

Jornadas de Automática

Sistema de autogestión energética para un modelo de buque autónomo

Yáñez, Ginés^{a,*}, Fernandez-Canti, Rosa M.^a, Romero, Sergio^a, De Melo, Germán^b

^a Dpto. de Ingeniería de Sistemas, Automática e Informática Industrial (ESAI), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Campus Diagonal Sud, Edificio H. Av. Diagonal, 647, 08028 Barcelona, España.

^b Dpto. de Ciencia e Ingeniería Náuticas (CEN), Facultat de Nàutica de Barcelona (FNB), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Edifici NTI. Pla de Palau, 18, 08003 Barcelona, España.

To cite this article: Yáñez, Ginés, Fernández-Cantí, Rosa M., Romero, Sergio, De Melo, Germán. 2025. Energy self-management system for an autonomous ship model. *Jornadas de Automática*, 46.

<https://doi.org/10.17979/ja-cea.2025.46.12269>

Resumen

Se presenta el sistema de autogestión energética de un modelo de buque autónomo con diversos sistemas automatizados en su interior. La alimentación de todos los componentes se realiza por medio de baterías. La gestión de la energía la realiza un procesador a partir del testeo periódico de las baterías. Se detalla la estructura del embarrado principal y el protocolo para la conexión y desconexión de las baterías. Se definen diversos modos de funcionamiento y se analiza la configuración del modo de supervivencia en el cual los componentes no esenciales son desconectados a fin de conservar la energía y permitir el rescate de la embarcación mediante control manual.

Palabras clave: Estabilidad del sistema de energía; Control inteligente de sistemas de energía; Automatización de la distribución; Operación y control óptimos de sistemas de potencia; Modelización; Vehículos marinos no tripulados; Vehículos de superficie autónomos; Sistemas de apoyo a la toma de decisiones en sistemas marinos.

Energy self-management system for an autonomous ship model

Abstract

The self-management energy system for an autonomous vessel model with various automated systems is presented. All components are powered by batteries. Energy management is performed by a processor based on periodic battery testing. The structure of the main busbar and the protocol for connecting and disconnecting the batteries are detailed. Various operating modes are defined, and the configuration of survival mode, in which non-essential components are disconnected to conserve energy and allow the vessel to be rescued by manual control, is analyzed.

Keywords: Power systems stability; Intelligent control of power systems; Distribution automation; Optimal operation and control of power systems; Modeling; Unmanned marine vehicles; Autonomous surface vehicles; Decision support systems in marine systems.

1. Introducción

En los últimos años, se han producido importantes avances en el ámbito de los buques autónomos (McKie, 2023), y ya es posible encontrarlos en algunos países realizando tareas diversas en áreas costeras. Un ejemplo destacado en España es el USV Vendaval, una embarcación autónoma de 12 metros

de eslora construida por Navantia para labores de vigilancia del litoral.

Por su parte, la Organización Marítima Internacional (OMI) llevó a cabo, entre 2017 y 2021, un estudio exploratorio (RSE, *Regulatory Scoping Exercise*) sobre la reglamentación aplicable a los buques autónomos y su impacto en los convenios internacionales.

En dicho estudio se establecieron cuatro niveles de autonomía, cada uno correspondiente a un grado creciente de automatización: 1) buques con tripulación a bordo y procesos automatizados, 2) buques con tripulación a bordo operados remotamente, 3) buques sin tripulación a bordo operados remotamente, y 4) buques sin tripulación a bordo operados de forma completamente autónoma (IMO, 2021).

A raíz de este análisis, la OMI emprendió la elaboración de medidas específicas para asegurar el cumplimiento de los convenios internacionales por parte de los buques autónomos, así como la redacción del denominado Código MASS (*Marine Autonomous Surface Ships*), cuya entrada en vigor en forma de recomendación está prevista para 2025, y su aplicación obligatoria para 2028.

Asimismo, existen directrices específicas relativas a los ensayos de buques MASS, recogidas en el documento MSC.1/Circ.1604 de 14 junio 2019 (IMO, 2019). Dado el elevado coste y la complejidad de realizar ensayos con buques reales, es habitual en este campo el uso de modelos a escala que permitan evaluar diferentes enfoques en la implementación de sistemas autónomos.

En este trabajo se presenta el desarrollo e implementación de un sistema de autogestión energética para un modelo a escala de un petrolero de la clase Latona, en el marco del proyecto denominado NASHI de la Facultad de Náutica de Barcelona (FNB) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

El objetivo general de este trabajo es describir el diseño, implementación y validación del sistema de autogestión de energía integrado en los modelos NASHI, como parte esencial de la autonomía operativa de la embarcación. Específicamente, se pretende: 1) presentar la arquitectura y lógica de funcionamiento del sistema, detallando su comportamiento en condiciones normales, críticas y de emergencia; y 2) evaluar el rendimiento del sistema en pruebas reales, comprobando su capacidad para detectar fallos, gestionar recursos energéticos y activar protocolos de supervivencia de forma autónoma.

El artículo está organizado de la siguiente manera: en la Sección 2 se presenta el proyecto de la embarcación autónoma; en la Sección 3 se describen los componentes y el funcionamiento del sistema autónomo de la gestión energética; la Sección 4 está dedicada a los modos de operación; y finalmente, la Sección 5 expone las conclusiones y propone líneas futuras de investigación.

2. El proyecto NASHI

El proyecto NASHI, desarrollado por la FNB, se centra en la construcción de modelos a escala de buques autónomos, tanto en lo relativo a la navegación como a la gestión de los sistemas internos. Estos modelos están basados en un petrolero de 350 metros de eslora, y se han reducido a escala hasta alcanzar unas dimensiones finales de 2 metros de eslora, 30 cm de manga y 11 cm de calado. El primer modelo fue construido en madera (ver Figura 1) e incorporaba dos sistemas internos: el sistema de autogestión energética y el sistema de navegación autónoma. El modelo más reciente, construido en fibra de vidrio, incluye cuatro sistemas principales: el sistema de autogestión de energía, el sistema de

navegación autónoma, el sistema anticolisión basado en tecnología LIDAR (*Light Detection And Ranging*), y el sistema automático de gestión de tanques de lastre.

El sistema de autogestión energética está controlado por un procesador Arduino UNO, encargado de monitorizar el estado de las baterías y actuar en función de estas. Por su parte, la navegación está gestionada por un procesador Arduino Mega, que recibe información de un sensor GPS y guía la embarcación desde una coordenada A a una coordenada B, controlando tanto la velocidad del motor como la orientación del timón. El sistema LIDAR proporciona información sobre posibles obstáculos al procesador de navegación, lo que permite modificar el rumbo de forma automática mediante ajustes en el timón y el motor.



Figura 1: Modelo NASHI

3. El sistema de autogestión de la energía

Según Chen, (2021), la autonomía se define como “la concesión de poder de decisión a un objeto, de modo que este tenga derecho a actuar dentro de un ámbito específico”. En este sentido, para que una embarcación pueda ser considerada autónoma, es imprescindible que sea capaz de tomar decisiones de forma independiente, sin intervención externa.

El sistema de autogestión de la energía de los modelos NASHI ha sido diseñado con el objetivo de operar de manera autónoma, garantizando que la embarcación navegue de forma segura, se ajuste a la ruta programada y, en caso de sufrir fallos graves en el suministro energético, pueda ser rescatada.

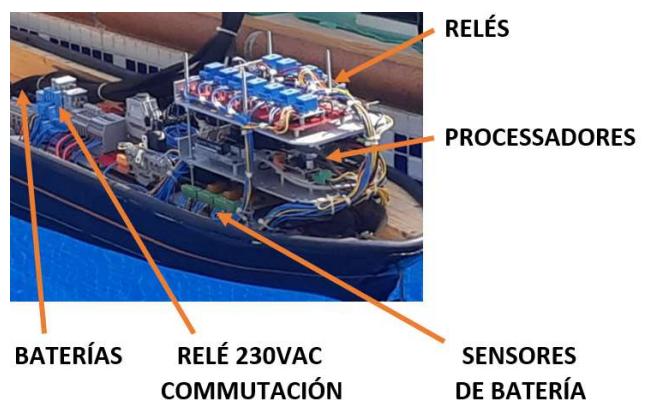


Figura 2: Sistemas en el interior de un modelo NASHI.

3.1. Componentes del sistema de gestión energética

El sistema de gestión energética para la navegación está compuesto por los siguientes elementos:

- Tres baterías de plomo-ácido: suministran la energía necesaria para la propulsión y operación de los sistemas de a bordo durante la navegación.
- Tres sensores de tensión de batería: monitorizan individualmente el estado de las baterías, permitiendo detectar si alguna de ellas presenta deterioro o bajo rendimiento.
- Relés: permiten la conexión o desconexión automatizada de cada batería, en función del estado detectado, la desconexión del embarrado 5 VDC no crítico, la conmutación de la alimentación de baterías a 230 VAC y otros automatismos de otros sistemas.
- Procesador Arduino UNO: actúa como unidad de control del sistema energético. Se encarga de planificar y ejecutar los test de estado de las baterías, ordenar su desconexión en caso necesario, y comunicar al procesador de navegación si se ha activado el modo de emergencia (cuando dos baterías han sido desconectadas y solo queda una operativa).
- Embarrado principal de cuatro polos: punto de conexión común para todos los consumidores eléctricos de a bordo. El embarrado es compartido con el circuito de 230 VAC (ver Figura 3).

Cuando la embarcación se encuentra en tierra, el sistema contempla los siguientes elementos:

- Toma de 230 VAC: permite conectar un cable de alimentación desde el taller a la embarcación para suministrar energía externa y cargar las baterías.
- Fuente de alimentación: convierte (rectifica) los 230 VAC en corriente continua para alimentar los sistemas de a bordo durante las pruebas realizadas en tierra.
- Cargador de baterías: se encarga de recargar las baterías cuando la embarcación está conectada a la red eléctrica.
- Sistema de conmutación de alimentación: conmuta automáticamente entre la alimentación por baterías y la alimentación externa de 230 VAC. Al activarse la conmutación, se inicia automáticamente el proceso de carga de las baterías.
- Embarrado principal de cuatro polos.

3.2. Embarrado principal

El estado operativo normal de la embarcación corresponde a la navegación con las tres baterías suministrando energía al embarrado principal, desde donde se alimenta al resto de sistemas a bordo.

El embarrado principal constituye el punto de distribución eléctrica central de la embarcación y está compuesto por cuatro embarrados, cada uno correspondiente a una tensión de trabajo con una función específica. A continuación, se describen sus características:

- 12 VDC: a esta embarrado se conectan los consumidores que requieren una alimentación de 12 voltios, incluyendo aquellos con alta demanda energética, como el motor principal y los convertidores de tensión de 12 a 9 VDC.
- 5 VDC críticos o esenciales: este embarrado alimenta sensores y equipos esenciales para la seguridad y operatividad básica de la embarcación. El sistema

garantiza una tensión constante en este embarrado, incluso en condiciones de energía limitadas.

- 5 VDC no críticos o no esenciales: aquí se conectan sensores y equipos no esenciales. En caso de problemas energéticos (por ejemplo, cuando dos de las tres baterías están inutilizadas), el sistema desconecta automáticamente este embarrado, permitiendo que el resto de sistemas continúe funcionando de forma limitada.
- 0 VDC: corresponde al polo negativo común de todos los equipos a bordo. En esta barra se conectan los retornos (negativos) de los dispositivos alimentados por las tres barras anteriores.

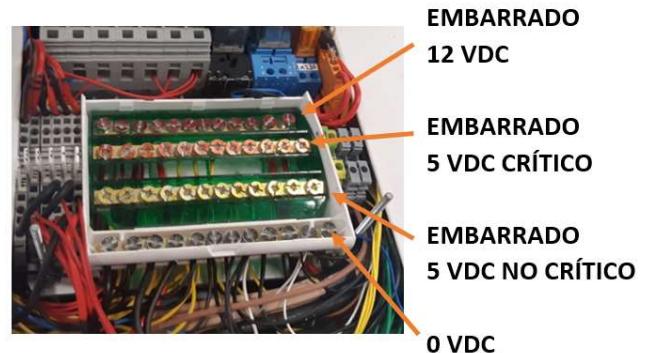


Figura 3: Embarrado principal

3.3. Testeo de las baterías

Durante la navegación en condiciones normales, las baterías suministran energía al embarrado principal. Los sensores de tensión están operativos para realizar lecturas cuando el procesador así lo ordene, y los relés mantienen sus contactos cerrados o abiertos según sea necesario para permitir el paso de corriente hacia el embarrado principal.

El procesador inicia el testeo de cada batería de forma individual, ya que si se midieran en paralelo, sólo se obtendría la tensión media conjunta. Para evitar esto, cada 10 minutos el sistema ejecuta un ciclo de testeo secuencial en el que evalúa las baterías una a una. El procedimiento consiste en abrir momentáneamente el relé conectado en serie a la salida de cada batería para aislarla y medir su tensión de manera independiente.

Si el procesador detecta que una batería presenta un valor inferior al umbral de funcionamiento (establecido en 11.6 VDC), se considera que está en mal estado. En tal caso, el procesador mantiene el contacto del relé correspondiente abierto, desconectando permanentemente esa batería del sistema, mientras que las otras dos continúan operativas.

En los posteriores ciclos de testeo, el procesador tiene registrado qué batería ha sido previamente desconectada y la excluye del nuevo testeo, evitando así riesgos adicionales para el sistema, como una caída general de planta energética.

3.4. Configuración de supervivencia

Si el sistema de energía detecta que en dos de las tres baterías la tensión está por debajo de 11.6 VDC, el procesador inicia el modo de supervivencia energética, definido por una configuración diseñada para reducir el consumo y preservar la

operatividad básica de la embarcación. Las acciones principales que ejecuta son:

- Desconexión del embarcado de 5 VDC no críticos mediante un relé, eliminando así la alimentación a sensores y sistemas no esenciales.
- Interrupción del testeo cíclico de las baterías, ya que con una sola batería activa, el testeo provocaría una interrupción total del suministro eléctrico, lo que llevaría a la desconexión de todos los sistemas de a bordo.
- Encendido de un LED ámbar como alarma visual de la condición crítica.
- Notificación al sistema de navegación de la situación de emergencia para que adopte las medidas correspondientes (ver Sección 4.3).

Esta configuración mantiene el sistema energético operativo con un mínimo consumo, permitiendo aún el control manual desde un mando a distancia.

3.5. Esquema eléctrico y diagrama de bloques

El diagrama de bloques del sistema se presenta en la Figura 4. En el diagrama de bloques se muestran las dos fuentes de energía disponibles (las baterías y la toma de 230 VAC), el contacto conmutado que permite seleccionar entre ambas, el procesador de gestión, el embarcado principal, y el embarcado de 5 VDC no esencial, que incorpora un contacto de relé destinado a su desconexión automática en caso de entrar en modo de supervivencia.

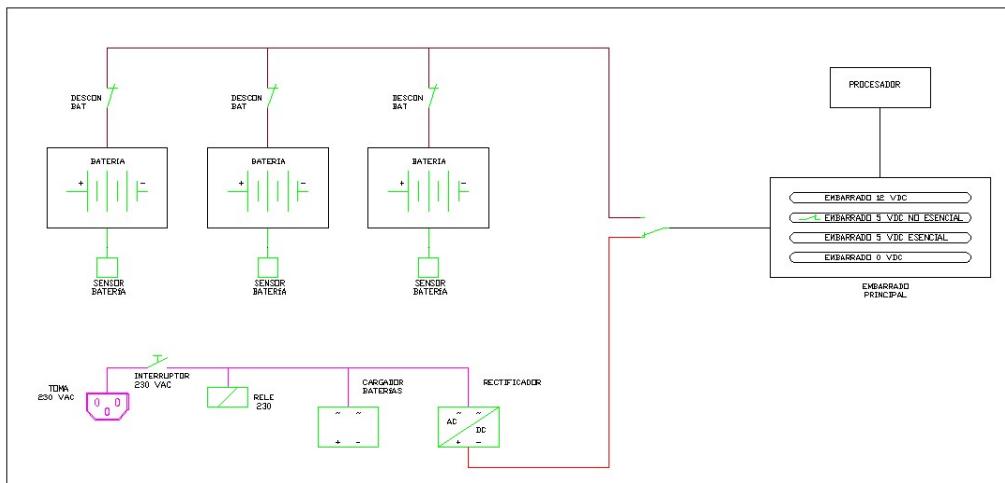


Figura 4: Diagrama de bloques del sistema de autogestión de energía

3.6. Consumos

La Tabla 1 muestra el consumo estimado de cada sistema y el tipo de operación en el modo de supervivencia. El modo manual del sistema de navegación es el que permite el rescate de la embarcación cuando esta entra en modo de supervivencia.

Tabla 1. Consumo de los sistemas y estado en modo supervivencia

SISTEMA	CONSUMO	MODO SUPERVIVENCIA
Navegación	7 A	Modo manual
Lidar	1,5 A	Desactivado
Tanques de lastre	3 A	Modo restringido
Energía	1 A	Modo restringido

3.7. Alimentación del sistema en tierra

Cuando el modelo se encuentra en el taller, puede ser alimentado mediante una conexión a la red eléctrica de 230 VAC. Esta alimentación se activa mediante un interruptor manual que pone en funcionamiento un relé de 230 VAC. A través de sus contactos, dicho relé conmuta entre las fuentes de alimentación, activando tanto la fuente de alimentación interna como el cargador de baterías (ver Figura 5). En este estado, es posible operar el modelo de forma segura mientras se cargan las baterías.

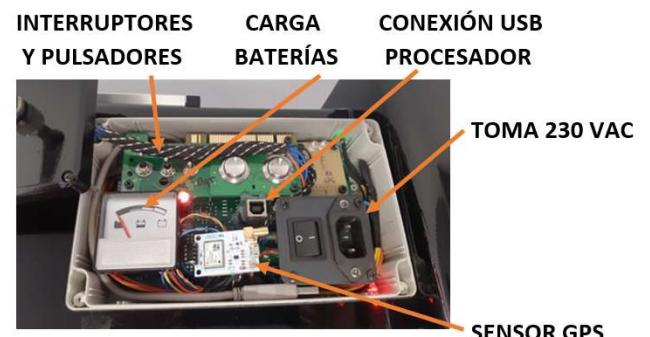


Figura 5: Detalle de la toma de 230 VAC y pulsadores para testeo manual

4. Modos de funcionamiento

Los modelos NASHI operan mediante diferentes procesadores, lo que requiere una comunicación constante entre ellos para intercambiar información sobre el estado de los sistemas que controlan. En particular, el sistema de autogestión de energía contempla tres modos de funcionamiento: modo manual, modo automático y modo de supervivencia. En el interior del modelo se encuentran tanto el procesador de navegación como el receptor de radiocontrol, que recibe las órdenes del mando a distancia. Para seleccionar entre el modo manual o automático, es necesario conmutar las

conexiones de la señal del servo del timón y del variador del motor, conectándolos o bien al receptor de radiocontrol (modo manual), o bien al procesador de navegación (modo automático).

4.1. Modo de funcionamiento manual

Los modelos pueden ser controlados manualmente mediante un mando de radiocontrol con seis canales, lo que permite operar remotamente todos los sistemas de a bordo. En lo que respecta al sistema de autogestión de energía, cuando se encuentra en modo manual, detiene el testeo automático de las baterías. No obstante, se incorpora un pulsador de prueba manual en la caja de conexiones de a bordo que permite al usuario realizar comprobaciones puntuales. Al pulsar este botón, se ejecuta un testeo individual de las baterías y se procede a la desconexión de aquella que presente una tensión inferior al umbral definido.

4.2. Modo de funcionamiento automático

En el modo automático, todos los sistemas de a bordo son gestionados de forma autónoma mediante la lectura de los diferentes sensores instalados. En particular, el sistema de autogestión de energía realiza un testeo periódico de las baterías, detectando posibles deterioros. En este modo es cuando automáticamente se detectan las baterías defectuosas con testeos periódicos desconectándolas si procede y activando el modo supervivencia avisando al procesador de navegación, ya que en el modo manual aunque también las detecta y emite el aviso, no procede de forma automática. Todo esto con el fin de preservar la operatividad y conseguir un consumo mínimo del modelo para facilitar su rescate.

4.3. Modo de funcionamiento de supervivencia

El modo de supervivencia es activado cuando el sistema de energía detecta que dos de las tres baterías están en mal estado. Cuando se detecta la situación de supervivencia, el procesador de energía y el de navegación (para NASHI 1) y el procesador de energía, navegación, LIDAR, y procesador de sistemas de lastre (para NASHI 2), ejecuta las acciones necesarias críticas destinadas a preservar la seguridad de la embarcación y optimizar el uso de la energía restante para su rescate. En los dos modelos, el objetivo de conservar la energía y optimizar el rescate, es el mismo pero en NASHI 2 se debe tener en cuenta que aunque al tener más sistemas trabajando a bajo rendimiento, estos generan un consumo adicional respecto a NASHI 1, con lo que la energía restante para su rescate es inferior.

En ambos modelos, las acciones que realiza es: desactivar el embarrado de 5 VDC no críticos o no esenciales que es la acción más importante de todas por prevenir el exceso de consumo preservando la energía limitada que queda a bordo al mínimo indispensable, el procesador de energía informa al resto de procesadores de a bordo del nuevo estado operativo (el de supervivencia) de modo que estos activen sus respectivos algoritmos de supervivencia de ahorro de energía diseñados para este escenario. El desconectar el embarrado de 5 VDC no esenciales se realiza con otro contacto conmutado (distinto a la selección de fuente de energía) donde al desactivar el embarrado, activa un LED ámbar como señal

visual que indica que la embarcación ha entrado en modo supervivencia.

Las pruebas realizadas han demostrado un comportamiento satisfactorio del sistema: cuando una batería cae por debajo de 11.6 VDC, es desconectada automáticamente. Si se desconectan dos baterías, el sistema desactiva los sistemas no críticos, activa la señalización visual, y ordena al sistema de navegación detener el motor y colocar el timón a 0°, quedando el modelo listo para su operación remota en caso de rescate.

5. Conclusiones y líneas futuras

En las pruebas realizadas, el sistema de autogestión energética desarrollado ha demostrado un funcionamiento correcto y robusto. La desconexión automática de las baterías deterioradas, la activación del modo de supervivencia, la coordinación con el resto de procesadores y el comportamiento general de la embarcación en condiciones críticas han funcionado según lo previsto.

En cuanto a las líneas futuras del proyecto, se plantea trabajar en la mejora de la eficiencia energética y el rendimiento global del modelo. Una primera propuesta consiste en sustituir las baterías de ácido-plomo actuales por baterías de litio u otras tecnologías con mayor eficiencia energética. Esto es debido a que las baterías de ácido plomo no deben descargarse por debajo del 65% de su capacidad para preservar su vida útil, ya que, al superar este umbral, la caída de tensión entre bornes puede comprometer su integridad, además que estas baterías tienen un peso considerable y tienen el ácido en forma líquida, lo que provocaría un escape de ácido pudiendo corroer los circuitos en caso que la embarcación superara cierta escoria. Una alternativa sería instalar baterías de ácido-plomo de tipo AGM en el que el ácido está en forma de gel y no en forma líquida. Una alternativa adecuada en cuanto a peso, eficiencia, eficacia y seguridad respecto al ácido serían las baterías de litio que permiten una descarga de hasta un 80% sin deterioro significativo, además de ofrecer una reducción de peso, lo que disminuye la energía necesaria para su transporte a bordo.

Otra línea de desarrollo consiste en incorporar un sistema de generación de energía mediante placas solares, que permita la recarga de baterías durante la navegación. En escenarios donde el consumo de energía sea inferior a la generada (por ejemplo, con baja velocidad o durante el día), se podría llegar a diseñar un sistema en el que el modelo mantenga una autonomía energética prácticamente indefinida, incluso durante la noche mediante almacenamiento previo. Para llegar a conseguir este objetivo se necesitarían unas placas solares de alta densidad de generación energética (superficie solar respecto a cantidad de generación de electricidad) y consumos bajos de corriente con equipos, sensores, motor, etc.. eficientes con bajos consumos, cumpliendo el objetivo.

Referencias

- Chen, H., Wen, Y., Zhu, M., Huang, Y., Xiao, C., Wei, T., Hahn, A., (2021) From automation system to autonomous system: An architecture perspective. Journal of Marine Science and Engineering, 9, 645.
DOI: 10.3390/jmse9060645

Gondres Torné, I., Lajes Choy, S., & del Castillo Serpa, A. (2018). Gestión del mantenimiento a interruptores de potencia. Estado del arte. Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería, 26(2), 192–202.
DOI: 10.4067/S0718-33052018000200192

International Maritime Organization (IMO). 2021. Outcome of the regulatory scoping exercise for the use of maritime autonomous surface ships (MASS), MSC.1/Circ.1638,3 June 2021. London

International Maritime Organization (IMO). 2019. Interim guidelines for MASS trials. MSC.1/Circ.1604 14 June 2019. London

International Maritime Organization (IMO). 2020. Chapter 8 IMO Legal Regulation of Maritime Autonomous Surface Ships: Progress, Trends and China's Response.

DOI: 0.1163/9789004706279_010

Liu, J., Aydin, M., Akyuz, E. et al. 2022. Prediction of human–machine interface (HMI) operational errors for maritime autonomous surface ships (MASS). *J Mar Sci Technol* 27, 293–306.

DOI: 10.1007/s00773-021-00834-w

McKie, R. 2023. Maritime autonomous surface ships (MASS) and SAR. A: International Maritime Rescue Federation. London: IMRF.

Ornulf Jan Rodseth et al 2022 *J. Phys. Levels of autonomy for ships. Conf. Ser.* 2311 012018.

DOI: 10.1088/1742-6596/2311/1/012018

Wright, G.R. 2020. Unmanned and autonomous ships. Taylor & Francis Group. New York

DOI: 10.1201/978042945065