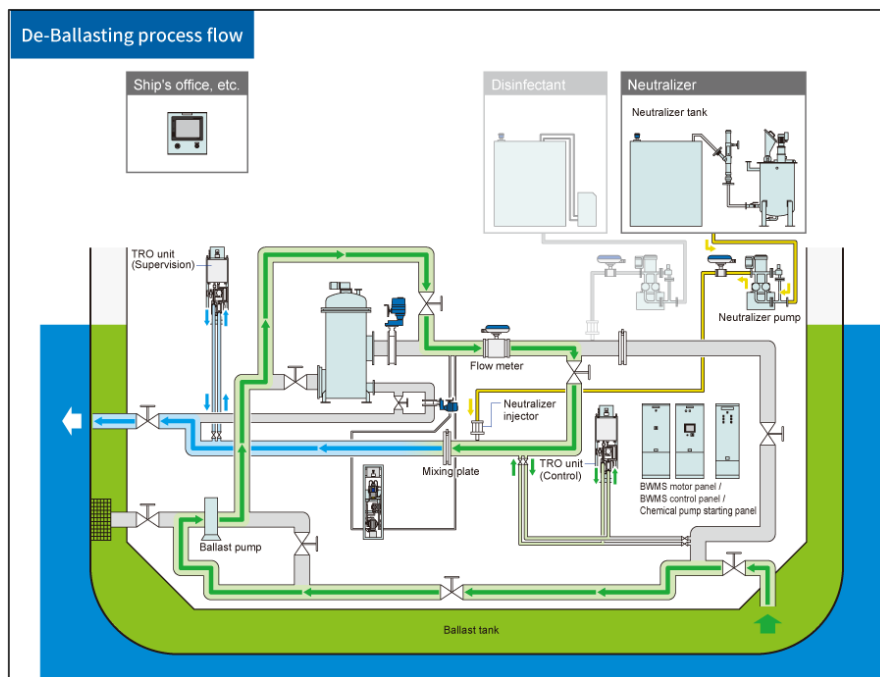


Figura 4: Flujo del proceso de lastre “JFE BallastAce”
<https://jfe-ballast-ace.com/product/>

CAPÍTULO 5. IMPLEMENTACIÓN Y DESAFÍOS TECNOLÓGICOS A BORDO:

La instalación de un BWMS en un buque operativo presenta una serie de desafíos técnicos y logísticos significativos que la industria naviera ha tenido que superar.

Desafíos de Integración a Bordo

La principal dificultad para la implementación de los BWMS en buques existentes (retrofit) es el espacio físico disponible. Los sistemas de tratamiento, especialmente los basados en electrólisis o los que requieren grandes bancos de reactores UV, ocupan un espacio considerable. El diseño del buque original no preveía la instalación de estos equipos, lo que obliga a complejas modificaciones de tuberías y maquinaria que incluyen desafíos técnicos como:

- **Consumo de Energía:** Los sistemas requieren una cantidad significativa de energía para operar, lo que puede sobrecargar el sistema eléctrico del buque.
- **Mantenimiento y Durabilidad:** Los BWMS están expuestos a un ambiente marino corrosivo. El mantenimiento de filtros, lámparas UV, o celdas electrolíticas es crucial y debe integrarse en los programas de mantenimiento del buque.
- **Operatividad en Diferentes Tipos de Agua:** El rendimiento de muchos sistemas depende de la calidad del agua. Los BWMS deben ser aprobados para funcionar de manera efectiva en un amplio rango de condiciones hídricas.

5.1 Inspección y Control del Cumplimiento de la Certificación a Bordo.

La eficacia del Convenio BWM, no reside únicamente en la tecnología a bordo, sino también en el riguroso sistema de fiscalización, certificación y control establecido.

Todo buque sujeto al Convenio debe someterse a inspección y certificación según su artículo N° 7. Las inspecciones incluyen:

- **Inspección Inicial:** Antes de que el buque entre en servicio o antes de que se expida el certificado por primera vez.
- **Inspecciones Anuales, Intermedias y de Renovación:** Para asegurar que los equipos, el buque y el Plan de Gestión de Agua de Lastre se mantengan en cumplimiento con las normas del Convenio.

El cumplimiento se documenta a través del Certificado Internacional de Gestión del Agua de Lastre y el Libro de Registro de Agua de Lastre. Este libro es esencial para auditar la trazabilidad de las operaciones de lastre y tratamiento, especificada en el Reglamento "E". (BWM, 2004).

5.2. Control del Estado Rector del Puerto (PSC)

El Artículo 9 (Inspección de Buques) otorga a los funcionarios de control del Estado Rector del Puerto (PSC) la autoridad para inspeccionar buques extranjeros que hacen escala en sus puertos. La inspección del PSC se realiza en tres etapas (Protocolos de Verificación):

1. Inspección Inicial (Paso 1): Verificación de la documentación (Certificado, Libro de Registro, Plan BWM).
2. Inspección Detallada (Paso 2): Si surgen dudas o la documentación es deficiente, se realiza una inspección más exhaustiva de las bombas, el sistema BWMS y la toma de muestras de agua de lastre.
3. Toma de Muestras (Paso 3): Los inspectores pueden tomar muestras del agua de lastre para verificar el cumplimiento con la Norma D-2.

5.2.1. Desafíos de la Verificación D-2

El control de la Norma D-2 en puerto es un desafío técnico, ya que la toma de muestras y el análisis de la viabilidad de los organismos (especialmente el estándar de salud humana) son complejos. Los protocolos de verificación deben garantizar que los buques no descarguen agua de lastre si existe una amenaza para el medio ambiente o la salud humana. Las Partes que realicen la inspección deben adoptar las medidas necesarias, pudiendo detener el buque, para garantizar que este no descargue agua de lastre hasta que se resuelva el problema (BWM, 2004 art 9).

5.3. Evaluación y Gestión de Modificaciones en los BWMS Homologados.

Al analizar la implementación en el mantenimiento y actualización de los Sistemas de Gestión de Agua de Lastre (BWMS) que están en servicio, dado que los buques operan por décadas, es inevitable que éstos sistemas homologados necesiten modificaciones por

causas como la obsolescencia de componentes, problemas en la cadena de suministro, o simplemente la búsqueda de una mayor rentabilidad y rendimiento.

Para gestionar estos cambios sin comprometer la eficacia del sistema, la OMI ha establecido un procedimiento de evaluación que se basa en la criticidad del componente modificado. El alcance de la revisión que se hace es proporcional al efecto que la modificación puede tener en el BWMS.

El primer paso es clasificar el componente que vamos a modificar:

1. Componentes Principales: Estos son los que afectan directamente la capacidad del sistema para cumplir con la estricta norma de descarga D-2. Si cambio un filtro, un módulo ultravioleta (UV) o una unidad de electrocloración, estoy tocando el corazón del tratamiento.
2. Componentes Secundarios: Estos son componentes de soporte que no afectan directamente la eficacia anti-organismos. Se trata de bombas, válvulas, fusibles o sensores de uso común.

En el proceso de evaluación el tipo de componente modificado determina la complejidad de la nueva homologación. Si la modificación es de un Componente Principal la Administración Marítima exige una evaluación exhaustiva y, con frecuencia, pruebas pormenorizadas. El objetivo es demostrar que, a pesar del cambio, el sistema mantiene la seguridad y sigue cumpliendo la norma D-2 con la misma eficacia que el sistema original. Si la modificación es de un Componente Secundario, el procedimiento se simplifica. Si nuestra evaluación demuestra que la modificación no afecta la seguridad del buque ni el funcionamiento normal del BWMS, la Administración puede aplicar un proceso más ágil para actualizar el certificado de homologación. Solo se requerirán pruebas adicionales si hay dudas sobre si el nuevo componente es funcionalmente equivalente al anterior.

Finalmente, si el BWMS en cuestión utiliza sustancias activas, se debe aplicar las directrices adicionales específicas para garantizar que la modificación no altere la evaluación ambiental y toxicológica original.

Este procedimiento me permite, como operador o diseñador, mejorar o mantener los BWMS de manera eficiente, siempre priorizando la eficacia biológica y la seguridad del buque según lo que exige el Convenio BWM. (OMI, 2017).

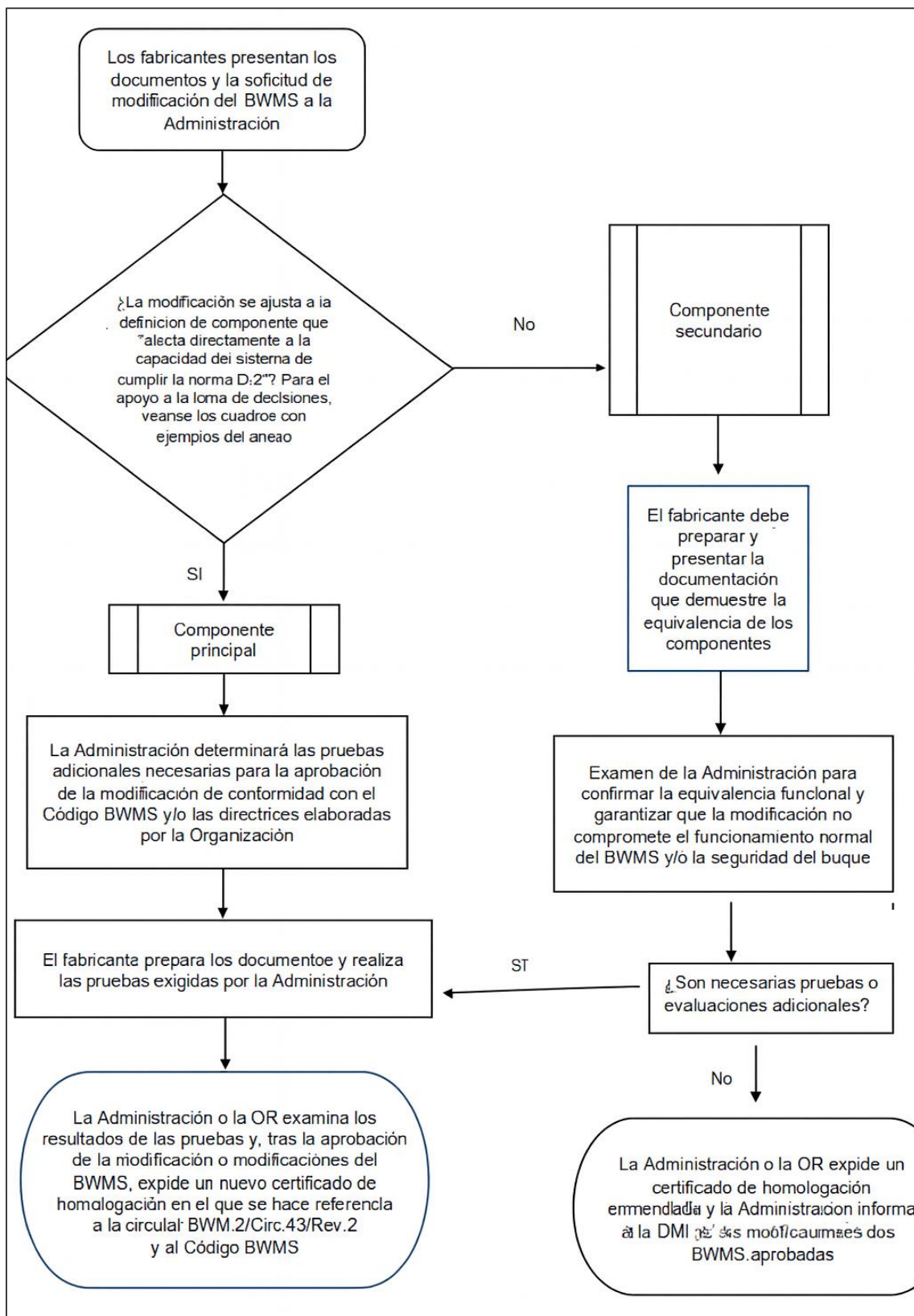


Figura 5: Cuadro sinóptico de Modificaciones en los BWMS Homologados (OMI, 2024)

Cuadro 1 Ejemplos de componentes principales			
Inyección química	Electrocloración	Separación mecánica	Irradiación ultravioleta
<ul style="list-style-type: none"> TRO o sensor pertinente (si forma parte del sistema) 	<ul style="list-style-type: none"> Cámara/célula electrolítica (si la modificación altera la especificación técnica, por ejemplo, ánodo de geometría, producción de cloro) Sensor de TRO 	<ul style="list-style-type: none"> Filtro (si la modificación altera la especificación técnica, por ejemplo, malla, tecnología de autolimpieza) 	<ul style="list-style-type: none"> Cámara UV (si la modificación altera la especificación técnica de la cámara UV, por ejemplo, la geometría, la capacidad reflectante de la superficie interior o la disposición de la lámpara UV). Sensor de intensidad UV o de transmitancia UV (según proceda) Lámparas de rayos UV Manguitos de cuarzo UV

Figura 6: Ejemplo de componentes principales (OMI, 2024)

Solo se consideran modificaciones de un componente principal las modificaciones de software que tengan el potencial de afectar directamente a la eficacia biológica.

Cuadro 2 Ejemplos de cambios o modificaciones que afectan a los componentes principales			
Inyección química	Electrocloración	Separación mecánica	Irradiación ultravioleta
<ul style="list-style-type: none"> Formulación de la sustancia activa Software* Dosis 	<ul style="list-style-type: none"> Software* Dosis 	<ul style="list-style-type: none"> Diseño de la malla del filtro Luz de la malla del filtro Fabricante de filtros o de la tecnología de separación Tecnología de autolimpieza Eliminación del filtro Superficie del filtro 	<ul style="list-style-type: none"> Software* Dosis

Figura 7: Ejemplo de cambios o modificaciones que afectan a los componentes principales (OMI, 2024)

Los componentes del cuadro 3 pueden no considerarse secundarios si la Administración determina que pueden afectar a la capacidad del BWMS para ajustarse a la norma D-2.

Cuadro 3			
Ejemplo de componentes secundarios – se presentan especificaciones técnicas similares			
<ul style="list-style-type: none"> • Interruptor de accionamiento • Botón de accionamiento /activación • Bocina de alarma • Cableado • Disyuntores • Unidad CIP (dispositivo de limpieza <i>in situ</i>); • Sensor de conductividad • Transmisor de conductividad • Soplador de dilución 	<ul style="list-style-type: none"> • Armario eléctrico • Bomba de retrolavado del filtro • Motor para limpiar filtros • Caudalímetro • Fusibles • Detector de gas • Intercambiador de calor (no pasteurización) • Pantalla táctil de la interfaz hombre-máquina (HMI) • Caja de empalmes 	<ul style="list-style-type: none"> • Bomba de mezcla, circulación o inyección • Materiales de las tuberías • Transmisor de presión • Controlador lógico del programable (PLC) • Rectificador • Panel de funcionamiento a distancia • Transmisor de salinidad • Sensor, diferencial de presión • Sensor, temperatura 	<ul style="list-style-type: none"> • Señalización • Interruptor, temperatura • Bloques terminales • Panel táctil • Transformador • Válvulas • Interruptor de nivel de agua

Figura 8: Ejemplo de componentes secundarios y técnicas similares (OMI, 2014)

CAPÍTULO 6. MECANISMO DE REVISIÓN (REGLAMENTO D-5):

El Convenio BWM se considera un documento "vivo", sujeto a revisión y mejora continua a la luz de los avances científicos y tecnológicos. Esta naturaleza dinámica se formaliza en el Reglamento D-5, el cual establece la obligación de la OMI de revisar la Norma de Rendimiento del Agua de Lastre (D-2) periódicamente. Esta revisión es esencial para asegurar que la regulación se mantenga relevante y viable, y debe considerar una serie de criterios críticos que equilibran la protección ambiental con la realidad operativa y económica del sector marítimo: la Aceptabilidad Ambiental, garantizando que las prácticas de gestión no causen daños mayores a los que previenen en el propio medio ambiente; la Viabilidad, asegurando la compatibilidad de los sistemas con el diseño y las operaciones de los buques; la Rentabilidad (Costo-Eficacia), mediante la evaluación de los efectos socioeconómicos, prestando especial atención a las necesidades de desarrollo de los países en desarrollo; y finalmente, la Eficacia Biológica, que es la capacidad real de las tecnologías para eliminar o inactivar los Organismos Acuáticos Nocivos y Patógenos (OANP).

6.1. La Cooperación Internacional y Asistencia Técnica

El Convenio reconoce que la implementación es un esfuerzo global que requiere asistencia. Se insta a las Partes a prestar apoyo a aquellas que soliciten asistencia técnica para la capacitación de personal, garantizar la disponibilidad de la tecnología y el equipo pertinente, e iniciar programas conjuntos de investigación y desarrollo. La cooperación regional, tal como se promueve en el Convenio, es crucial para armonizar las medidas adicionales que una Parte puede imponer (BWM, 2004 art.13)

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES:

La tecnología de los Sistemas de Gestión de Agua de Lastre (BWMS) ha evolucionado de ser una idea conceptual a un requisito operativo estándar en el transporte marítimo internacional, siendo el Convenio BWM el catalizador de esta transformación. El enfoque de este Trabajo Final Integrador demuestra que el Convenio impulsó una revolución en la operatividad de los buques al establecer el Estándar de Rendimiento Biológico, el cual fijó límites rigurosos (como menos de 10 organismos viables por metro cúbico para los más grandes), haciendo obsoleta la práctica transitoria del Intercambio de Agua de Lastre. Este estándar se convirtió en un requisito de habilitación esencial para que los buques de tráfico internacional pudieran garantizar la continuidad de sus operaciones. La solución tecnológica dominante y más robusta para alcanzar consistentemente este rendimiento es el sistema híbrido de Filtración más Desinfección avanzada, el cual se basa en la sinergia de componentes: la Filtración como pre-tratamiento crítico cuya función es eliminar organismos grandes y, crucialmente, reducir la turbidez del agua para asegurar la máxima eficiencia del tratamiento posterior; y la Desinfección, que actúa neutralizando los organismos restantes. Las dos principales vías de desinfección son el Tratamiento Físico por Radiación Ultravioleta (UV), un método limpio sin subproductos químicos pero con eficacia limitada en aguas muy turbias o con alta concentración de sólidos, y el Tratamiento Químico por Electrólisis o el uso de Sustancias Activas (como el sistema JFE BallastAce), que demuestran una eficacia superior en aguas de alta salinidad y turbidez variable, aunque requieren un proceso de neutralización posterior para reducir el Cloro Residual Total (TRC) antes de la descarga, cumpliendo así con las normas ambientales de la Convención.

Para los buques en operación, la selección del sistema más conveniente se rige por la viabilidad técnica y la costo-eficacia en función de sus rutas marítimas. La implementación de BWMS ha implicado superar importantes retos de integración, como la limitación de espacio físico a bordo, la gestión del alto consumo de energía requerido y la necesidad de establecer un riguroso programa de mantenimiento de filtros y celdas. La fiabilidad de los sistemas es una preocupación comercial central: el éxito para el armador radica en seleccionar una tecnología robusta y aprobada bajo el estricto Código BWMS de la OMI. En definitiva, la innovación en BWMS ya no es una opción, sino una necesidad operativa que garantiza la continuidad comercial de los buques. El cumplimiento constante del Estándar de Rendimiento Biológico minimiza los riesgos de detención por Control del Estado Rector del Puerto, que es el órgano fiscalizador facultado para verificar el correcto funcionamiento del equipo. De esta manera, el riguroso control del PSC y la continuidad de la innovación tecnológica son pilares interdependientes que aseguran la libre circulación de la flota mundial en el comercio marítimo global.

Referencias

Boltovskoy, D., Correa, N y Almada, P (2011). Invasiones biológicas: evaluación de la amenaza de la descarga de agua de lastre en puertos de la Patagonia (Argentina)

Gollasch, S. (2007). *Analysis of the Ballast Water Management Convention and its Implementation Challenges*. Marine Environmental Research, 64(5), 570–585.

Núñez Arellano, L. M. (2021). *Planta de Lastre para Buques de Tráfico Marítimo Internacional (Tesis de Maestría en Gestión Marítima y Portuaria)*. Universidad del Pacífico, Guayaquil, Ecuador.

Organización Marítima Internacional (OMI). (2004). *Convenio Internacional para el Control y la Gestión del Agua de Lastre y los Sedimentos de los Buques*. (BWM 2004).

Rodríguez González, D. (2019). *Gestión y control sanitario de las aguas de lastre en buques*. Universidad de La Laguna, Santa Cruz de Tenerife, España.

Ron, L. (2020). *Protocolos de verificación para el control de descarga de agua de lastre de los buques en puerto (BWM 2004; D-2)*. Instituto Universitario de Seguridad Marítima, Buenos Aires, Argentina.

Ron, L., Correa, N., & Paolucci, E. (2021). *Agua de lastre: Legislación y nuevos tratamientos para prevenir la introducción de especies exóticas*. *Ciencia Hoy*, 30(176), 32–37.

Organización Marítima Internacional. (2017). *Directrices para los Estados de abanderamiento sobre la planificación de las inspecciones relativas al Convenio BWM (BWM.2/Circ.43/Rev.2)*. OMI.