

SENSORES INTELIGENTES Y MÓDULO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO EMBARCADO (MAPRE)

Francisco LAMAS LÓPEZ
Doctor ingeniero ENPC ParisTech



En memoria del capitán de navío Javier de Ory Arriaga, jefe del Área de Gestión de Tecnologías e Innovación en DGAM-PLATIN, que siempre nos apoyó en la consecución de nuestros objetivos y en el desarrollo de estos programas de innovación tecnológica.



EL mismo modo que en el número de diciembre 2021 de la REVISTA GENERAL DE MARINA se describieron los objetivos del programa MEVIMAN (Módulo Embarcado de Vigilancia de Mantenimiento), en este se detallarán, desde un punto meramente divulgativo, los objetivos del programa MAPRE, actualmente en desarrollo en CESADAR-Central. Este proyecto trata sobre el desarrollo del Módulo de Mantenimiento Predictivo Embarcado, financiado por DGAM-PLATIN dentro de las acciones previstas en el plan de I + D + i del MINISDEF. Se explicará el proceso que se ha seguido hasta llegar a desarrollar este programa de innovación industrial tras haberse acometido las primeras etapas de la automatización de procesos de vigilancia en CESADAR, que desembocó en 2021 en el prototipado para el embarque de sistemas de análisis y monitorización a bordo MEVIMAN. El objetivo principal es dar al lector los puntos clave necesarios para comprender la arquitectura, funcionalidades, objetivos y capacidades potenciales del demostrador tecnológico que supondrá MAPRE para el MINISDEF en general y para el CESADAR en particular. Al igual que en anteriores ocasiones, se intentará utilizar un lenguaje que haga comprensible para todos el proceso

de computación de datos y el uso de la inteligencia artificial (IA), evitando tecnicismos que no sean útiles en un trabajo de este tipo. Algunos de los antecedentes van a resumirse para hacer un compendio completo pero compacto. Por ello, el autor se disculpa de antemano si no ha podido describir algún antecedente con la profundidad que el lector hubiese deseado.

Introducción

Tras el establecimiento del CESADAR en 2011 como Centro de Supervisión y Análisis de Datos de la Armada, se han sucedido diversos hitos en la evolución de sus capacidades. Durante los primeros años, la capacidad de análisis de datos en el centro fue muy limitada y se basaba en análisis visual de ploteados de variables. Las series temporales de las variables registradas por los buques que disponían de SICP podían visualizarse en un *software* (SW) desarrollado por Navantia en 2008 (CESADAR v1). Esto impedía cualquier automatización de análisis, así como la aplicación de modelos de computación sobre los datos y se dependía enormemente de las personas que los analizaban y de su conocimiento experto.

En marzo del año 2017 se procedió desde JAL-DISOS, por iniciativa del entonces ADISOS, vicealmirante Marcial Gamboa Pérez-Pardo, y del capitán de navío José Daniel González-Aller Lacalle (entonces jefe de Sección de Plataformas Navales de DISOS), a realizar una primera ronda de contactos con empresas del sector del mantenimiento de activos navales y de sectores ligados a la gestión de datos, que tenía como objetivo comenzar a plantear las distintas opciones de evolución del CESADAR y actualizarlo a capacidades acordes a la denominada revolución 4.0. En esas primeras reuniones se reafirmó la necesidad de ser capaces de aplicar modelos de IA sobre nuestros datos y adaptar la capacidad de análisis a las nuevas tecnologías y modelos inteligentes. La IA cobraba más importancia y era un objetivo prioritario como capacidad para ser adquirida. El mantenimiento predictivo parecía entonces un terreno sencillo para comenzar esta aplicación de nuevas capacidades, pues se disponía de datos de operación de activos desde 2008 de diversos buques y no se partía de cero en cuanto al conocimiento de los sistemas monitorizados. En ese momento se empezó a describir la necesidad de desarrollar el demostrador tecnológico SOPRENE (Sostenimiento Predictivo basado en Redes Neuronales), que se licitó en agosto de 2018 y comenzó su desarrollo en noviembre 2018 con la empresa contratista INDRA. El objetivo era madurar la tecnología y desarrollar una primera arquitectura de *big data* que permitiese la gestión de grandes volúmenes de datos, a la par que se pudiese aplicar sobre estos la computación de modelos de IA, aprendizaje automático y profundo (*machine learning/deep learning-ML/DL*).

El problema principal provino en un principio de la falta de una debida estructuración y limpieza de los datos de CESADAR en el momento de comenzar

SOPRENE, lo que impactaba en la lectura y gestión de todo lo registrado hasta entonces. Para ello, en paralelo, comenzó el programa de desarrollo industrial ATAVIA (financiado por JAL-DISOS), que supuso una primera estructuración correcta de los datos de CESADAR y un integrador de sus funcionalidades disponibles hasta el momento, con capacidad de lectura de diversas fuentes de datos, así como con la posibilidad de digitalizar el conocimiento humano con reglas expertas y la capacidad de automatizar tareas de vigilancia rutinaria de activos mediante *scripts*. Los datos comenzaron en 2019 a estar correctamente estructurados, con capacidad de ser operados con distintos tipos de algoritmia y accesibles para los que necesitasen operar con ella en nuestra institución.

Con estos desarrollos y el despliegue nacional del *hardware* (HW) del clúster ATAVIA en 2021, esta aplicación *web* se convirtió en el principal integrador en tierra (una especie de *ventanilla única* y canal de comunicación con las unidades) de los servicios de CESADAR hacia el resto de la institución (2019-2021). Por otro lado, el programa de innovación industrial SOPRENE, cuyo contratista fue INDRA, finalizó como un demostrador tecnológico entregado en abril de 2021 que supuso alcanzar la madurez tecnológica objetivo (TRL 7), capaz de gestionar y computar los datos de CESADAR aplicando modelos basados en IA.

Una vez se decidió en 2020 llevar a bordo de los buques los modelos de reglas expertas desarrollados en ATAVIA para ejecutarse en tiempo real (con el programa MEVIMAN, 2021), parecía obvio que el siguiente paso de las innovaciones industriales basadas en modelos inteligentes sobre IA, ya comenzadas con SOPRENE, sería llevar también a bordo de los buques la ejecución de los modelos predictivos basados en IA. Todo esto a la par que se avanzase en la madurez tecnológica de sus sistemas en tierra (TRL 8-9). También se establecieron objetivos de desarrollo y despliegue de módulos de sensores inteligentes (SI) que permitiesen una IoT completa en la Armada (*edge computing*) de todo tipo de activos. Así surgió el programa MAPRE, cuya Declaración de Necesidad Funcional se redactó en marzo de 2020 y se licitó en agosto de 2021. El contratista adjudicatario del programa es la UTE-MAPRE (pilotada por Navantia, junto a HI Iberia y Grupo Álava Ingenieros) por un importe de 515.000 euros (BOE 23 de diciembre de 2021) a ejecutar en 24 meses hasta diciembre de 2023. Este es el último de los proyectos no universitarios llevados a cabo por CESADAR desde 2017 (fig. 1). No se tienen en cuenta los proyectos VIDAR (*dashboarding* o panelado de control) y DIANAR (explicabilidad de la IA), pues no son objeto de este artículo.

Objetivos y fases

El objetivo principal de MAPRE es modificar el demostrador actual en tierra SOPRENE para obtener un «predicador en tierra» (PET) y un predicador a bordo (PAB) que sean capaces de computar grandes volúmenes de datos y predecir

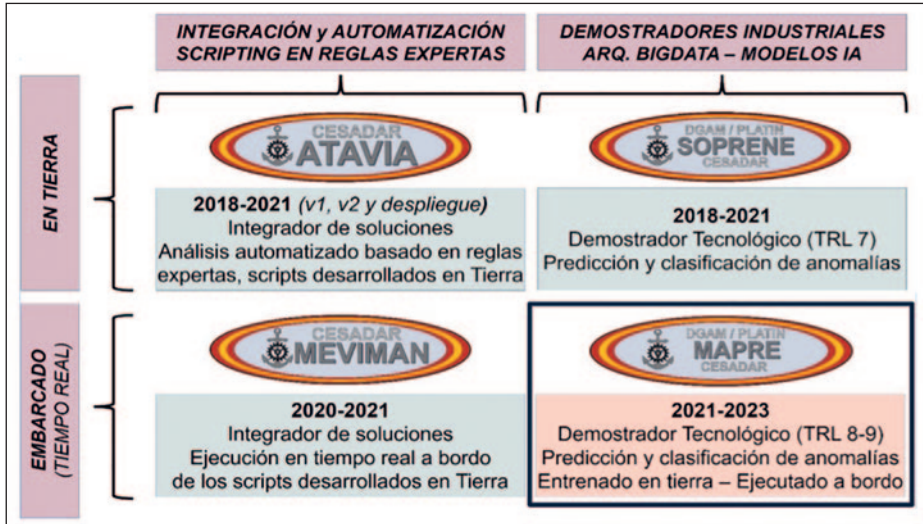


Fig. 1. MAPRE entre los programas de transformación industrial y de innovación desarrollados en CESADAR desde el comienzo de la evolución del centro en 2017

anomalías de activos en distintos horizontes temporales (ligadas a modos de fallo) en sistemas (o equipos de los mismos) a bordo de buques de la Flota. Se comenzará en MAPRE por un listado de 10 sistemas aceptados contractualmente (principalmente propulsión y generación eléctrica en *F-100* y BAM 1.^a y 2.^a series), incluyendo aquí la adaptación de los modelos de predicción ya realizados en SOPRENE. Todos ellos hacen un total de 14 sistemas de la Armada, que implican inicialmente a cinco fragatas *F-100* y seis buques BAM.

El PET será el encargado de entrenar los modelos en tierra y trasladarlos a bordo, y el PAB ejecutará en tiempo real estos modelos para los horizontes temporales más inmediatos y compartirá los resultados con tierra. Además de

DISEÑO, PROCEDIMENTACIÓN Y DESARROLLO DEL PREDICTOR 'PET-PAB'				DISEÑO y FABRICACIÓN "SENSOR INT."	
FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 4	FASE 5	FASE 6
PREPARACIÓN SISTEMA MIXTO PREDICCIÓN 'PET-PAB' AUDITORÍA EXTERNA SOPRENE IMPLANTACIÓN 'HW' DEL 'PET'	DISEÑO, DESARROLLO Y PROTOTIPADO DE SISTEMA EMBARCADO DE PREDICCIÓN EN TIEMPO REAL ('PAB')	PROCEDIMENTACIÓN PARA PUESTA EN OPERACIÓN PET-PAB DESARROLLO DE MODELOS DE PREDICCIÓN DE 'PET' y 'PAB'	IMPLANTACIÓN A BORDO DE 'PAB'+MEVIMAN EN 5 BUQUES (más los 6 que ya dispongan de MEVIMAN) PUESTA EN OPERACIÓN DE SISTEMA PREDICTIVO MAPRE 'PET-PAB'	PROTOTIPADO DE SENSOR INTELIGENTE PREDICTIVO OBJETIVO: 4 CANALES PARA SEÑAL DINÁMICA Y OTROS 4 PARA SEÑAL ESTÁTICA	FABRICACIÓN DE 40 SENSORES INTELIGENTES PREDICTIVOS

Fig. 2. Fases de programa I + D + i MAPRE

la conjunción PET-PAB, está previsto igualmente desarrollar dentro del programa MAPRE un módulo de sensor inteligente (SI) capaz de adaptarse a la toma de datos sobre distintos tipos de activo en la Armada, con el objeto de poder desplegar a medio plazo un IoT completo y concentrar los datos recolectados de comportamiento en la plataforma integradora ATAVIA.

MAPRE se compone de seis fases (fig. 2), un total de siete hitos (separados en diferentes plazos parciales de contrato) durante los 24 meses de desarrollo (comenzando en noviembre de 2021) y 92 entregables (documentales, *software* y *hardware*) definidos en su PPT. Las fases 5 y 6 del SI comenzaron a desarrollarse en paralelo a las 1-4 del PET-PAB al no interferir sus desarrollos entre ellas.

Concepto inicial: entrenamiento en tierra, ejecución a bordo

En primer lugar, se pretende optimizar el demostrador actual de predictor en tierra SOPRENE (actual PET, que derivará en el futuro nuevo PET de MAPRE), evaluando mediante una auditoría externa técnica las partes del proceso que pueden ser optimizadas. Se estudiarán todas las fases de procesamiento de datos y sus herramientas actuales para identificar las partes en las que se pueden mejorar sus rendimientos de computación, sus modelos predictivos y la manera de presentar los resultados. La empresa Telefónica será la encargada de realizar esta auditoría técnica, que comprende un total de 12 entregables. En ella se establecerán también recomendaciones sobre las que fundamentar las pruebas de concepto (POC) y de valor (POV) a realizar sobre herramientas disponibles en el mercado antes de tomar una decisión de (re-)diseño del predictor para su mejora y preparación, con el fin de que MAPRE funcione conjuntamente en tierra y embarcado. Actualmente, las fases de tratamiento de datos en SOPRENE y sus herramientas se componen de las representadas en la figura 3.

Con el objetivo de aumentar la madurez tecnológica del predictor de MAPRE (hacia un TRL 8-9), es posible mejorar algunos de los procesos implantados en SOPRENE (como la ingesta, el preprocesamiento de datos y la puesta en disposición de estos para el *dashboarding* y consumo general de los mismos por los analistas, que a veces resultaba lento y tedioso con la configuración actual) y aprender de los errores en la computación de datos que se estableció en este demostrador existente, así como en los modelos predictivos desarrollados (cuyas predicciones tienen aún margen de mejora y su planteamiento puede evolucionar a metodologías más eficaces en detección de anomalías y eficientes en computación).

Para ello se está diseñando en MAPRE un predictor PET-PAB que permita entrenar los modelos en tierra (donde habrá mayor capacidad de computación) y ejecutar los modelos predictivos entrenados a bordo (donde la capacidad de computación será más limitada en el *hardware* disponible). El esquema planteado

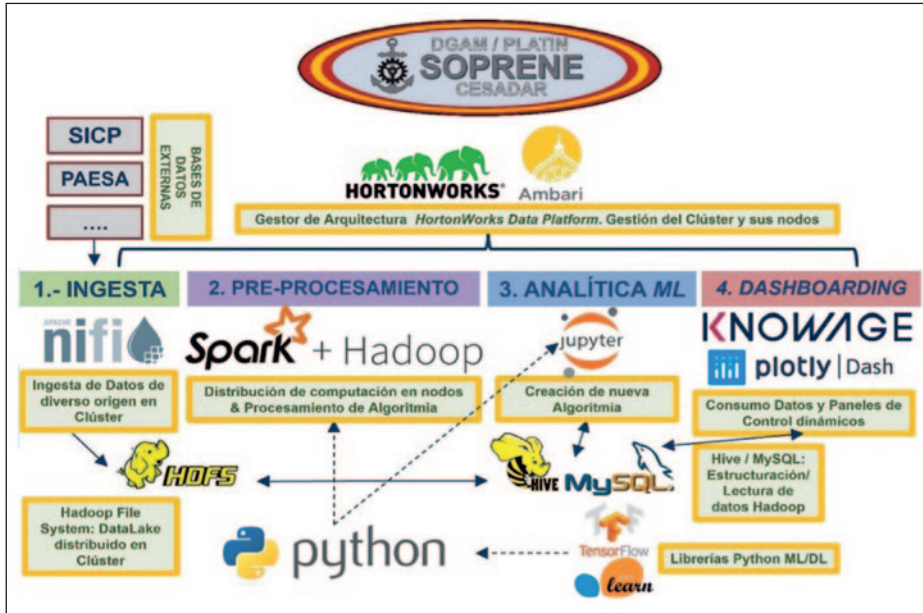


Fig. 3. Fases y herramientas utilizadas en el tratamiento de datos del demostrador tecnológico SOPRENE

para el PET-PAB es el presentado en la figura 4. El predictor tiene que ser capaz de predecir anomalías en las series temporales introducidas (desde SICP y terceras fuentes) y ligarlas a modos de fallo de estos activos. Los modos de fallo están descritos en los llamados FMECAS (por sus siglas en inglés), los cuales son compendios de modos de fallo posibles, de los sistemas o equipos sobre los que se comience a operar el demostrador. Estos FMECAS deben ser aportados por la autoridad de diseño o ser realizados por nosotros bajo metodología desarrollada en SOPRENE y continuada en MAPRE (adaptada de las normas IEC 60812, ECSS-Q-30-02A, MIL-STD-882 y otras). Por último, MAPRE debe predecir el RUL (*Remaining Useful Lifetime*, o tiempo restante de utilidad) del equipo o sistema en cuestión.

Evolución de capacidades de computación

Hasta ahora el proceso de tratamiento de datos (fig. 3) se componía de un flujo de ingesta con pre-procesamiento de datos (en *NiFi*) y luego se ejecutaban los modelos predictivos para establecer probabilidades a modos de fallo en los activos seleccionados (con modelos programados en lenguaje Python sobre

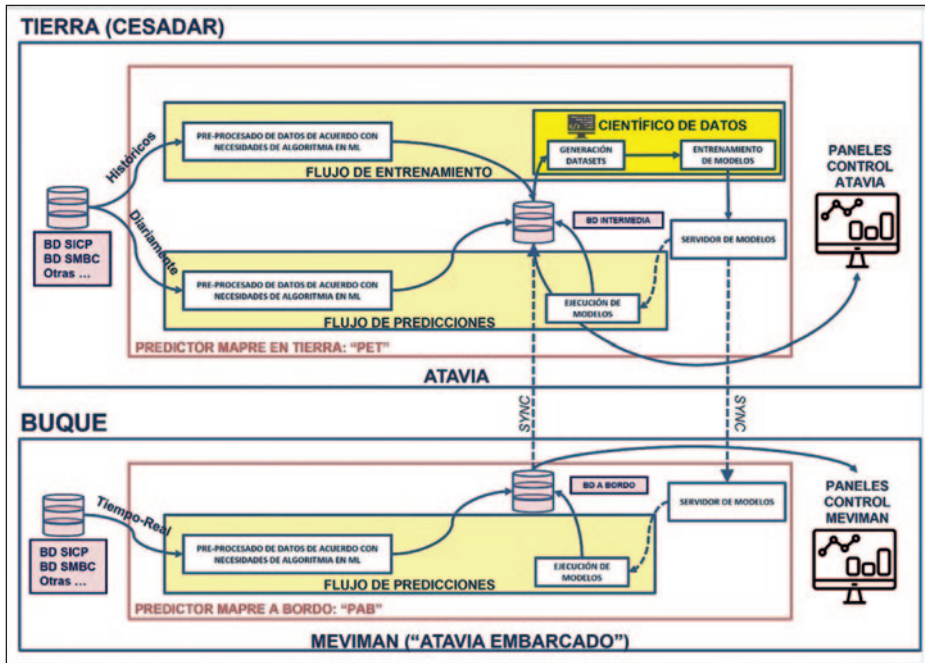


Fig. 4. Esquema de funcionamiento del predictor PET-PAB, «Entrenamiento en tierra, ejecución a bordo»

notebooks de Jupyter, preparado para que trabajen sobre ellos los «científicos de datos»); se utiliza Spark para aprovechar la capacidad de cómputo de todas las máquinas de procesamiento disponibles en el clúster SOPRENE. Los resultados se pueden consumir de diversas formas, ya sea en paneles de control dinámicos (*knowages*) o en el visor preparado a tal efecto en Dash de Plotly (preparado para usuarios analistas, más avanzados). El objeto de las primeras fases de MAPRE es auditar estos procesos, ver qué herramientas nombradas hacen correctamente su función y cuáles se pueden sustituir por otras para establecer un nuevo predictor en tierra (PET), que doblará como mínimo la capacidad de computación del actual SOPRENE y superará los 150 núcleos de computación (sin contar GPU) y los 800 GB de RAM. Además, para escoger las herramientas a introducir en el flujo, se deben fundamentar correctamente las decisiones que se tomen. Para ello se van a hacer al menos 25 reducidas pruebas de concepto (POC) sobre ellas y al menos una de valor completa (POV) satisfactoria del nuevo entorno que se prevea para el nuevo PET antes de diseñarlo y desarrollarlo con sus capacidades completas.

Toda decisión quedará debidamente justificada, llegándose a un balance entre las herramientas presentes ya utilizadas en el entorno SOPRENE, la

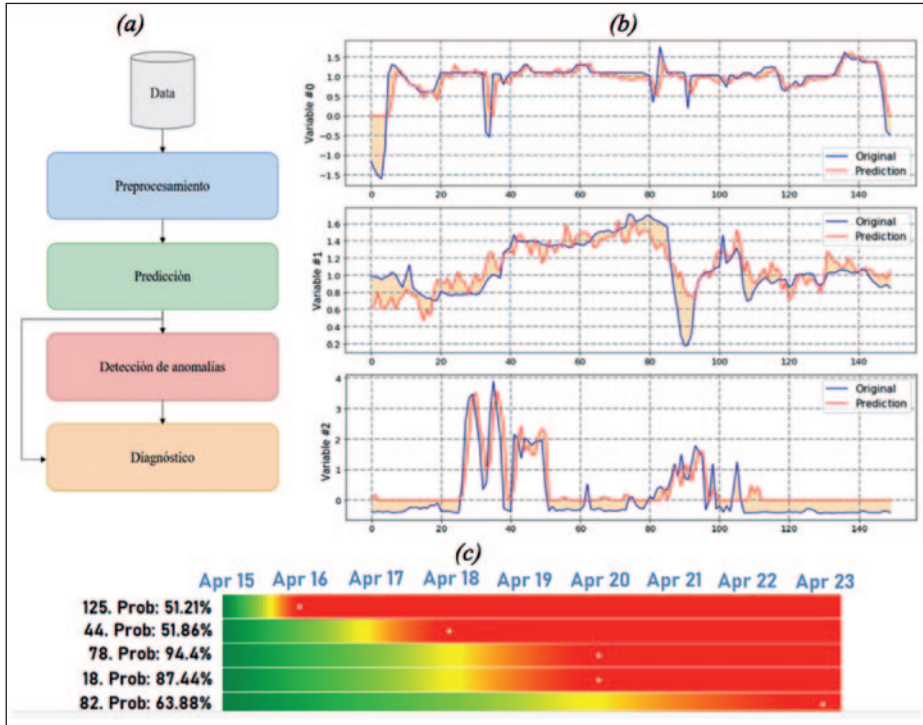


Fig. 5 (a). Esquema a alto nivel de procesamiento de datos para diagnóstico de anomalías en SOPRENE a ser (re-)evaluado en MAPRE; (b). Ejemplo de comparación en SOPRENE de predicciones de variables vs originales, y (c). Evaluación de modos de fallo futuros susceptibles de aparecer en un sistema o equipo con su probabilidad de ocurrencia

propuesta del contratista mostrada en su oferta, los resultados de la auditoría/consultoría externa y la opinión de la dirección técnica.

Los cambios a realizar sobre SOPRENE para convertirse en el nuevo PET no solo afectarán a las herramientas y al HW, sino también a los modelos y forma de predecir las anomalías de los activos embarcados que se consideren. Actualmente, estos se ejecutan sobre los *notebooks* programados en lenguaje Python (fig. 5). El proceso, tras el preprocesado de datos, se divide en tres fases (fig. 5 (a)): predicción a futuro de las variables (fig. 5(b)), detección de anomalías según entrenamiento de normalidad y, en tercer lugar, clasificación de posibles modos de fallo en el activo y valoración de aparición de anomalías junto a probabilidad (cruce con FMECA, fig. 5 (c)). Además de cambios en el pre-procesado, se prevé que MAPRE realice estimaciones de anomalías en cada fecha de «presente», sin hacer en primer lugar la predicción futura de variables. Esta detección de anomalías se calculará según la normalidad entrenada del activo y

se hará la predicción en segundo término para determinar el RUL, determinando posibles anomalías según horizontes temporales diferentes. La desviación entre la estimación de predicción real y la que efectivamente se vaya alcanzando en el tiempo determinará la necesidad de reentrenar los modelos en producción.

Tándem embarcado MEVIMAN-MAPRE

Tras la renovación del PET y el establecimiento de los protocolos de funcionamiento PET-PAB (fig. 4), se pasará a diseñar y desarrollar el PAB sobre la base de lo diseñado en el PET. Este PAB será el encargado de ejecutar en tiempo real los modelos predictivos entrenados en tierra. Esta ejecución a bordo es más liviana en necesidad de computación que los entrenamientos en tierra, y por lo tanto no requerirá de grandes capacidades para ello. El PAB se ejecutará sobre el mismo *hardware* que MEVIMAN (ATAVIA embarcado), sus resultados serán accesibles desde MEVIMAN y sincronizados junto los datos de este último hacia tierra (fig. 6).

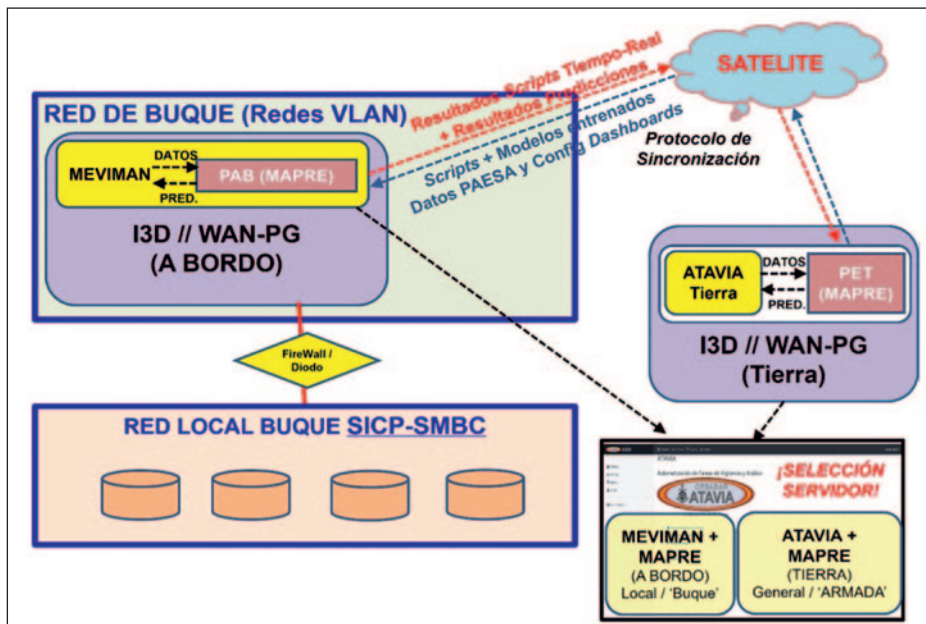


Fig. 6. Tándem físico MEVIMAN y MAPRE a bordo y en tierra. En la configuración a bordo, MEVIMAN y MAPRE comparten HW, siendo cada uno de sus servicios virtualizados. En tierra, las capacidades de computación del PET son mayores, debido a las necesidades de computar los entrenamientos de modelos en IA

Al igual que para MEVIMAN, la sincronización de modelos entrenados (de tierra hacia buque) y la sincronización de datos y resultados de predicciones (de buque hacia tierra) se harán por satélite en función de periodicidades establecidas (o por oportunidad de conexión satelital), forzadas puntualmente de forma manual por un operador ATAVIA o por reglas establecidas según criticidad de lo determinado por MEVIMAN o por MAPRE.

Implantación en unidades actuales y futuras

Al estar el PAB virtualizado sobre el mismo HW sobre el que se instale MEVIMAN, la instalación del PAB de MAPRE sobre una unidad, y disponer de predicciones va a depender de dos cosas: que se instale MEVIMAN sobre ese buque y que se entrenen modelos de predicción sobre los activos que se determinen (y sobre los que se tengan o realicen FMECAS de comportamiento).

En MAPRE se ha acordado la instalación del HW correspondiente a MEVIMAN + MAPRE sobre cinco buques (entre *F-100* y *BAM 1.ª serie*) antes de diciembre de 2023, además de existir dos más que a principios de 2022 tenían instalado o acordado para instalación de MEVIMAN (*P-45 Audaz* y *P-46 Furor*). Igualmente se pretende dentro del Acuerdo Marco ATAVIA con NAVANTIA

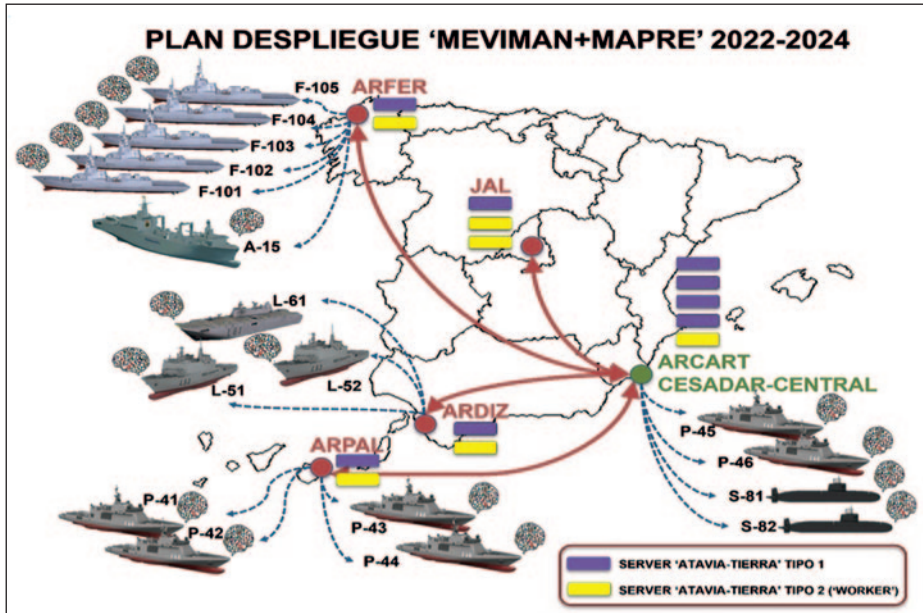


Fig. 7. Despliegue previsto de MEVIMAN + MAPRE en 15 unidades de la Flota en el período 2022-2024

instalar MEVIMAN durante 2022 en los L-51 *Galicia*, L-52 *Castilla*, L-61 *Juan Carlos I* y A-15 *Cantabria* (fig. 7).

Igualmente se procurará poder instalar en 2023 y 2024 el tándem MEVIMAN + MAPRE en los S-81, S-82 y los buques restantes F-100 que no hayan podido ser objeto de instalación en la primera tanda. Sobre todos ellos se instalará tanto el SW de MEVIMAN (en primera instancia) como el PAB de MAPRE (cuando esté desarrollado en diciembre de 2023). Hay que tener en cuenta que si bien los modelos con los que finalizará el demostrador tecnológico son principalmente de F-100 y BAM (1.ª y 2.ª series), habrá que ir entrenando y realizando modelos sobre los equipos de mayor criticidad y esencialidad en el resto de buques (L-51, L-52, L-61, A-15, S-80...), así como ampliar el número de equipos con modelos de predicciones entrenados en los primeros (equipos auxiliares, etcétera).

De igual modo, después de 2024, a las primeras F-110 se les instalará MEVIMAN + MAPRE, apoyarán las demás funcionalidades de su gemelo digital y se comenzará desde que sea posible a entrenar modelos de normalidad de sus activos con todo lo aprendido durante los programas previos. De hecho, en las nuevas fragatas F-110 se contará con FMECAS detallados para más de 72 equipos, lo cual es una extraordinaria ventaja que nos permitirán realizar modelos predictivos de mayor calidad.

Versatilidad de la IA aplicada

Al comenzar el programa SOPRENE se plantearon las distintas posibilidades de realización de modelos predictivos basados en IA según la calidad de los datos logísticos en poder de la Armada. Se llegó a la conclusión de que, con los datos logísticos registrados y con el objeto de hacerlos escalables a distintos modelos de motores para poder predecir anomalías nunca registradas o marcadas previamente, se harían modelos no supervisados lo más generalistas posible sobre las variables registradas en cada una de ellos. Solo se podrían predecir modos de fallo que estuvieran ligados de alguna manera a las variables registradas. Es decir, no se podría predecir modo de fallo que no estuviera ligado a alguna variable (o conjunto de variables) concreta.

Los modelos se basan en el aprendizaje profundo no supervisado (sin etiquetas de fallos previos), entrenados según la normalidad de comportamiento del motor. Cuando un conjunto de variables se comporta de forma «anormal» respecto a la normalidad entrenada, entonces se marcan algunas de ellas como «anomalía». Posteriormente, se clasifican los modos de fallo compatibles con esas variables y la probabilidad de acierto. Toda anomalía detectada desde la puesta en producción debería a medio plazo ser etiquetada por un humano para poder en el futuro entrenar modelos supervisados (con etiquetas de fallos previos clasificados).

La versatilidad y escalabilidad de estos modelos es muy grande, porque la metodología aplicada es transferible a multitud de activos embarcados. Es sencillo aplicar la metodología sobre nuevos modelos, y de hecho hay alumnos de reciente ingreso en CESADAR (con buena base matemática y sin nociones previas de programación) que en menos de tres semanas son capaces de seguir la metodología y comenzar a entrenar modelos de normalidad de activos, que serán mejorados en MAPRE como se ha comentado anteriormente, comenzando por el pre-procesamiento de los datos de entrada, que será modificado para tomar solo períodos de funcionamiento de los motores.

Sensor inteligente-Armada: hacia un IoT desplegado

En paralelo al PET-PAB, el programa MAPRE comprende también el diseño y desarrollo de una primera versión del SI de MAPRE, que permitirá comenzar a implantar y desplegar un IoT completo en nuestra institución, con módulos de SI-Armada de bajo coste, por debajo de 100 euros por módulo. El concepto de estos SI-Armada ha comenzado desde una primera vertiente de monitorización de activos y aspectos logísticos derivados de este primer caso de uso. Se ha ido escalando su concepto hasta plantear otros usos posibles que puedan ser aprovechados por distintos departamentos dentro de la Armada para obtener datos de comportamiento de todos los ámbitos, a bajo coste y con bajo consumo energético.

Los SI-Armada serán diseñados por la UTE según requerimientos de la dirección técnica de MAPRE para cumplir con lo dispuesto en el PPT y los casos de uso planteados. La propiedad industrial de los mismos pertenecerá al MINISDEF. La documentación permitirá al MINISDEF y a la Armada fabricarlos bajo licencia propia. Se entregarán un total de 40 unidades de los mismos a la finalización de proyecto (incluyendo sus prototipos). Estas unidades requerirán de computación suficiente como para registrar datos de los sensores que se instalen para el caso del uso determinado que se requiera y para ejecutar modelos inteligentes sencillos (entrenados en el PET si fuera necesario) sobre las variables registradas. El módulo principal se compone de una RPi CM4 (fig. 8), con posibilidad de añadir una controladora secundaria en caso de que los sensores a instalar en el módulo de entradas lo requieran. El módulo de entradas permitirá acoplar cuatro sensores de registro dinámico y cuatro de registro estático (que requieren de menor energía para funcionar). Se podrá conectar a corriente mediante adaptador ya acoplado al SI. Igualmente, cuando se utilice en entornos alejados de alimentación eléctrica fija y si los sensores a registrar lo permiten (bajo consumo energético), se podrá incorporar una batería LiPO 4S (14.8V) de capacidad mayor a 2Ah al módulo. Esto permitirá dotarlo de autonomía en caso de uso en lugares alejados de alimentación eléctrica.

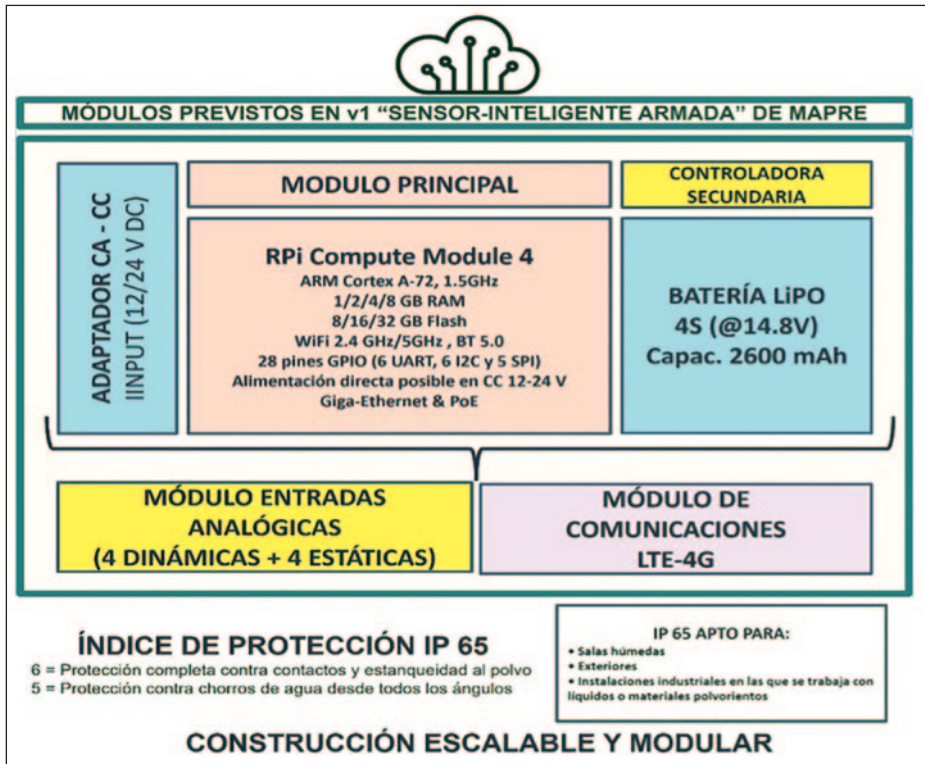


Fig. 8. Esquema de los módulos previstos en la versión 1 del SI MAPRE

La comunicación de los datos, desde el punto de instalación del sensor hasta tierra (concentrando en las Bases de datos de ATAVIA los datos registrados), se realizará a través del módulo de comunicaciones del SI-Armada, permitiendo en su versión primera la conexión de proximidad a nodos inalámbricos por *blue-tooth*, *wifi* y de largo alcance a través de LTE/4G. El índice de protección (IP) del sensor está previsto que sea 65 y que posibilite la instalación en exteriores, lugares que haya polvo en el ambiente y en salas húmedas (SI no sumergibles en líquidos). Esta carcasa de IP 65 permitirá la adición modular de los distintos componentes del SI-Armada y la escalabilidad de las capacidades de la misma.

Casos de uso iniciales de sensor SI-Armada v1

En la primera versión se han establecido seis casos de uso distintos (fig. 9). Cada uno de ellos utiliza diferentes sensores en las entradas del módulo SI-Armada

dependiendo de su utilización. Los datos se registrarán en ATAVIA, estructurándose según código UNOR (unidad orgánica) de dependencia respecto al punto de instalación del sensor (barco, arsenal, etc.), y la configuración logística unívoca donde esté instalado concretamente (HSC de activo, compartimento o pañol, matrícula de vehículo, etc.). Cada dato registrado (para los de periodicidad de registro más espaciada o estáticos), se hará en función de su fecha/hora. Los dinámicos (como vibraciones o vídeo), se almacenarán por lotes (tras activación por un período y frecuencia de *sampling* determinado, activados en función de eventos predeterminados por el usuario).

El primero de los casos de uso era el más obvio, teniendo en cuenta los objetivos de CESADAR: el monitoreo de activos embarcados para medir aspectos no contemplados en diseño o concepción del sistema que puedan ser interesantes en un momento dado según condicionantes de uso de un activo (para facilitar su uso a los operadores en un futuro según casuísticas de la unidad). Sobre él se podrán medir velocidades de rotación, presiones, temperaturas, vibraciones (con acelerómetros) y cualquier otro aspecto que pueda ser registrado con sensores a acoplar alimentados por los módulos del SI-Armada. Este módulo podrá cargar modelos inteligentes sencillos que den un *output* concreto (recomendaciones de parada, de funcionamiento correcto o de actuación concreta) al usuario a partir de las variables que se registren. Los datos registrados se trasladarán a ATAVIA. A bordo se utilizará el hilo radiante para comunicación de los datos hacia el servidor MEVIMAN del buque en cuestión para no tener que incorporar *gateways wifi* de la red I3D en cada compartimento en el que se quieran instalar estos sensores, evitando tediosas instalaciones a bordo y una infraestructura compleja.

El segundo de los casos de uso es el monitoreo de un pañol a bordo de un buque (como un pañol de municiones o algún otro que requiera de especial vigilancia o control). Sobre él se pueden colocar sensores de temperatura,



Fig. 9. Casos de uso previstos en la versión 1 del SI MAPRE

luminosidad, detección de movimientos y, en tal caso, vídeo o audio. Vendrán los datos referenciados a su UNOR y su compartimento a bordo, y podrán ejecutarse sobre él modelos inteligentes sobre el módulo (activar grabación de vídeo ante la entrada de una persona en un pañol, grabar conversaciones de un pañol en función de la pronunciación de palabras clave...).

El tercer caso de uso es derivado del anterior, pero en tierra: control y monitoreo de polvorines en tierra, a menudo alejados de oficinas con personal permanente, que den tranquilidad sobre el control de los mismos y aseguren un monitoreo constante de las condiciones de los mismos. Se podrán medir sobre ellos temperaturas, detección de los gases que se establezcan y vídeo o audio. Al poder estar alejados de nodos de comunicación o alimentación eléctrica, en este caso deberán asegurar alta autonomía (serán necesarios *sampling* de registro de datos más espaciados para consumir menos energía) y comunicaciones a través de 4G/5G con SIM.

El cuarto caso de uso es el de infraestructura en general, con el objetivo de obtener una infraestructura inteligente adaptando la ya existente. Este caso de uso parte de los propósitos del anterior y servirá para monitorizar consumos energéticos de nuestros locales, facilitar labores de seguridad de los mismos (entrada/salida de personas a locales) y otros usos que puedan ser de interés (detección de comportamientos anómalos de infraestructura, control de humedades, detección de fugas...).

La optimización energética de locales e infraestructura en general podrá beneficiarse de ejecutar modelos de optimización energética sobre el SI-Armada y dar la información necesaria al usuario para caminar hacia una climatización inteligente de los mismos (o activando mecanismos sobre los controladores de los aparatos de climatización en los casos posibles), lo que va en consonancia con los *Objetivos Europeos de Sostenibilidad 2030*, otorgando inteligencia y digitalización a nuestra infraestructura.

El quinto caso de uso es el primero de los «móviles», que requiere de mayor autonomía del módulo SI-Armada, tanto en energía como en comunicaciones. Este busca el monitoreo de vehículos ligeros (Infantería de Marina, parques de autos...). Su objetivo es controlar consumos, trayectos, velocidades, vibraciones singulares de chasis durante operación (choques, zonas con firme en mal estado, desequilibrios de vehículo...). Sirve para auditar desde operaciones corrientes hasta ejercicios o maniobras.

El sexto caso de uso es el más autónomo de todos los anteriores sobre humanos (soldados o marineros), ya que no tiene otra modalidad posible de alimentación eléctrica que a través de la batería, lo que requiere de recarga tras su uso. La comunicación puede ser a través de un *gateway* común a varios SI-Armada al final de una operación o ejercicio. Las variables a registrar son GPS, temperatura, humedad (sudoración), frecuencia cardíaca, inclinómetro, vídeo o audio. Su propósito principal es la auditoría y *debriefing* de operaciones o ejercicios.

Al instalar un SI-Armada en una situación concreta, el operador debe definir sobre el *front-end* que se establezca en la aplicación *web* ATAVIA (o MEVIMAN si está embarcado, todo se sincroniza posteriormente) la posición de instalación del sensor (UNOR y código logístico unívoco de instalación), fecha de instalación, configurar envío de datos y definir sensores concretos instalados por cada canal, la frecuencia de registro en el sensor de cada uno de los canales (y las reglas de activación en el caso de que haya un *buffer* de datos de alguno de los canales) y modelos a ejecutar en tiempo real (si los hubiere). Todos los datos recolectados por los SI-Armada estarán disponibles y accesibles (según permisos de UNOR) a los usuarios de la I3D en la aplicación *web* ATAVIA. Podrán aplicarse *scripts* sobre ellos, graficar sus datos o descargarlos para tratarlos en terceras aplicaciones que sean más cómodas para el usuario (como *Excel* u otras).

Conclusiones

Tras haber desarrollado una solución de integración de soluciones y de estructuración de datos de diversas fuentes con capacidad de *scripting* sobre ellos, como ATAVIA, el siguiente paso fue desarrollar un demostrador tecnológico sobre la capacidad de gestión de grandes volúmenes de datos y aplicación de modelos de IA sobre él (SOPRENE). Con el objetivo del embarque de ATAVIA para la ejecución de modelos y *scripts* en tiempo real (MEVIMAN), se decidió evolucionar el demostrador tecnológico para ejecutar modelos predictivos en tiempo real conforme se generaban los datos a bordo; esto fue MAPRE. Las capacidades predictivas se dividirán en dos, en tierra (entrenamiento de modelos, mayor capacidad de computación) y a bordo (ejecución de los modelos ya entrenados, en tiempo real, sobre el nodo). El *computing on the edge* inteligente (computación en el nodo) será una capacidad adquirida por el MINISDEF que podrá aplicar a otros procesos —aparte del mantenimiento predictivo— que sean de interés. A bordo de los buques, MEVIMAN funcionará sobre el mismo *hardware* que MAPRE. Se pretende que estos sistemas (MEVIMAN y el demostrador MAPRE) se instalen sobre más de 15 buques de la Flota antes de finales de 2024. El objetivo será ir escalando el número de equipos monitorizados con modelos predictivos en MAPRE conforme se avance en su instalación, debido a una desarrollada procedimentación de escalabilidad de los mismos.

Además de embarcar el demostrador MAPRE e ir escalando sucesivamente el número de equipos con modelos predictivos, la otra gran novedad del programa MAPRE es el desarrollo de una primera versión del módulo de SI-Armada, con capacidad para cuatro sensores «estáticos» y cuatro «dinámicos». Se pretende integrar datos registrados en estos sensores (con capacidad para ejecutar modelos inteligentes básicos, ya entrenados en tierra, sobre ellos). Sus datos estarán correctamente referenciados y estructurados en ATAVIA. El módulo SI-Armada

contará con cierta autonomía de alimentación energética (con capacidad de alimentación por Ethernet y por batería) y de comunicación BT, *wifi* y LTE/4G). Su IP será el adecuado para estar expuesto en ambientes húmedos y con polvo. Sus datos servirán para optimizar el rendimiento de nuestros activos e infraestructura (por ejemplo, consumos energéticos) y convertirlos paulatinamente en digitales e inteligentes.

El objetivo principal de MAPRE es aumentar la madurez tecnológica del demostrador hasta un TRL 8-9 a partir de lo ya avanzado en el demostrador tecnológico SOPRENE.

Perspectivas: hacia la utilización de modelos híbridos

Una vez finalice MAPRE, el siguiente paso lógico será aunar las capacidades de ATAVIA y de predicción con IA del PET-PAB de MAPRE. Es decir, reunir las reglas expertas junto a los modelos basados en IA (*machine learning/deep learning*). Esta herramienta es conocida como «modelos híbridos» y servirá para disminuir los falsos positivos y las incertidumbres de predicción, aumentar la confianza en el sistema, avanzar en el estado del arte del sistema e incrementar la explicabilidad de los resultados de los modelos. En este aspecto CESADAR se encuentra ya trabajando en el desarrollo conceptual de MASTIA (Módulo de Automatización del Sostenimiento Inteligente de la Armada), que utilizará la base de MAPRE para usar modelos híbridos en aras de automatizar la preparación y alistamiento logístico de un buque previo a una misión o despliegue.

Agradecimientos

El autor quiere expresar su profundo agradecimiento a todas las personas que han hecho posible que estos programas de innovación industrial (SOPRENE y MAPRE) se comenzaran a desarrollar desde 2018. En especial al capitán de navío Juan José Díaz del Río Durán, jefe de la sección de Apoyo al Análisis de Sostenimiento en DISOS, al personal de DGAM-PLATIN y a los sucesivos jefes de CESADAR durante estos años, capitán de fragata Fernando María Escondrillas Gómez y capitán de fragata Alejandro Cervantes Roca. Igualmente, el autor agradece al capitán de navío Antonio Villalba Madrid su apoyo desde CESTIC en la validación de las arquitecturas innovadoras que se van proponiendo en estos programas.

BIBLIOGRAFÍA

- DÍAZ DEL RÍO DURÁN, J. J. (2021): «Mantenimiento inteligente en la Armada: en vanguardia y trazando el futuro». REVISTA GENERAL DE MARINA. Noviembre 2021. ISSN: 0034-9569.
- (2020): «Futuro Gemelo Digital (GD) de la *F-110*». REVISTA GENERAL DE MARINA. Junio 2020. ISSN: 0034-9569.
- FERNÁNDEZ-BARRERO, D.; FONTENLA-ROMERO, O.; LAMAS-LÓPEZ, F.; NOVOA PARADELA, D.; R-MORENO, M. D.; SANZ, D. (2021): «SOPRENE: Assessment of the Spanish Armada's Predictive Maintenance Tool for Naval Assets». *Applied Sciences*, 2021; 11(16):7.322.
- GONZÁLEZ-ALLER LACALLE, J. D.; LAMAS LÓPEZ, F. (2018): «Evolución de CESADAR: Prediciendo el futuro, eficiencia en el sostenimiento, eficacia de la flota». REVISTA GENERAL DE MARINA. Agosto-Septiembre 2018. ISSN: 0034-9569.
- LAMAS-LÓPEZ, F.; NOVOA PARADELA, D.; FONTENLA-ROMERO, O.; SANZ MUÑOZ, D.; EIRAS FRANCOS, C. (2022): «Predictive Maintenance of Naval Assets Using Machine Learning Techniques», Proceedings of the STO-MP-SAS-OCS-ORA-2021 NATO Conference. AIML-03 Section.
- LAMAS-LÓPEZ, F. (2021): «Embarque de sistemas de automatización de vigilancia de activos. Proyecto MEVIMAN». REVISTA GENERAL DE MARINA. Diciembre 2021. ISSN: 0034-9569.
- LAMAS-LÓPEZ, F. (2018): «Clasificación de modos de funcionamiento de motores navales utilizando herramientas ligadas al aprendizaje automático». Congreso de la Asociación Española de Inteligencia Artificial, CAEPIA 2018. 23-26 de octubre 2018. Granada (España). ISBN: 978-3-030-00374-6-LNAI.
- LAMAS LÓPEZ, F.; GONZÁLEZ-ALLER LACALLE, J. D. (2017): «La aplicación de inteligencia artificial (IA) en la industria 4.0: Mantenimiento predictivo basado en la condición (CBM) de equipos embarcados». V Congreso Nacional de I + D en Defensa y Seguridad, 23-25 de noviembre de 2017, Academia de Infantería, Toledo (España). ISBN: 978-84-9091-357-4. NIPO: 083-18-094-7.
- LAMAS LÓPEZ, F.; RIOLA RODRÍGUEZ, J. M.; GONZÁLEZ-ALLER LACALLE, J. D. (2017): «La aplicación de inteligencia artificial (IA) en la industria 4.0: Mantenimiento predictivo basado en la condición (CBM) de equipos embarcados». LVI Congreso Nacional de Ingeniería Naval y Marítima. 19-20 de octubre de 2017, Madrid. ISSN: 0020-1073.