

Las aplicaciones de la cadena de frío en buques pesqueros

Informes sobre las tecnologías de la cadena de frío

Por cortesía de Kristina N. Widell, Eirik S. Svendsen, Souhir Hammami, Monique Baha
Instituto Internacional de la Refrigeración (IIR)

RESUMEN

La industria pesquera global afronta un doble desafío: existe una falta de sistemas de enfriamiento adecuados a bordo que conduce a una pérdida significativa de alimentos, y el uso continuado de refrigerantes con un alto PCG amenaza la integridad ambiental y la salud pública.

Este informe expone el panorama general de las tecnologías de refrigeración empleadas en buques pesqueros, la repercusión ambiental de los refrigerantes utilizados y también presenta tecnologías energéticamente eficientes y respetuosas con el medioambiente. La seguridad y sostenibilidad de la refrigeración en buques pesqueros abarca la gestión adecuada de los sistemas establecidos para prevenir las fugas de refrigerante, además de la investigación y desarrollo permanente para perfeccionar la eficiencia energética general de estos sistemas.

También se incluyen algunas recomendaciones de soluciones tecnológicas para mejorar el uso, la flexibilidad y la eficiencia operativa de la energía, como pueden ser, la digitalización para optimizar el mantenimiento y el diseño de los sistemas o las soluciones de calefacción y enfriamiento integradas como, por ejemplo, la recuperación del calor residual o el almacenamiento de energía térmica en frío.

INTRODUCCIÓN

Una modernización de la cadena de frío mundial basada en tecnologías eficientes y refrigerantes sostenibles reduciría las emisiones de CO₂ de la cadena de frío existente en casi un 50%, y evitaría hasta el 55% de las pérdidas de alimento que actualmente se atribuyen a los fallos en la cadena de frío.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), a escala global, las infraestructuras deficientes en la cadena de frío contribuyen a la pérdida de entre el 30% y el 35% de la producción anual de productos alimentarios marinos (FAO, 2022). Unas pérdidas que alcanzan hasta el 50 % en el caso de las pesca en pequeña escala (FAO, 2018). El Instituto Internacional de la Refrigeración (IIR) estima que, en el año 2017, se perdió el 19% del pescado y de los mariscos producidos para uso alimentario debido a una cadena de frío deficiente (Figura 1).

Un gran desafío radica en la falta de sistemas adecuados de enfriamiento y congelación en muchos buques pesqueros. Esto resulta en el deterioro y la reducción de la calidad del producto, así como, mayores descartes, lo que provoca el desperdicio de alimento y de la energía empleada para su captura. Algunas embarcaciones utilizan conservantes químicos como ácidos o formol, lo que puede poner en riesgo tanto la calidad como la salubridad del producto.

El enfriamiento inmediato de la captura a una temperatura cercana a la temperatura de fusión del hielo (0°C) es una mejor

LA PRODUCCIÓN DE PESCADO Y MARISCO PERDIDA ANTE LA FALTA DE REFRIGERACIÓN (POR REGIÓN)

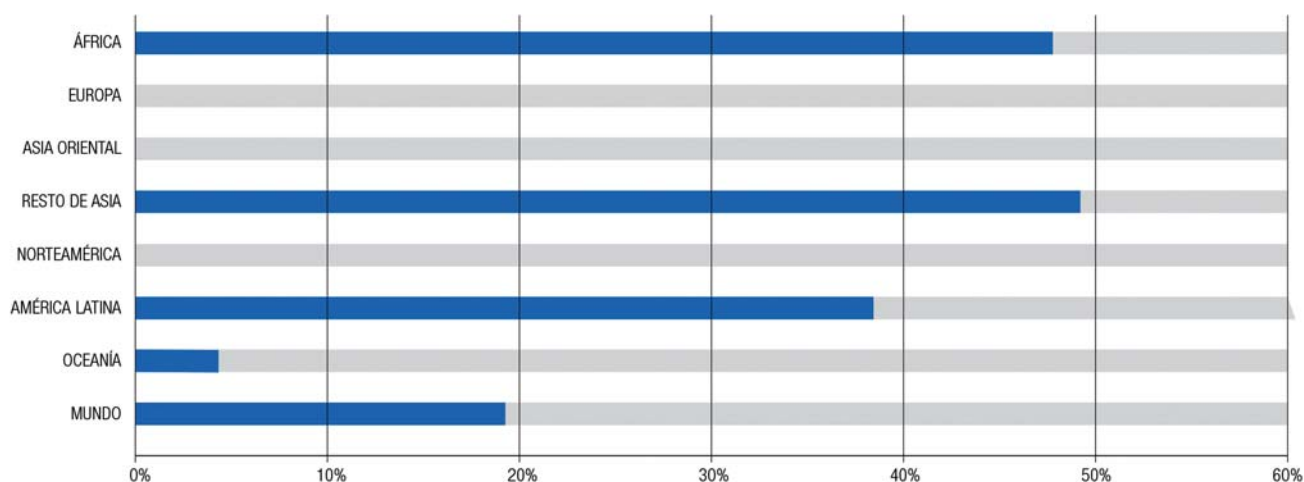


Figura 1: Según el IIR, proporción de pescado y marisco producido en el año 2017 para uso alimentario, que se perdió por la falta de refrigeración (Sarr et al. 2023)

alternativa para garantizar una vida de almacenamiento mas duradera (Figura 2). En función de las practicas pesqueras (p. ej.: la duración de la campana) y las especies de pez, es posible que la congelación a bordo sea mas conveniente que el enfriamiento (Wibawa et al., 2022).

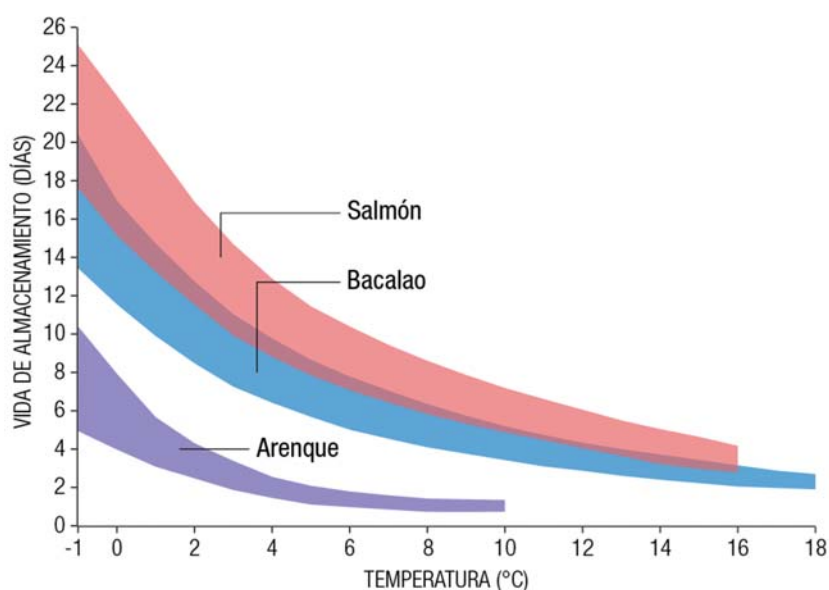


Figura 2: Correlación entre la temperatura y la vida de almacenamiento de tres especies de pescado diferente (Adaptación de Magnussen, 1993)

El enfriamiento o la congelación a bordo logra reducir significativamente las emisiones totales de gases de efecto invernadero al evitar la pérdida de alimento y preservar productos perecederos. No obstante, si la electricidad que suministra los sistemas frigoríficos es producida con generadores alimentados con combustibles fósiles, la aplicación de sistemas de Refrigeración a bordo aumentaría la demanda energética y las emisiones. Asimismo, las estimaciones de la Organización Marítima Internacional (OMI) (OMI, 2020) apuntan a que las fugas del refrigerante R-22 en el transporte marítimo representan, anualmente, alrededor de 2,88 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente ($\text{CO}_{2\text{eq}}$).

Por lo tanto, los sistemas energéticamente eficientes y bien diseñados que usen refrigerantes con bajo PCG son fundamentales para reducir las emisiones de GEI.

Durante la instalación de nuevos sistemas, se debe optar por refrigerantes naturales con el fin de evitar la contaminación por sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS), un subproducto producido por la degradación atmosférica de algunos refrigerantes de hidrofluoroolefina (HFO) con bajo PCG. Del mismo modo, al tomar en consideración combustibles hipocarbónicos alternativos y al optimizar el consumo de este mediante una operación eficiente del motor, se contribuiría a la reducción de las emisiones totales.

Este informe técnico pretende concientizar sobre las tecnologías de refrigeración vigentes y futuras empleadas en buques pesqueros.

2.- PANORAMA GENERAL DE LOS BUQUES DE PESCA REFRIGERADOS

2.1 Las practicas y los tipos de buques pesqueros

Conforme a la FAO (FAO, 2024), en el año 2022, la flota pesquera mundial ascendía a un total aproximado de 4,9 millones de barcos, de los cuales, dos tercios estaban motorizados. Esto revela un descenso en comparación al pico de 5,3 millones registrado en el año 2019. Predominan los barcos en pequeña escala, al constituir cerca del 89% de la flota total. Asia se mantiene a la cabeza de la actividad pesquera ya que representa el 71% de la flota mundial, principalmente en China, India e Indonesia (FAO, 2024).

Los buques pesqueros se sirven de una amplia variedad de artes de pesca Según la especie objetivo y la escala de operación. La pesca industrial o a gran escala cuenta, sobre todo, con redes de arrastre de fondo, redes de cerco con jareta y palangres pelágicos. Se trata de métodos que prevalecen en los volúmenes de captura mundial, pero cuya repercusión ambiental varía considerablemente. Por el contrario, la pesca en pequeña escala aplica artes de pesca mas sencillas como redes de enmalle, líneas de mano y trampas. En general, estas artes suelen tener tasas mas bajas de captura incidental, pero son a las que recurren la mayoría de la mano de obra pesquera mundial.

Los métodos de procesamiento pueden variar significativamente entre regiones, desde el momento de la captura hasta que llegan a manos del consumidor. Sin embargo, la FAO declara que la Refrigeración, en concreto, la congelación, es el método principal para la conservación de la pesca y los productos de la acuicultura para uso alimentario (FAO, 2024). La Figura 3 ilustra diferencias regionales considerables en cuanto a la proporción de pescado y marisco producido refrigerado para uso alimentario, lo que pone de relieve las desigualdades en el acceso a las infraestructuras de la cadena de frío a escala global. Este gráfico está fundamentado en una investigación con un enfoque top-down (de arriba hacia abajo) en la que se examinaban múltiples factores de manera conjunta. Ofrece un indicador general de las fluctuaciones entre regiones, pero no aporta ninguna información específica por país ya que esto puede variar significativamente entre naciones. Por ejemplo, pese a que se indica que Europa tiene un alcance del 100% en materia de Refrigeración, este no sería el caso de los pequeños buques pesqueros puesto que aun existe margen de mejora.

Las practicas de refrigeración a bordo de buques pesqueros varían de manera notable conforme al tipo de barco y método de pesca. La Tabla 1 resume los tipos de practica de refrigeración según el tipo de barco.

Tipo de barco	Prácticas de refrigeración
Arrastreros	Sistemas de AMR, almacenamiento de hielo, cadenas de suministro y congelación a bordo
Cerqueros con jareta	Sistemas de AMR, congelación hasta -50°C , bombas para descarga de pescado para traslado a bordo
Palangreros	Congeladores de temperatura ultra baja, tanques vivero
Embarcaciones de pesca con redes de enmalle	Almacenamiento de hielo, algunos equipados con congeladores y cadenas de suministro
Arrastreros-factoría	Planta de transformación completa a bordo que incorpore: estación de evisceración, fileteado, congelado y envasado
Cargueros de pescado / Buques frigoríficos	Bodegas refrigeradas destinadas al transporte del pescado y de los productos pesqueros
Buque para la pesca con trampas	Depósito de hielo, tanques de almacenamiento para crustáceos vivos
Embarcaciones polivalentes	Combinación de los sistemas de AMR, hielo y congelado según el arte de pesca y tipo de captura

Tabla 1: Resumen de los sistemas frigoríficos según el tipo de buque pesquero. (Ruiz, 2012; Shawyer y Pizzali, 2003; Widell et al., 2023) Esta información fue recopilada mediante un trabajo de documentación y puede variar en función de las características técnicas del barco, las prácticas regionales y las condiciones operativas.

RATIO DE PESCADO Y MARISCO REFRIGERADO (POR REGIÓN)



Figura 3: Proporción de pescado y marisco producido para uso alimentario en el año 2017 que es realmente refrigerado, de acuerdo con el IIR. (Sarr et al., 2023)

2.2 La refrigeración a bordo

Los pequeños buques pesqueros artesanales no tienen sistemas frigoríficos instalados. Los buques pesqueros motorizados en pequeña escala transportan el hielo desde la orilla o tienen un pequeño sistema frigorífico a bordo. Los barcos de escala comercial mediana a grande se componen, por lo general, de tanques con agua de mar refrigerada (AMR), congeladores de placas o máquinas de hielo. En cambio, los grandes buques industriales que navegan largas distancias o prolongadas travesías, que habitualmente duran varios meses, requieren de la ultracongelación para conservar el pescado. Conforme a la especie de pescado, arte de pesca y necesidades de transformación, a menudo, estas embarcaciones están completamente equipadas con instalaciones de fábrica, las cuáles incluyen una variedad de sistemas energéticos y de transformación, como túneles de congelación, congeladores de placas, tanques AMR y máquinas de hielo. Esta sección proporciona ejemplos de los diferentes tipos y capacidades de los sistemas frigoríficos.

2.2.1 Los sistemas de agua de mar refrigerada (AMR)

El agua de mar refrigerada es un método extensamente empleado para enfriar muy rápido grandes cantidades de pescado. Se utiliza con frecuencia a bordo de cerqueros con jareta, arrastreros y barcos de palangre pelágicos y de grandes dimensiones. Un sistema AMR integra una unidad frigorífica que enfría el agua de mar a una temperatura entre los 1,5°C y los 0,5°C. El agua de mar enfriada circula a través de múltiples tanques, todo ello organizado por una red de tuberías, válvulas y grandes bombas para agua de mar, como se puede ver en la Figura 4.

CASO DE ESTUDIO: LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS AMR EN LA PESCA PELÁGICA DE NORUEGA

Hace más de cinco décadas que los buques pesqueros que navegan por las aguas de Noruega usan los sistemas de agua de mar refrigerada, en especial, en las pesquerías pelágicas enfocadas en especies como el arenque o la caballa. Estos barcos, que tienen una longitud de entre 50 a 80 metros, están diseñados para manejar cuantiosas cantidades de captura, a menudo, hasta 1000 toneladas. Esto requiere de medidas resistentes para el enfriamiento a bordo, cuya finalidad es la de preservar la calidad del producto.

Los sistemas AMR a bordo de estos barcos acostumbran a utilizar el amoníaco como refrigerante en vista de su alta eficiencia e idoneidad para operaciones a gran escala. No obstante, los sistemas de CO₂ comienzan a surgir como alternativas para capacidades más pequeñas: su manejo es más seguro y presentan menos riesgos para la salud en el supuesto de fuga. Para satisfacer las exigentes necesidades de enfriamiento, es común que los barcos más grandes operen con dos o tres unidades AMR de amoníaco, de manera que, cada una emite aproximadamente 1 MW de capacidad de enfriamiento. Esta configuración garantiza la seguridad, el enfriamiento rápido y la conservación óptima desde el momento de captura.

2.2.2 Los sistemas AMR con CO₂

Las unidades frigoríficas compactas que ahorran espacio, sobre todo, los compresores, brindan ventajas para los barcos con espacio limitado. En regiones con climas más fríos, las unidades de CO₂ subcrítico y transcrito son bastante populares ante su compactibilidad y su alto coeficiente de rendimiento frigorífico (COP, por sus siglas en inglés), al proporcionar una solución energéticamente eficiente. La disponibilidad de los componentes, su seguridad y compactibilidad son las causas del aumento de la cuota de mercado. Los sistemas pequeños de CO₂ son compatibles con las soluciones AMR de enfriamiento y de congelación, las cuáles proporcionan una alternativa simple y energéticamente eficiente para algunos tipos de barco (Soylemez *et al.*, 2022).

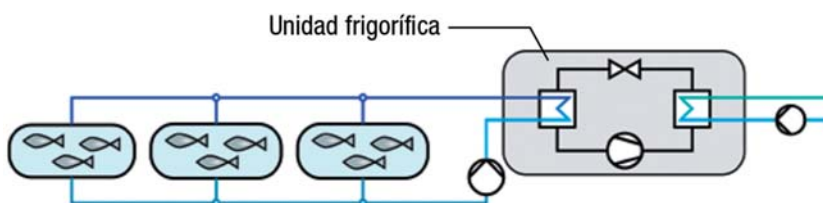


Figura 4: Diseño principal de un sistema AMR.
El agua de mar se extrae del océano y, después se enfría y circula por los tanques que albergan la captura. (SINTEF)

Los buques pesqueros que operan en aguas marinas con temperaturas elevadas, a menudo, entorno a los 30°C, tienen que lidiar con desafíos distintos en lo que respecta a la refrigeración a bordo. La tecnología de enfriamiento elegida dependerá, en gran medida, de las necesidades básicas de refrigeración de la embarcación. Para los barcos cuyo requisito preponderante es el enfriamiento con AMR, el amoníaco (R-717) sigue siendo la alternativa más eficiente en términos energéticos ya que posee unas propiedades termodinámicas excepcionales y una alta capacidad de enfriamiento (Bodys *et al.*, 2018).

Pero, cuando también se necesita congelación a bordo, en particular, para conservar especies de alto valor, se contemplará un sistema en cascada que combine R-717 y CO₂ (R-744). Estos sistemas pueden alcanzar temperaturas de congelación tan bajas como los 50°C en la etapa de CO₂, lo que los hace adecuados para aplicaciones de ultracongelación.

En muchas regiones con climas cálidos, en especial, en países que operan al amparo del artículo 5, la transición de refrigerantes heredados, como el R-22, hacia otras alternativas más sostenibles, se ve, con frecuencia, obstaculizado por barreras en la normativa, problemas de seguridad y una capacidad técnica limitada (DNV, 2011). Para las regiones y consumidores finales que estén dispuestos a retirar gradualmente los fluidos sintéticos de trabajo, los sistemas R-744 serán una alternativa viable siempre que la arquitectura del sistema este adaptada a altas temperaturas de disipación (Bodys *et al.*, 2018; Semaev, 2021).

2.2.3 Los congeladores de placas y los tuneles de congelación

La captura debe estar congelada en aquellos buques pesqueros que operen lejos de la orilla y permanezcan en el mar durante varias semanas.

Los congeladores de placas verticales que se observan en la Figura 5 se emplean, por lo general, en arrastreros de pescado blanco en los que se congela el pescado entero y eviscerado en bloques de 25 kg o 50 kg. Su diseño vertical permite cargar de manera cómoda desde la parte superior. Después, los bloques se liberan por abajo tras su congelación. Aquellos barcos que procesen el pescado a bordo, como, por ejemplo, las labores de fileteado o troceado, se servirán de congeladores de placas horizontales o sistemas de congelación rápida



Figura 5: Bacalao congelado en congeladores de placas verticales. (foto: Guro M. Tveit, SINTEF Ocean)

individual (IQF, por sus siglas en inglés) dado que permiten congelar los productos en cajas o en porciones individuales. Los sistemas IQF congelan rápidamente al lanzar ráfagas de aire a baja temperatura y a alta velocidad sobre la superficie de productos delgados, como, los filetes, que se colocan en cintas o transportadores. Este método facilita una transferencia rápida del calor, de modo que, los productos de unos 2 cm de grosor llegan a congelarse en 10 minutos o menos.

2.2.4 Los usos del hielo y de la pasta de hielo

El hielo o la pasta de hielo se carga en el barco antes de su partida de la costa o se produce a bordo con máquinas de hielo o generadores de pasta de hielo. El pescado almacenado en hielo se muestra en la *Figura 6*. Hay que tomar en cuenta el deshielo que se producirá en el transporte desde la costa, por lo que, se cargarán grandes cantidades de hielo o de pasta de hielo para garantizar que toda la captura se mantenga congelada hasta la entrega o el amarre del barco.

En su defecto, el hielo o la pasta de hielo se pueden generar a bordo, sea con agua dulce o agua salada, lo que permite una flexibilidad de ajuste de la producción en función del tamaño de la captura o la duración en el mar. Una instalación de pasta de hielo suele componerse de un sistema frigorífico conectado a un generador de pasta de hielo, un tanque de almacenamiento para la misma y un sistema de suministro.



Figura 6: Pescado fresco almacenado en hielo (SINTEF)

CASO DE ESTUDIO: DESARROLLO DE UN SISTEMA R-290 DE HIELO EN ESCAMAS PARA BUQUES PESQUEROS EN INDIA

Hoy en día, India se encuentra a la vanguardia en el desarrollo de sistemas de hielo en escamas a bordo con R-290 (propano) como refrigerante, los cuáles están adaptados para cumplir con las exigencias de las operaciones pesqueras en aguas costeras cálidas. Los estudios de simulación revelan que un sistema de 30 kW que utilice el R-290 alcanza un COP de 1,76, incluso bajo condiciones tropicales extremas con temperaturas de evaporación de hasta 25°C y temperaturas de condensación que alcanzan los 40°C (Singha et al., 2025).

2.2.5 Los sistemas frigoríficos por absorción de calor: desafíos y oportunidades en países cálidos

Algunos sistemas frigoríficos, como los enfriadores de absorción, utilizan el calor en vez de la electricidad para enfriar el pescado a bordo. Esto puede resultar útil cuando hay disponible más calor del necesario, como el que emite el motor del barco. En teoría, esto los hace adecuados para buques pesqueros que operen en regiones cálidas, en donde el calor emitido por el motor es abundante.

Un estudio de la flota pesquera mediterránea evidenció que el calor residual de los motores, como los motores de escape y los de agua refrigerada, sería suficiente para satisfacer las necesidades de algunos barcos (Palomba et al., 2019). A pesar de esto, en la práctica, la mayoría de los buques pesqueros no producen calor excedente suficiente para ejecutar estos sistemas de manera efectiva y, en particular, para aquellas labores exigentes como la producción de agua de mar refrigerada o de hielo.

Por otra parte, los enfriadores de absorción son grandes, pesados, complejos y caros, lo que dificulta su instalación y operación en barcos pesqueros pequeños o medianos. Estos factores limitan su implementación ya que el espacio, el coste y la sencillez son elementos clave para el equipamiento a bordo.

2.2.6 La congelación por salmuera

La congelación por salmuera es otro método usado para algunas especies como el atún, las sardinas o las anchoas que se destinan para enlatado (Larminat et al., 2018). La salmuera suele tratarse de una solución compuesta de agua y sal, por lo común, cloruro sódico (NaCl) o cloruro cálcico (CaCl₂), que reduce el punto de congelación del líquido.

El punto eutéctico de estas salesⁱ, 21°C para el NaCl y 55°C para el CaCl₂, les permite congelar rápidamente a temperaturas bajo cero sin formar hielo en la propia salmuera. En comparación a la congelación del aire, la salmuera brinda unas tasas de transferencia de calor significativamente más altas y reduce el consumo energético total (Svendsen et al., 2024). Sin embargo, puede que el producto absorba sal, lo que afectaría a la calidad en función de la especie y del uso final.

2.3 Caso de estudio: análisis del ciclo de vida en Indonesia

CASO DE ESTUDIO: ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LOS MÉTODOS DE CONSERVACIÓN DEL PESCADO EN BUQUES PESQUEROS DE INDONESIA

Indonesia es un país compuesto de archipiélagos cuyas comunidades costeras dependen, en gran medida, de la pesca de captura como fuente primaria de sustento. En el año 2019, mas de dos millones de pescadores participaron en la pesca de captura, quienes utilizaron cerca de un millón de buques pesqueros (Wibawa et al., 2022). El mayor desafío que afronta la flota pesquera nacional se halla en sus limitaciones tecnológicas. Alrededor del 70% de los barcos son buques en pequeña escala y están equipados con la minina tecnología a bordo. Las operaciones de pesca tradicional como, por ejemplo, la navegación hacia los caladeros, el despliegue y la recogida de redes, y la conservación de la captura en el estanque vivero, están asociadas a diversas emisiones ambientales. De hecho, la industria del transporte en Indonesia, que incluye la pesca de captura, representa el 19 % de las emisiones de CO₂ del país (Puspa, 2021).

La industria pesquera de Indonesia depende, en gran parte, de los métodos de conservación tradicional como el transporte del hielo en barras desde la costa. Como parte de los esfuerzos de modernización y reducción de las emisiones en consonancia con los compromisos del país bajo el Acuerdo de París y el Protocolo de Montreal, este estudio de caso compara el comportamiento ecológico de dos sistemas de conservación:

- **Hielo en barras** (producido en tierra y transportado al barco)
- **Máquina de hielo en escamas** (producción a bordo con la implementación de un sistema frigorífico)

En comparación con las máquinas de hielo en escamas, se descubrió que el hielo en barras reduce el impacto en el agotamiento de la capa de ozono en un 95% y su potencial de calentamiento global es un 97% más bajo. Los autores recomiendan que, en el caso de utilizar sistemas de hielo en escamas, se debe trabajar con refrigerantes más respetuosos con el medioambiente, como el amoníaco, el CO₂ o los hidrocarburos, para disminuir de manera significativa el daño ambiental y alinearse con los compromisos nacionales del Acuerdo de París y el Protocolo de Montreal.



Figura 7: Pequeños buques pesqueros, Indonesia.

(https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fishing_boats,_Probolinggo,_2016_%2802%29.jpg)

ⁱ Punto eutéctico: La composición y temperatura específica en la que una mezcla de sustancias se solidifica o derrite de manera simultánea en una única fase, esto proporciona una temperatura estable y constante durante el cambio de estado

3.- LOS REFRIGERANTES EMPLEADOS, LA REPERCUSIÓN AMBIENTAL Y LAS ALTERNATIVAS A LARGO PLAZO

Antes de los requisitos para el cumplimiento del Protocolo de Montreal, la mayoría de la flota pesquera global dependía principalmente del R-22, un HCFC empleado para todo tipo de aplicaciones de refrigeración por su eficiencia, coste y seguridad (PNUMA, 2023a). Durante la década del 2010, diferentes países se comprometieron a retirar gradualmente los HCFC y, como consecuencia, los buques pesqueros pasaron de utilizar el R-22 al R-507A/R-744 o el R-717/R-744. Por ejemplo, la industria pesquera gallega en España finalizó la transición gradual del R-22 en 2015 (Gabrielii y Jafarzadeh, 2020).

Pero, por desgracia, los costes para la conversión son altos. En algunos países insulares que operan al amparo del artículo 5, en donde la actividad pesquera es el mayor consumidor de refrigerante, no arreglan las fugas de refrigerante en los buques más antiguos puesto que su detección y reparación conlleva altos costes (UPNUMA, 2024a).

Maldivas es un pequeño estado insular en desarrollo con una economía dependiente, en gran medida, de la industria pesquera. En el año 2018, el 85% de sus buques pesqueros se servían del R-22, mientras que el 15% restante empleaba amoníaco (Ministry of Environment and Energy, República de Maldivas, 2018). Con el apoyo del Fondo Multilateral para la aplicación del Protocolo de Montreal (FMPM), el gobierno de las Maldivas consiguió retirar completamente el HCFC en el año 2023 (Fondo Multilateral, 2025).

De acuerdo con el informe de 2022 del Grupo de Evaluación Tecnológica y Económica del PNUMA, el R-717 (amoníaco) ya era de uso común antes de 1970 y, en la actualidad, se está volviendo a introducir en los buques pesqueros (UNEP, 2023b). Esta transición se ajusta a la Estrategia de 2023 de la OMI sobre la reducción de las emisiones de GEI (OMI, 2023), que pide la adopción de combustibles y tecnologías con emisiones de GEI nulas o casi nulas en buques marinos. La regla 12 del anexo VI del MARPOL de la OMI prohíbe la instalación de sistemas que empleen sustancias que agoten la capa de ozono, como son los CFC y los HCFC (p.ej. R-22), en barcos construidos después del 1 de enero de 2020 (OMI, s.f.).

Muchos de los refrigerantes que se utilizan hoy en día en la flota pesquera mundial plantean desafíos ambientales considerables por su alto PCG y PAO. Las pérdidas de refrigerante que ocurren por fugas en el sistema causadas por el movimiento constante de los barcos, representan hasta el 2% del total de emisiones marítimas (Hafner et al., 2019).

La Organización Marítima Internacional calcula que cada año se pierden 1589 toneladas de refrigerante R-22 en los buques pesqueros (OMI, 2020). El R-22 tiene un PCG100ⁱⁱ de 1810 y un ODP de 0,055. Según el cálculo de pérdidas anuales, esto equivale aproximadamente a 2,88 millones de toneladas de CO_{2eq}, lo que es comparable a las emisiones anuales de más de

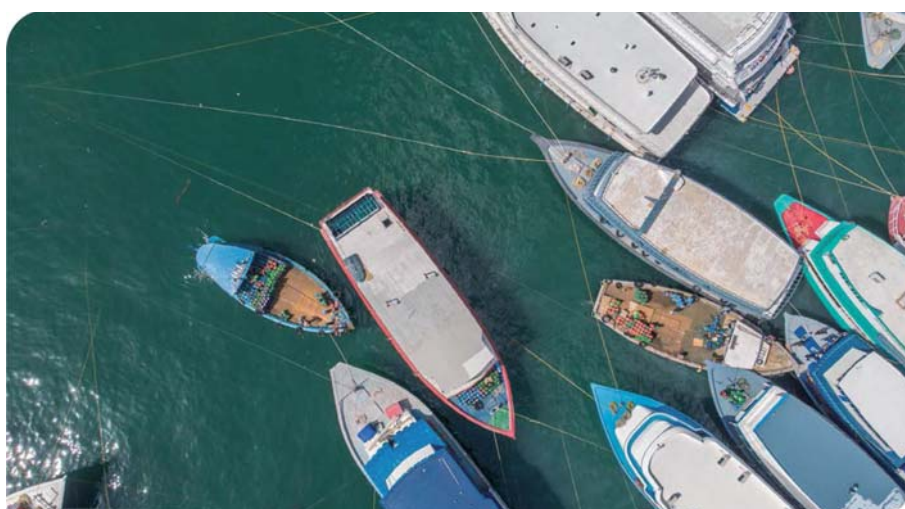


Figura 8: Vista aérea del Malé North Harbour, el centro principal de distribución de mercancías en las Maldivas. (Banco Asiático de Desarrollo – Flickr: <https://www.flickr.com/photos/asiandevelopmentbank/48786644873/in/photostream/>)

ⁱⁱ Potencial de calentamiento global a lo largo de un período de 100 años

600000 coches de gasolina. Pero, se cree que las cifras contabilizadas sobre las pérdidas de refrigerante son menores a las cifras reales debido a que, en muchos países, las emisiones no se han medido de manera constante y precisa (*Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo, 2024*). Lo que sugiere que la repercusión climática es mucho más elevada de lo que se evidencia en la actualidad.

Por consiguiente, la transición a unos refrigerantes sostenibles es esencial para mitigar el impacto negativo de estas emisiones. De igual modo, la pérdida de refrigerantes supone un aumento sustancial del gasto financiero para los dueños de los barcos puesto que los precios mundiales de los hidrocarburos halogenados aumentan de manera vertiginosa.

Las hidrofluoroolefinas (HFO), como R-1234yf y R-1234ze, son parte de la última generación de refrigerantes fluorados que se han desarrollado para reemplazar a los hidrofluorocarburos (HFC) con un alto PCG. Estas sustancias se caracterizan por tener un PAO nulo y un PCG bajo, suscitado por un corto tiempo de permanencia en la atmósfera. Aunque, su perfil ambiental es mucho más complejo. Tras la degradación atmosférica, las HFO, al igual que los HFC heredados, como el R-134a, forman ácido trifluoroacético (TFA), un compuesto altamente persistente y soluble en agua. El TFA es ampliamente reconocido como una sustancia perfluorada (PFAS) y se detecta cada vez más en aguas superficiales y en la precipitación mundial (*Comité Técnico Europeo del Fluorocarbono, s.f.*). Pese a que el Grupo de evaluación de efectos ambientales (GEEA) del PNUMA indica que las concentraciones ambientales actuales del TFA están por debajo de los umbrales alarmantes para la salud humana y ecológica (*PNUMA, 2024b*), su permanencia y potencial de acumulación en áreas localizadas hace que se mantenga bajo un escrutinio científico y regulatorio continuo. Además, los perfiles de inflamabilidad y toxicidad de algunos HFO plantean consideraciones de seguridad, en particular, en ambientes cerrados como los buques marinos.

La gestión eficaz del ciclo de vida de los refrigerantes sintéticos es fundamental para minimizar su repercusión ambiental durante su uso operacional, así como, la eliminación al final de su vida útil. Esto integra el manejo adecuado, la recuperación al final de la vida útil del sistema y el reciclado. En aquellos casos en los que una conversión total a refrigerantes naturales no sea factible, se recomienda modernizar los sistemas vigentes de manera que se garantice la máxima contención del refrigerante. Ello supone la implementación de componentes con alta integridad, la aplicación de sistemas de detección de fugas y la puesta en marcha de protocolos de mantenimiento minuciosos. Sin embargo, la experiencia práctica constata que el mantener unos índices de fuga bajos es complicado, en especial, en entornos marítimos, a causa del continuo movimiento y de las vibraciones mecánicas. A menudo, incluso los sistemas terrestres tienen dificultades para alcanzar un índice de fuga anual menor al 10%. En estos casos, la aplicación de sistemas de enfriamiento indirecto con fluidos refrigerantes secundarios, como el dióxido de carbono, reducen de manera significativa la pérdida de refrigerantes primarios y mejora, en general, la eficacia de contención.

4.- LAS TENDENCIAS Y EL DESARROLLO TECNOLÓGICO

4.1 Las adaptaciones marinas en el procesamiento de alimentos marinos

El procesamiento de alimentos marinos a bordo de buques pesqueros, como, las labores de cortado, congelado y almacenado, es muy similar al procesamiento en tierra. No obstante, el equipo debe estar adaptado a las condiciones marítimas. Ante el espacio limitado, el movimiento constante y la exposición a duras condiciones ambientales, se necesitan sistemas compactos, duraderos y muy fiables.

Los materiales usados en la refrigeración deben ser resistentes a la corrosión, sobre todo en sistemas de agua de mar enfriada. Es habitual usar condensadores multitubulares de calandria con tubos de cobre-níquel, los cuáles son adecuados para entornos marítimos. Aun así, la compatibilidad del material con los refrigerantes es elemental. Se suele preferir el titanio porque es altamente resistente a la corrosión y compatible con una amplia gama de refrigerantes. Esto hace que sea una opción excelente para aplicaciones marinas en las que la fiabilidad y longevidad son fundamentales.

4.2 La digitalización a bordo

La digitalización y la automatización están transformando la industria marítima con el impulso de la competitividad, la eficacia operacional y los esfuerzos de descarbonización hacia las cero emisiones para mediados de siglo (*DNV, 2024*). Las operaciones se optimizarán si se combinan los datos de los sistemas a bordo, como los sistemas de automatización integrados (IAS, por sus siglas en inglés), los sistemas de localización de buques (SLB), los sistemas frigoríficos y los diarios de pesca, junto con recursos externos (p.ej. el pronóstico meteorológico o los datos de ventas) y, reportes informales (p.ej. registros en papel, experiencia). El patrón de pesca aplicará los datos de la maquinaria para anticipar el mantenimiento y prevenir las

fallas, mientras que los datos históricos de captura ayudarán a mejorar las rutas de pesca al disminuir el uso del combustible. Además, el análisis de los datos térmicos ayudará a optimizar el diseño, el calibrado y la eficacia operacional de los sistemas frigoríficos, de modo que, se verán mejoras generales en el rendimiento y un descenso en la demanda energética. Es posible que el uso de drones para localizar peces sea una alternativa más eficiente en materia de energía y menos contaminante a que el buque pesquero tenga que buscar los cardúmenes directamente.

4.3 La propulsión, los combustibles y la integración de sistemas de calefacción y enfriamiento a bordo

A día de hoy, los buques pesqueros dependen de motores diésel para la propulsión y la energía a bordo, pero las regulaciones ambientales mundiales están acelerando el cambio hacia fuentes de energía más limpias como lo son los combustibles, las baterías y los sistemas híbridos con emisiones bajas en carbono. Esta transición se presenta como una oportunidad para modernizar el consumo de energía, en especial, en los sistemas de calefacción y enfriamiento que son esenciales en climas cálidos. A diferencia de las instalaciones terrestres que se benefician de sistemas integrados, los buques marinos sufren, a menudo, insuficiencias puesto que tienen la refrigeración y el aire acondicionado separado de la calefacción. En vista de que los sistemas híbridos reducen la disponibilidad de calor residual, algunas tecnologías, como el almacenamiento de energía térmica (AET), ayudan a equilibrar la demanda energética y potenciar la eficacia. La recuperación del calor residual (RCR) y la aplicación de combustibles criogénicos, como es el caso del gas natural licuado (GNL), brindan otras alternativas para recuperar energía y reducir el consumo de combustible.

4.4 La gestión de seguridad a bordo

Los sistemas frigoríficos a bordo de los buques pesqueros deben cumplir con la normativa de seguridad internacional como el EN-378, al igual que, con el reglamento marítimo nacional y regional, y los requisitos de la sociedad de clasificación. La toma de decisiones sobre el diseño debería hacerse tras efectuar evaluaciones de riesgo rigurosas y, asimismo, se debería coordinar con las partes interesadas relevantes como aseguradoras y organismos reguladores. La mayoría de refrigerantes se almacenan en salas de máquinas equipadas con detección de fugas, ventilación y acceso restringido, sobre todo cuando se trata de sustancias inflamables. Aunque, se priorizan los refrigerantes ignífugos en las áreas de trabajo por motivos de seguridad. El dióxido de carbono (CO_2) se utiliza cada vez más en aplicaciones marinas por su idoneidad para sistemas a baja temperatura y por su naturaleza ignífuga, a pesar de que requiere un diseño minucioso del sistema a fin de gestionar los riesgos de toxicidad. De hecho, aunque los gases fluorados sean comunes, pueden degradarse en productos secundarios corrosivos que presenten riesgos para el equipo. En general, el diseño seguro y eficiente de la refrigeración depende de la elección de materiales adecuados, las estrategias de contención y la formación de la tripulación.

5.- LAS PERSPECTIVAS Y LOS DESAFÍOS DEL DESARROLLO

A pesar del uso generalizado de los sistemas frigoríficos en la industria pesquera, aún hay cabida para la innovación cuyo fin sea optimizar la eficiencia energética, el control del sistema y la calibración del equipo. El resultado de la optimización de estos sistemas será un menor consumo de combustible y una reducción en las emisiones, en particular, en los barcos más grandes en donde la automatización y la detección temprana de fallos mejorará el desempeño y reducirá las necesidades de mantenimiento.

Todavía nos queda por desarrollar aún más los sistemas pequeños de AMR pues son fundamentales para los buques a pequeña escala que, además, representan a la mayoría de la flota mundial. Por lo que la investigación y el desarrollo enfocados en este campo ayudará a preservar la calidad de la captura y favorecerá la sostenibilidad.

Sin embargo, el aumento de la temperatura del agua del mar, sobre todo, en regiones tropicales y subtropicales, plantea un desafío añadido. Es probable que haya una necesidad aún mayor de refrigeración para conservar la captura. Al emplear agua más cálida se reduce la eficiencia de los sistemas AMR puesto que se necesita un mayor consumo de energía para lograr el mismo efecto de frío. Esto no solo aumenta el consumo de combustible, sino que, además, pone más presión sobre el equipo de refrigeración, lo que acorta su esperanza de vida e incrementa los costes de mantenimiento. El desarrollo de sistemas que se adapten a temperaturas de agua de mar y ambiente más elevadas se ha vuelto muy importante para preparar la refrigeración marina para el futuro.

En el transporte marítimo, mucho de los contenedores refrigerados todavía dependen de refrigerantes con un alto PCG. De tal forma que, dentro de la industria pesquera y de transporte, los avances en sistemas compactos y energéticamente eficientes que se sirvan de refrigerantes naturales son clave para reducir las repercusiones ambientales y apoyar la transición hacia unas operaciones marítimas más limpias.



Figura 9: Grandes arrastreros industriales faenando juntos en el mar de Andamán (archipiélago de Mergui, Myanmar)

CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

La industria pesquera global afronta un doble desafío: existe una falta de sistemas de enfriamiento adecuados a bordo que conduce a una pérdida significativa de alimentos, y el uso continuado de refrigerantes con un alto PCG amenaza la integridad ambiental y la salud pública. Encargarse de estos problemas no es solo cuestión de actualización tecnológica, sino que, es una estrategia imperiosa para lograr un desarrollo sostenible.

La transición hacia sistemas frigoríficos eficientes en materia de energía que hagan uso de refrigerantes naturales ofrece una oportunidad de transformación. Estos sistemas ya están disponibles en el mercado y se están adaptando cada vez más para los buques a pequeña escala, que representan a la mayoría de la flota mundial. Su implementación reduciría drásticamente el desperdicio de alimentos, mejoraría la calidad de los alimentos marinos y mitigaría las repercusiones climáticas y ambientales.

Esta transición debe guiarse por el principio de **“Una sola salud”**, cuyo objetivo es reconocer que la salud de las personas, los animales y los ecosistemas está sumamente interrelacionada. Al reducir las emisiones de refrigerantes nocivos, se protege la biodiversidad marina, se evita la contaminación de las cadenas alimentarias y se contribuye a mantener unas comunidades más saludables.

En consecuencia, la refrigeración sostenible no es solo una solución técnica, es una intervención de salud pública, un salvaguarda para el medioambiente y una estrategia de seguridad alimentaria.

Si queremos lograr esta visión, se necesita una acción global coordinada. Esto englobaría:

- La aplicación de **mandatos de políticas públicas** para sistemas de enfriamiento y congelación a bordo.
- El proporcionar **formación y entrenamiento** para pescadores y operadores.
- El **cumplimiento de la regulación** en aras de la eliminación gradual de refrigerantes nocivos.
- La **inversión en innovación** de tecnologías escalables de refrigerantes con un bajo PCG.
- La **digitalización** para optimizar las operaciones y reducir las emisiones.

Al incorporar la sostenibilidad y la seguridad en las estrategias de refrigeración de pesquerías, se respalda un ecosistema marino más saludable, se optimiza la eficacia de los recursos y se mejora la viabilidad a largo plazo de la industria.

ABREVIATURAS Y SIGLAS

a/a: Aire acondicionado	HFO: Hidroclorofluorocarburo
CFC: Clorofluorocarburo	HFO: Hydrofluoroolefin
CO ₂ : Dióxido de carbono (R-744)	OMI: Organización Marítima Internacional
COP: Coeficiente de rendimiento	GNL: Gas natural licuado
AME: Agua de mar enfriada	NH ₃ : Amoníaco (R-717)
AETF: Almacenamiento de energía térmica en frío	PAO: Potencial de agotamiento del ozono
FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura	PFAS: Sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas
GEI: Gas de efecto invernadero	AMR: Agua de mar refrigerada
PCG: Potencial de calentamiento global	AET: Almacenamiento de energía térmica
HCFC: Hidroclorofluorocarburo	RCR: Recuperación del calor residual

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bodys, J., Hafner, A., Banasiak, K., Smolka, J., Ladam, Y., 2018. Design and simulations of refrigerated sea water chillers with CO₂ ejector pumps for marine applications in hot climates. *Energy* 161, 90-103. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.126>

Comité Técnico Europeo del Fluorocarburo, s.f. TFA as an atmospheric breakdown product. Fluorocarbons. <https://www.fluorocarbons.org/environment/environmental-impact/tfa-as-an-atmospheric-breakdown-product/> (consultado el 5 de septiembre de 2025).

Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo, 2024. Energy transition of fishing fleets: Opportunities and challenges for developing countries. Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo, Ginebra.

DNV, 2024. Digitalization in the maritime industry. <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/digitalization-in-themaritime-industry/> (consultado el 14 de mayo de 2025).

DNV, 2011. Parte 5, Capítulo 10. Newbuildings Special Service and Type – Additional Class. Ships for Carriage of Refrigerated Cargoes and Containers, in: Rules for Classification of Ships.

FAO, 2024. El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2024 FAO

FAO, 2022. El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022 FAO

FAO, 2018. El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2018 FAO

Fondo Multilateral, 2025. Maldives' ambitious plan on early HCFC phase out and energy efficiency <https://www.multilateralfund.org/news/maldives-ambitious-plan-early-hcfc-phase-out-and-energy-efficiency> (consultado el 5 de septiembre de 2025).

- Gabrielii, C., Jafarzadeh, S., 2020.** Carbon footprint of fisheries - A review of standards, methods and tools. SINTEF.
- Hafner, A., Gabrielii, C.H., Widell, K., 2019.** Refrigeration units in marine: Alternatives to HCFCs and high GWP HFCs. Nordisk Ministerråd.
- Organización Marítima Internacional, 2023.** Estrategia de la OMI 2023 para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de los buques (MEPC 80/17/Add.1, Anexo 15, Resolución MEPC.377(80)).
- Organización Marítima Internacional (OMI), 2020.** Cuarto estudio de la OMI sobre los gases de efecto invernadero 2020 <https://www.imo.org/es/OurWork/Environment/Pages/Fourth-IMOGreenhouse-Gas-Study-2020.aspx> (consultado el 14 de mayo de 2025).
- Organización Marítima Internacional (OMI), s.f.** Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques (MARPOL). Annex VI - Regulation 12 - Ozone-depleting substances. https://www.marpoltraininginstitute.com/MMSKOREAN/MARPOL/Annex_VI/r12.htm (consultado el 5 de septiembre de 2025).
- Larminat, P. de, Dubrie, A., Jose, A., 2018.** Nota breve sobre las tecnologías de la cadena de frío: aplicaciones de buques pesqueros. PNUMA y IIR/IIF.
- Magnussen, O.M., Haugland, A., Torstveit Hemmingsen, A.K., Johansen, S., Nordtvedt, T.S., 2008.** Advances in super-chilling of food – Process characteristics and product quality. Trends in Food Science & Technology, Central European Congress on Food – CEFood 19, 418–424. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.04.005>
- Ministry of Environment and Energy. República de Maldivas, 2018.** Progress Report: Demonstration Project for Fisheries Sector. Submitted for the consideration of the 81st Meeting of the Executive Committee of the Multilateral Fund for the implementation of the Montreal Protocol.
- Palomba, V., Dino, G.E., Ghirlando, R., Micallef, C., Frazzica, A., 2019.** Decarbonising the Shipping Sector: A Critical Analysis on the Application of Waste Heat for Refrigeration in Fishing Vessels. Applied Sciences 9, 5143. <https://doi.org/10.3390/app9235143>
- PNUMA, 2024a.** Decision XXXV/11 Task Force Report on Life Cycle Refrigerant Management (Informe del Grupo de Evaluación Tecnológica y Económica (GETE)), Protocolo de Montreal relativo a las Sustancias que Agotan la Capa de Ozono.
- PNUMA, 2024b.** Actualización del Grupo de Evaluación de Efectos Ambientales de 2024. Environmental effects of stratospheric ozone depletion, UV radiation, and interactions with climate change. 36ª Reunión de las Partes en el Protocolo de Montreal. Del 28 de octubre al 1 de noviembre de 2024. Bangkok, Tailandia.
- PNUMA, 2023a.** Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee (RTOC) 2022 Assessment Report, Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer.
- PNUMA, 2023b.** Technology and Economic Assessment Panel (TEAP) 2022 Assessment Report, Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer.
- Puspa, A.W., 2021.** Persiapan Indonesia Terapkan Dekarbonisasi Pelayaran dan Transisi Green Port <https://ekonomi.bisnis.com/read/20211112/98/1465398/persiapanindonesia-terapkan-dekarbonisasi-pelayaran-dan-transisi-green-port> (consultado el 5 de septiembre de 2025).
- Ruiz, V., 2012.** Analysis of existing refrigeration plants onboard fishing vessels and improvement possibilities, in: Second International Symposium on Fishing Vessel Energy Efficiency E-Fishing, Vigo, España, mayo de 2012.
- Sarr, J., Toubanc, C., Dupont, J.L., Guilpart, J., 2023.** The sustainability of the food cold chain. Parte 1, The carbon emission savings related to food losses reduction, in: Actas del 26º Congreso Internacional de Refrigeración IIR: París, Francia, del 21 al 25 de agosto de 2023. <https://doi.org/10.18462/iir.icr.2023.1173>

Semaev, P., 2021. Energy efficient CO2 refrigeration units for fishing vessels (tesis de maestría). NTNU.

Shawyer, M., Pizzali, A.F.M., 2003. The Use of Ice on Small Fishing Vessels. FAO Documento Técnico de Pesca núm. 436. FAO, Roma.

Singha, P., Das, C., Köster, L., Kochunni, S.K., Dasgupta, M.S., Widell, K.N., Bhattacharyya, S., Hafner, A., 2025. Thermodynamic comparison of various refrigerants for an on-board R290 refrigeration system with economizer subcooling in small fishing boats. Thermal Science and Engineering Progress 60, 103443.
<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.103443>

Söylemez, E., Widell, K.N., Gabriell, C.H., Ladam, Y., Lund, T., Hafner, A., 2022. Overview of the development and status of carbon dioxide (R-744) refrigeration systems onboard fishing vessels. International Journal of Refrigeration 140, 198–212.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.05.007>

Wibawa, P.A., Birmingham, R.W., Warmadewanthi, I.D.A.A., 2022. Comparing Life Cycle Assessment of Fish Preservation Method on Fishing Vessels in Indonesia. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1095, 012017.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1095/1/012017>

Widell, K., Gabriell, C., Soylemez, E., Hazarika, M.M., Hafner, A., Khan, M.U., Svendsen, E.S., Nordtvedt, T.S., Tolstorebrov, I., Pachai, A.C., 2023. Energy efficient and climate friendly refrigeration systems onboard fishing vessels., in: Actas del 26º Congreso Internacional de Refrigeración IIR: París, Francia, del 21 al 25 de agosto de 2023.
<https://doi.org/10.18462/iir.icr.2023.0450>
