

Jornadas de Automática

Impresión 3D a bordo: Fabricación de componentes críticos en navegaciones oceánicas

Jove-Bueno, Marc^{a,*}, Borén, Clara^b, Vela, Montserrat^c, Fernandez-Canti, Rosa M.^a

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

^b Dpto. de Ciencia e Ingeniería Náuticas, Universitat Politècnica de Catalunya, Facultat de Nàutica de Barcelona, Edifici NT1. Pla de Palau, 18, 08003 Barcelona, España.

^c Dpto. de Matemáticas, Universitat Politècnica de Catalunya, Campus Diagonal Sud, Edifici U. C. Pau Gargallo, 14, 08028 Barcelona, España

To cite this article: Jove-Bueno, Marc, Borén, Clara, Vela, Montserrat, Fernandez-Canti, Rosa M. . 2025. 3D Printing on Board: Manufacturing Critical Components for Ocean-Going Ships. Jornadas de Automática, 46.
<https://doi.org/10.17979/ja-cea.2025.46.12262>

Resumen

Este trabajo se centra en el mantenimiento correctivo de componentes críticos a bordo de embarcaciones de pequeña eslora por medio del escaneado e impresión 3D. Se describe el funcionamiento del sistema de refrigeración de un motor marino y se considera la detección de fallos de la bomba de agua del mar. A fin de poder llevar a cabo la reparación de ésta, se detalla cómo realizar su escaneado e impresión 3D a bordo. Se analizan los materiales más adecuados para la impresión 3D en el entorno marino y se presentan tres alternativas para la fabricación y ensamblaje del impulsor de la bomba.

Palabras clave: Navegación, guía y control de sistemas marinos, Modelos de mantenimiento y servicios, Procesado de imagen, Análisis de confiabilidad y seguridad, Análisis estructural y evaluación residual, Monitoreo de calidad del producto y rendimiento de control.

3D Printing on Board: Manufacturing Critical Components for Ocean-Going Ships

Abstract

This paper focuses on the corrective maintenance of critical components onboard small vessels using 3D scanning and printing. The operation of a marine engine's cooling system is described and fault detection of the seawater pump is considered. To enable repair of the pump, the paper details how to perform 3D scanning and printing onboard. The paper analyzes the most suitable materials for 3D printing in the marine environment, and presents three alternatives for the manufacture and assembly of the pump impeller.

Keywords: Marine system navigation, guidance and control, Maintenance models and services, Image processing, Analysis of reliability and safety, Structural analysis and residual evaluation methods, Monitoring of product quality and control performance.

1. Introducción

En los últimos años, gracias a los avances en los campos de la tecnología naval y las comunicaciones son cada vez más las personas que se plantean emprender navegaciones oceánicas, incluso en solitario, en embarcaciones de pequeña

eslora. Los sistemas de propulsión y gobierno de este tipo de embarcaciones, y de todas las embarcaciones de recreo en general, incorporan diferentes componentes críticos que, en caso de rotura o avería pueden comprometer seriamente la navegación y seguridad de los tripulantes. El mantenimiento tanto preventivo como correctivo de estos componentes es

fundamental. En el caso de navegaciones oceánicas no es posible realizar aproximaciones de emergencia a puertos cercanos a fin de reparar las averías o conseguir piezas de repuesto, por lo que no solo es deseable llevar en la embarcación piezas de recambio, sino también disponer de sistemas de monitorización del estado de los componentes y de la capacidad de llevar a cabo reparaciones a bordo. En los últimos años, se ha introducido el uso de las tecnologías de escaneado e impresión 3D a bordo de los buques mercantes con el objetivo de reparar *in situ* piezas y componentes críticos (Abbas et al., 2017) (Kostidi and Nikitakos, 2017). El uso de estas tecnologías aún no se ha extendido a las embarcaciones pequeña eslora a pesar de que según el informe de la Agencia de Seguridad Marítima Europea EMSA, gran número de accidentes por pérdida de gobierno involucran básicamente este tipo de embarcaciones (EMSA, 2024).

Entre los elementos críticos de gobierno y propulsión que pueden fallar se encuentran los componentes del timón, las sujeciones de las velas y elementos de la refrigeración del motor. Los fallos en el motor son especialmente críticos porque pueden dejar sin alimentación a todos los sistemas electrónicos de ayuda a la navegación de la embarcación.

Este trabajo se centra en el sistema de refrigeración del motor y más concretamente en la bomba de agua de mar, que es un elemento de los que presentan más desgaste y su rotura puede comprometer el funcionamiento del motor y del resto de sistemas.

El artículo se organiza de la siguiente manera. En la Sección 2 se describe el sistema de refrigeración de un motor marino para embarcaciones de pequeña eslora, y la detección de fallos del impulsor de la bomba de agua. En la Sección 3 se aborda el proceso del escaneado 3D de la pieza. En la Sección 4 se detalla el proceso de corrección del modelo 3D. En la Sección 5 se analizan los materiales más adecuados para su impresión 3D y se proponen diversos métodos para la reparación de este tipo de piezas. Finalmente, en la Sección 6 se presentan las conclusiones del trabajo.

2. Sistema de refrigeración del motor

La Figura 1 muestra un esquema simplificado del sistema de refrigeración del motor de una embarcación de recreo. Este consta principalmente de dos circuitos: el circuito de agua de mar y el circuito de líquido refrigerante.

2.1. Funcionamiento

En el circuito de agua de mar, ésta es aspirada a través de la cola sail-drive (1), filtrada (2) y llevada hacia la bomba de agua salada (3). Para evitar el efecto sifón, a la salida de la bomba, el conducto forma un cuello de cisne y cuenta con una bomba de vacío (4). La bomba lleva el agua de mar hacia el intercambiador de calor (5) para que pueda enfriar el líquido refrigerante. A la salida del intercambiador el agua pasa al codo de escape y de ahí se inyecta al conducto de gases de escape (6). De esta manera se enfrían también los gases antes de ser expulsados y se atenúa el ruido producido por las turbulencias en el colector de aguas.

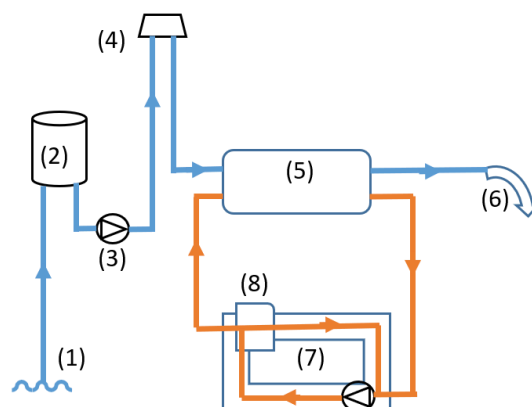


Figura 1: Sistema de refrigeración de un motor marino

El circuito refrigerante está formado por dos subcircuitos. El primero está dentro del propio bloque motor (7) y está activo mientras la temperatura del motor está por debajo de la temperatura de apertura del termostato (8). En este caso el líquido refrigerante circula por dentro del bloque motor por medio de la bomba de recirculación (9) y se va calentando. Cuando la temperatura del líquido alcanza la temperatura de apertura del termostato (a los 80-90°C típicamente), parte del líquido refrigerante pasa al intercambiador y retorna a la bomba de recirculación. A medida que va aumentando la temperatura del líquido, más porcentaje de él es llevado hacia el intercambiador y enfriado por el agua de mar hasta que se alcanza el equilibrio y se mantiene al motor en su temperatura de funcionamiento nominal.

2.2. Detección de fallos en el impulsor de la bomba de agua

Puesto que la rotura del impulsor de la bomba de agua de mar puede dejar sin alimentación a la embarcación y por tanto no sería posible llevar a cabo la reparación usando las técnicas propuestas, es necesario tener información continua del estado de este componente para poder realizar el mantenimiento mientras el motor todavía está en funcionamiento.



Figura 2: Impulsor de la bomba de agua de mar

Según (Beebe, 2004) existen diferentes sensores que nos permiten detectar de forma temprana los daños en las bombas. Aunque en nuestro caso el principal es el sensor de temperatura del propio motor (termopar o sensor PT100), también es posible determinar el estado del impulsor con ayuda de sensores de vibración (*impact sound sensors*), de presión (antes y después de la bomba) o de caudal.

Ello es así puesto que el desgaste o los daños en el impulsor (Figura 2) se reflejan en un aumento de la temperatura, en vibraciones, en cambios en la presión, caudal, y velocidad, y en el tiempo que tarda en detenerse después de haber estado en funcionamiento. Si se detecta alguno de estos síntomas, es aconsejable extraer el impulsor para una inspección visual a fin de valorar si es necesario sustituirlo por una nueva pieza.

3. Escaneado 3D

En travesías largas con pocas escalas es recomendable disponer de piezas de repuesto de los diferentes sistemas para poder llevar a cabo reparaciones de emergencia. Sin embargo, ello no evita que se produzcan fallos en piezas de las que no se tiene recambio o fallos repetidos sobre una misma pieza. Es por ello por lo que si se dispone de impresora 3D a bordo interesa contar también con los modelos de los diferentes componentes. En el caso de que sea necesario reparar una pieza de la que no se dispone ni recambio ni modelo es necesario realizar un escaneo.

Recientemente han aparecido en el mercado escáneres portátiles que no es necesario conectar a un ordenador y que, por su tamaño, permiten el escaneo incluso en zonas de difícil acceso (ver por ejemplo los de las marcas REVOPOINT® y CREALITY®). Este tipo de escáneres es el más adecuado para la aplicación que estamos considerando.

3.1. Tipologías de escaneo

El propósito del escaneo 3D de un objeto físico es la obtención de un modelo 3D del mismo en formato digital. Los escáneres se clasifican según su tecnología y su modo de uso.

Existen dos tecnologías principales de escaneo: *luz estructurada* y *láser*. Un escáner de luz estructurada proyecta patrones de luz sobre el objeto y detecta las formas. Está compuesto por un proyector que genera los patrones y cámaras que capturan la distancia entre los puntos. La luz emitida puede ser visible (fácil de usar y captura información rápidamente) o infrarroja (permite capturar los colores de los objetos y no causa reflejos en superficies brillantes). Un escáner láser realiza proyecciones de puntos o líneas y un sensor mide la distancia que lo separa de la superficie del objeto. Este tipo de tecnología es adecuada para superficies reflectantes o negras.

Según su modo de uso, los escáneres 3D se clasifican en *fijos*, *portátiles* o *mixtos*. Las unidades fijas suelen tener mayor precisión y se utilizan para objetos pequeños. Las unidades portátiles se caracterizan por su gran versatilidad. Las combinaciones fijas-portátiles ofrecen una amplia gama de posibilidades, ya que combinan las ventajas de ambos modos de uso.

3.2. Fases del escaneado

El proceso de escaneo 3D consta de tres fases:

Fase 1. Preparación del objeto. En esta fase, la pieza o geometría a escanear se prepara con marcadores reflectantes o con un espray para preparar la superficie si el objeto es brillante, negro o transparente (Figura 3). Los marcadores reflectantes son pequeñas pegatinas o imanes con una zona reflectante circular en el centro y un anillo negro externo que se colocan sobre o alrededor del objeto para facilitar su localización. Ello permite una alineación precisa de los datos de escaneo y proporciona alta precisión en objetos grandes.

El uso del espray permite preparar objetos brillantes, translúcidos o muy oscuros para el escaneo, aplicando una fina capa sobre la superficie para evitar la distorsión lumínica.

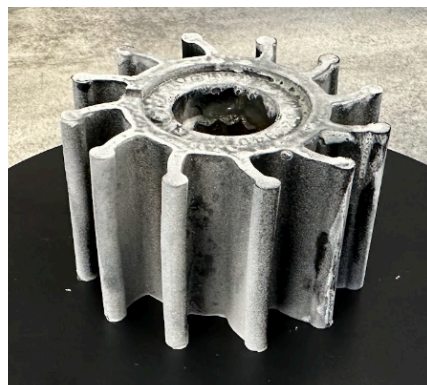


Figura 3: Preparación del impulsor para su escaneo

Fase 2. Escaneo. Durante el escaneo 3D, se realiza una captura masiva de puntos para obtener una nube de puntos (Figura 4).

La nube de puntos consta de millones de puntos posicionados tridimensionalmente, formando con precisión una entidad física y representando una superficie. En este caso, como será necesario rectificar la pieza, se realiza un escaneo rápido para obtener aproximadamente las formas geométricas.

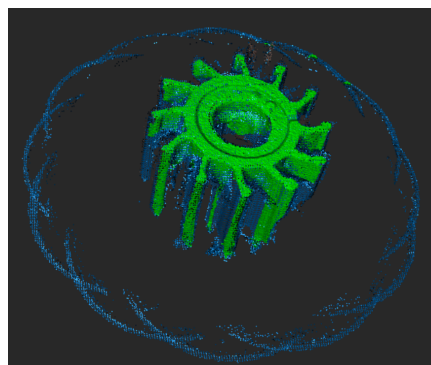


Figura 4: Escaneo 3D del impulsor

Fase 3. Postprocesado. En esta fase se edita la nube de puntos para corregir defectos, eliminar ruido, y rellenar huecos, entre otros, y se edita la malla para obtener un modelo 3D (Figura 5).



Figura 5: Modelo 3D del impulsor.

4. Reparación del modelo escaneado

A fin de recuperar las dimensiones originales del impulsor desgastado, se han empleado técnicas de análisis, ajustes y reconstrucción geométrica mediante Rhinoceros®. El objetivo es obtener un modelo digital preciso, que respete las características originales del impulsor y en el que se hayan eliminando el desgaste y las imperfecciones producidas por el uso continuado de la pieza.

El proceso realizado se divide en las siguientes fases:

4.1. Fase 1: Importación y análisis de la malla 3D

El proceso de reparación se inicia con la importación 3D del impulsor al entorno de Rhinoceros® (Figura 6). Durante esta fase, se realiza un análisis preliminar de la geometría para identificar las áreas afectadas por el desgaste y las diferencias dimensionales debidas al deterioro.



Figura 6: Malla importada. Vista superior.

4.2. Fase 2: Verificación y ajuste dimensional

Una vez importada la malla, se fija el diámetro global del impulsor como referencia base. Se extraen los datos críticos (diámetro interno del buje y el diámetro exterior de los álabes). Se establecen referencias de dimensiones reales mediante el uso de líneas guía. Ello permite establecer una base precisa y visual para la alineación y rectificación de los álabes y del buje para así mantener las proporciones correctas y una simetría adecuada.

4.3. Fase 3: Diseño 2D del perfil del impulsor

Con los parámetros dimensionales definidos, se procede a la elaboración del diseño en 2D (Figura 7). Se reestructuran los álabes, asegurando una disposición recta y fiel al recambio original sin desgaste, permitiendo establecer una base geométrica rigurosa para la posterior reparación.

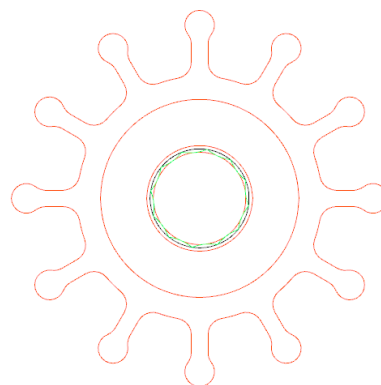


Figura 7: Diseño 2D del impulsor

4.4. Fase 4: Reconstrucción 3D

Finalmente, el diseño se extiende mediante el uso de la herramienta de extrusión hasta la altura real del impulsor. Esta operación transforma el diseño plano en un diseño sólido tridimensional. El resultado obtenido es un modelo digital homogéneo y funcional, apto para su impresión 3D (Figura 8 y Figura 9) como reparación temporal de la bomba.



Figura 8: Diseño 3D del impulsor, vista superior.

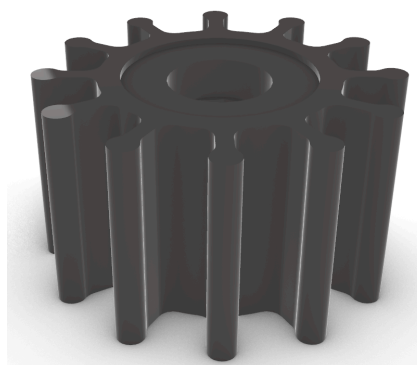


Figura 9: Diseño 3D del impulsor, vista perspectiva.

5. Impresión 3D

5.1. Materiales para la impresión

La fabricación aditiva mediante Fabricación por Fusión de Filamento (FFF) representa una de las tecnologías de impresión 3D más empleadas en la investigación y desarrollo de prototipos y piezas funcionales. Con esta tecnología de extrusión, se funde el material y se deposita en sucesivas capas de material termoplástico permitiendo la construcción de geometrías complejas. La selección del filamento es determinante en cuanto a las propiedades mecánicas, térmicas y superficiales de la pieza final. Los filamentos pueden ser polímeros termoplásticos (capaces de fundirse y moldearse de manera controlada), materiales compuestos (filamentos con refuerzos, ya sea con fibras o con aditivos), filamentos de metal (contienen una alta proporción de partículas metálicas mezcladas con matriz polimérica) y materiales de soporte (para funcionar como estructuras temporales y ser retiradas de forma manual con agua o disolventes).

Para la fabricación del impulsor mediante impresión 3D con la tecnología FFF, es fundamental la selección de materiales con propiedades mecánicas equivalentes a las del neopreno y el latón. El objetivo es replicar tanto la flexibilidad y la resistencia elastomérica de las paletas como la rigidez estructural del buje. A continuación se presentan algunos polímeros que podrían cumplir esta función:

Materiales flexibles para las paletas: Para emular el comportamiento elastomérico del neopreno, se requieren de filamentos con alta elasticidad, buena resistencia química y resistencia en esfuerzos mecánicos cíclicos:

Poliuretano Termoplástico (TPU): Excelente resistencia a la fatiga y a la deformación con diferentes tipos de dureza (Shore A).

Estireno-Etileno-Butadieno-Estireno (SEBS): Elasticidad elevada y resistencia química para medios agresivos.

Elastómero Termoplástico (TPE): Alta elongación y recuperación aunque tiene mayor tendencia a la deformación si no está optimizado los parámetros de impresión.

Materiales rígidos para el núcleo: El material debe garantizar rigidez, estabilidad dimensional y resistencia mecánica para soportar los esfuerzos internos:

Polietileno Tereftalato Glicol-Modificado (PETG): Buena resistencia al impacto y estabilidad térmica.

Nylon (PA6 o PA12): Alta resistencia mecánica y a la abrasión.

Policarbonato (PC): Excelente resistencia estructural y térmica.

5.2. Métodos de fabricación y ensamblaje

A continuación se proponen tres alternativas de fabricación y ensamblaje del impulsor mediante el uso de la impresión 3D:

La primera alternativa es la *impresión integral en TPU* con diseño de buje incorporado (Figura 10). En esta opción, el impulsor se fabricará completamente en poliuretano termoplástico (TPU) integrando el buje en el diseño de la pieza. Esta solución permite una instalación rápida y directa.

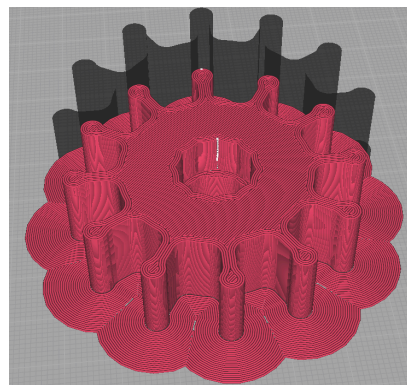


Figura 10: Vista previa del impulsor integral.

Diseño bimaterial con estructura diferenciada (Figura 11). En esta opción se plantea la fabricación del impulsor con una combinación de materiales: la parte externa y los álabes se imprimirán en un material más elástico (TPU) para optimizar la deformación y adaptación, mientras que el núcleo interno (el buje) y la zona de anclaje se imprimirán en PETG, que al ser un material más rígido proporciona una mayor resistencia estructural y durabilidad.

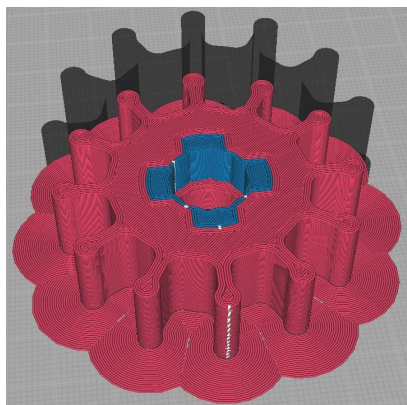


Figura 11: Vista previa del diseño bimaterial.

Impresión sin buje incorporado y ensamblaje posterior (Figura 12). En esta alternativa, el impulsor se imprimirá en TPU sin el buje, permitiendo el aprovechamiento del buje de latón del impulsor desmontado. La unión se realizará mediante la aplicación de calor con un soldador de estaño, logrando una fijación firme del estriado del buje al nuevo impulsor.

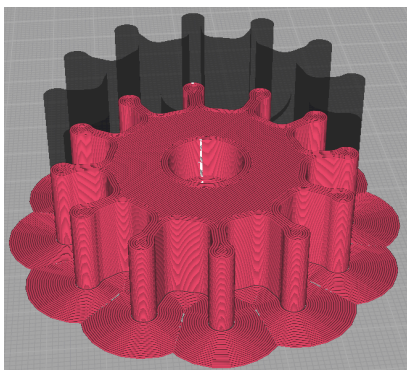


Figura 12: Vista previa del impulsor sin buje incorporado.

Finalmente, en la Figura 13 se muestra la impresión correspondiente con Ácido Poliláctico (PLA) del diseño sin buje incorporado, imprimida en condiciones de laboratorio, con el propósito de validar la geometría y las dimensiones respecto al modelo original.

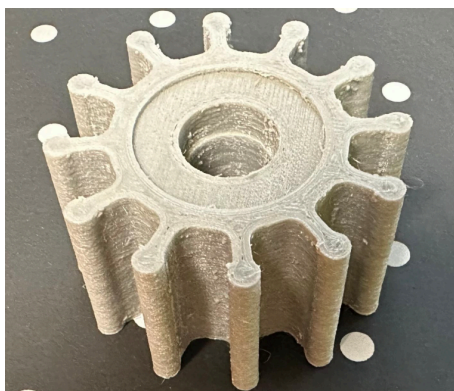


Figura 13: Impulsor impreso 3D.

6. Conclusiones

Una posibilidad real y práctica para llevar a cabo el mantenimiento correctivo a bordo en embarcaciones en largas travesías consiste en disponer a bordo de una impresora 3D y de los materiales necesarios para llevar a cabo las reparaciones de componentes críticos para el gobierno y propulsión de la embarcación. Adicionalmente, la posibilidad de disponer un escáner 3D a bordo permite modelar de forma precisa la pieza dañada, corregir los daños y agilizar el proceso de reparación.

Las tres alternativas propuestas para la fabricación del impulsor mediante impresión 3D con tecnología FFF representan una opción viable y flexible para realizar una reparación temporal en escenarios de emergencia. Cada uno de los métodos presentados demuestran la adaptabilidad que ofrece la fabricación aditiva permitiendo aprovechar el amplio abanico de materiales disponibles así como la capacidad de generar diseños geoméricamente complejos. Es indispensable enfatizar que, si bien estas soluciones son técnicamente factibles para mantenimientos correctivos, su rendimiento y durabilidad deben ser validados en condiciones operativas reales.

Resulta fundamental considerar también aspectos operativos en entornos marinos. La impresora debe contar con una fuente de alimentación estable ya sea proporcionada por la propia embarcación como, en caso de limitaciones, proporcionado por baterías auxiliares que aseguren el funcionamiento durante el tiempo necesario para imprimir un recambio. Es crucial tener en cuenta los tiempos de impresión, material empleado, movimientos de las embarcaciones y el ambiente marino que podría influir en la

calidad y precisión de la pieza. Por ello, es necesario implementar medidas de estabilización y protección de la impresora así como llevar a cabo un buen mantenimiento de los equipos.

Por otro lado, es posible optimizar el proceso de obtención del recambio llevando a bordo los modelos digitales previamente diseñados y preparados para el proceso de laminado, permitiendo la adaptación a los parámetros específicos de la impresora que se tenga disponible en ese momento. En caso de disponer de una impresora 3D operativa, se pueden llevar los modelos ya laminados y probados previamente para que el proceso de obtención de un recambio sea más rápido minimizando los tiempos de preparación y configuraciones.

Los próximos trabajos se centrarán en evaluar la eficiencia y estabilidad funcional de estas alternativas durante su uso prolongado, con el objetivo de establecer protocolos de diseño optimizados y garantizar resultados robustos y fiables a lo largo del tiempo. Además, se estudiará la impresión de dichas piezas durante la operatividad de una embarcación.

Referencias

- Abbas, M. A., Lichti, D. D., Chong, A. K., Setan, H., Majid, Z., Lau, C. L., Idris, K. M., & Ariff, M. F. M., 2017.. Improvements to the accuracy of prototype ship models measurement method using terrestrial laser scanner. *Measurement*, 100, 301–310.
DOI: 10.1016/J.MEASUREMENT.2016.12.053
- Beebe, R. 2004. Predictive maintenance of pumps using condition monitoring. Elsevier Science.
- European Maritime Safety Agency (EMSA). 2024. Annual Overview of Marine Casualties and Incidents. Lisbon. Portugal.
- Heikkinen, I. T. S., Kauppinen, C., Liu, Z., Asikainen, S. M., Spoljaric, S., Seppälä, J. v., Savin, H., & Pearce, J. M., 2018. Chemical compatibility of fused filament fabrication-based 3-D printed components with solutions commonly used in semiconductor wet processing. *Additive Manufacturing*, 23, 99–107.
DOI: 10.1016/J.ADDMA.2018.07.015
- Kostidi, E. & Nikitakos, N., 2017. Exploring the Potential of 3D Printing of the Spare Parts Supply Chain in the Maritime Industry: Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. In book: *Safety of Sea Transportation. Proceedings of the 12th International Conference on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation (TransNav 2017)*, June 21-23, 2017, Gdynia, Poland.
- Phillips, B. T., Allder, J., Bolan, G., Nagle, R. S., Redington, A., Hellebrekers, T., Borden, J. Additive manufacturing aboard a moving vessel at sea using passively stabilized stereolithography (SLA) 3D printing. *Additive Manufacturing*, 31, 100969.
DOI: 10.1016/J.ADDMA.2019.100969
- Vujović, I., Šoda, J., Kuzmanić, I., & Petković, M. (2021). Parameters evaluation in 3D spare parts printing. *Electronics*, 10(4), 365.
DOI: 10.3390/electronics10040365
- Ziółkowski, M., & Dyl, T. (2020). Possible applications of additive manufacturing technologies in shipbuilding: A review. *Machines*, 8(4), 84.
DOI: 10.3390/machines8040084