



MÁSTER EN LOGÍSTICA Y GESTIÓN ECONÓMICA DE LA DEFENSA

Título del TFM: La implementación del mantenimiento predictivo en la Armada

Trabajo fin de Máster. Curso académico 2022 - 2023

APELLIDOS Y NOMBRE: Alberto Font Franco

CONVOCATORIA: junio

La implementación del mantenimiento predictivo en la Armada.

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| ÍNDICE | ii |
| ACRÓNIMOS | iv |
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES | vi |
| RESUMEN | 1 |
| ABSTRACT | 2 |
| 1 INTRODUCCIÓN | 3 |
| 2 MARCO TEÓRICO | 6 |
| 2.1 El mantenimiento predictivo y relación con el gemelo digital..... | 7 |
| 2.2 Costes del mantenimiento y desafíos y oportunidades del gemelo digital..... | 14 |
| 2.3 Bases sobre el RCM y FMEA | 18 |
| 2.4 Alcance de la implementación del mantenimiento predictivo | 26 |
| 2.5 Gestión por procesos | 37 |
| 3 METODOLOGÍA | 40 |
| 3.1 Metodología DAFO..... | 41 |
| 3.1 Metodología de la Cadena de Valor | 45 |
| 4 ANÁLISIS | 47 |
| 4.1 Análisis DAFO del mantenimiento predictivo | 47 |
| 4.2 Análisis de Porter de los procesos de trabajo | 51 |
| 4.2.1 <i>Fase Conceptual</i> | 57 |
| 4.2.2 <i>Fase de Definición y Decisión</i> | 58 |
| 4.2.3 <i>Fase de Ejecución</i> | 60 |
| 4.2.4 <i>Fase de Preparación</i> | 61 |
| 4.2.5 <i>Fase de Servicio</i> | 62 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5 | PROPUESTA | 64 |
| 6 | CONCLUSIONES | 66 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 70 |
| | ANEXO I: Entrevista al CF Jefe del CESADAR..... | 77 |
| | ANEXO II: FMECA motor generador F-100 | 79 |

ACRÓNIMOS

| | |
|----------|---|
| ARGO: | Plataforma de Armonización para la Gestión de la Organización. |
| AJAL: | Almirante Jefe de Apoyo Logístico. |
| AJEMA: | Almirante Jefe del Estado Mayor de la Armada. |
| ATAVIA: | Automatización de Tareas de Vigilancia y Análisis. |
| BD: | Big Data. |
| BTI: | Base Tecnológica Industrial. |
| CESADAR: | Centro de Supervisión y Análisis de Datos de la Armada. |
| CAME: | Corregir, Afrontar, Mantener, Explotar (también conocido como MECA) |
| CESTIC: | Centro de Sistemas y Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. |
| CBM: | Condition Based Maintenance. |
| CCN: | Centro Criptológico Nacional. |
| CCN-STIC | Guía de seguridad de las TIC del CCN. |
| COB: | CESADAR On Board. |
| DAFO: | Debilidades, Amenazas, Fortalezas, Oportunidades. |
| DGAM: | Dirección General de Armamento y Material. |
| DNO: | Documento de Necesidad Operativa. |
| DNS: | Documento de Necesidad de Sostenimiento. |
| DDV: | Documento de Viabilidad. |
| EGN: | Escuela de Guerra Naval. |
| EMA: | Estado Mayor de la Armada. |
| ENM: | Escuela Naval Militar. |
| FCE: | Factores Críticos de Éxito. |
| FMEA: | Failure Modes, Effects Analysis. |
| FMECA: | Failure Modes, Effects and Criticality Analysis. |
| HI3E: | H (Hibridación del mundo físico y virtual), I (Inteligente), 3E (Eficacia operativa, Eficiencia económica y Eficiencia medioambiental). |
| IA: | Inteligencia Artificial. |
| ICMP: | Plan de Mantenimiento Integrado de la Clase. |
| INTA: | Instituto Nacional Técnicas Aeroespaciales. |
| IoT: | Internet of Things. |
| I3D: | Infraestructura Integral de Información para la Defensa. |
| JAL: | Jefatura de Apoyo Logístico. |

| | |
|-----------|---|
| JEMAD: | Jefe de Estado Mayor de la Defensa. |
| MAPRE: | Mantenimiento Predictivo (SOPRENE embarcado). |
| MASTIA: | Automatización del Sosténimiento Inteligente de la Armada. |
| MEVIMAN: | Módulo Embarcado de Vigilancia y Mantenimiento (ATAVIA desplegado). |
| MINCOTUR: | Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. |
| MINISDEF: | Ministerio de Defensa. |
| ML: | Machine Learning. |
| MP: | Mantenimiento Predictivo. |
| OCM: | Objetivo de Capacidades Militares. |
| OEM: | Objetivos de Estado Mayor. |
| ORM: | Obtención de Recurso de Material. |
| PAB: | Predictor A Bordo. |
| PAESA: | Programa del INTA en servicio a la industria, Armada y Organismos Oficiales para de sistemas mecánicos lubricados: análisis de fluidos de los buques (aceites, combustibles, aguas, fluidos hidráulicos). |
| PET: | Predictor En Tierra. |
| PF: | Proceso Fundamental. |
| PMS: | Sistema de Mantenimiento Programado / Planificado (Planned Maintenance System). |
| PPT: | Pliego de Prescripciones Técnicas. |
| PT: | PT: Proceso de Trabajo. |
| RCM: | Reliability Centered Maintenance. |
| RPN: | Risk Priority Number. |
| SICOR: | Sistema de Control de Organización. |
| SICP: | Sistema Integrado de Control de Plataforma. |
| SMBC: | Sistema de Mantenimiento Basado en la Condición (equivalente a CBM). |
| SOPRENE: | Sub-Sistema de Sosténimiento Predictivo basado en Inteligencia Artificial. |
| SWOT: | Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats. |
| TRL: | Technology Readiness Level. |
| WAN-PG: | Red de Propósito General del Ministerio de Defensa. |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

| | |
|--|-----------|
| Ilustración 1: Revoluciones industriales | 8 |
| Ilustración 2: Diagrama de contexto del gemelo digital | 13 |
| Ilustración 3: Relación RCM/CBM/CBM+ | 20 |
| Ilustración 4: División de la monitorización del mantenimiento | 21 |
| Ilustración 5: Diagramas RCM | 22 |
| Ilustración 6: Intervalo P-F | 23 |
| Ilustración 7: Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE)..... | 25 |
| <i>Ilustración 8: Matriz de criticidad de FMECA</i> | <i>26</i> |
| Ilustración 9: Evolución del mantenimiento en la Armada..... | 29 |
| Ilustración 10: Módulos del SIL | 32 |
| Ilustración 11: Tándem físico MEVIMAN y MAPRE a bordo y en tierra..... | 34 |
| Ilustración 12: Planeamiento de la Armada. Procesos de trabajo | 38 |
| Ilustración 13: Técnicas de obtención de información para selección de alternativas, estrategias y líneas de acción. | 41 |
| Ilustración 14: Análisis DAFO..... | 42 |
| Ilustración 15: Análisis CAME | 43 |
| Ilustración 16: Cuadrantes de estrategias CAME | 44 |
| Ilustración 17: La cadena genérica de valor..... | 46 |
| Ilustración 18: Análisis DAFO/CAME implementación MP: | 49 |
| Ilustración 19: Fase en la que se divide el proceso de obtención y uso de los sistemas | 53 |
| Ilustración 20: Cadena de valor de la obtención de material | 55 |
| Ilustración 21: Cadena de valor de Porter (cliente)..... | 56 |

RESUMEN

Desde hace más de una década, el Centro de Supervisión y Análisis de Datos de la Armada (CESADAR.) inició la implementación del Mantenimiento Predictivo (MP) centrándose en los sistemas vitales de sus buques: los sistemas de propulsión principal, generadores eléctricos y motores auxiliares. El MP es una técnica más dentro de la metodología basada en la fiabilidad “Reliability Centred Maintenance” (RCM) y su empleo se justifica por el ahorro de costes de mantenimiento, para alargar la vida útil, por el aumento de la seguridad reduciendo o evitando riesgos o accidentes y por el aumento de la disponibilidad de los sistemas y equipos. Una técnica de la metodología RCM que aplica la Armada precisa de una base de datos de fallos que se materializa mediante un “Failure Mode and Effect Criticality Analysis” (FMECA), análisis de modos de fallo, criticidades y efectos, que sumado a técnicas de Inteligencia Artificial (IA) dan como resultado a un sistema híbrido de MP.

El insuficiente recurso financiero y las limitaciones tecnológicas no permitieron, hasta hace un lustro, el despegue del sistema de MP incorporando técnicas de IA. El elemento catalizador de esta transformación digital fue la adquisición de las nuevas fragatas F-110 y su proyecto de Gemelo Digital (GD) donde se integrará el MP con técnicas de IA, escenario único en plataformas navales donde no hay un marco teórico bien definido; dicho elemento catalizador, junto a la declaración del MP y la automatización de procesos como objetivos estratégicos de la Armada, ha impulsado el desarrollo del MP con técnicas de IA y la GpP mediante la formalización de contratos con la industria nacional y la potenciación de la colaboración con diversas universidades. Para mejorar la eficiencia logística es prioritario como objetivo principal, determinar la estrategia que hay que seguir en la implementación del MP y como objetivo específico, identificar aquellas actividades o Procesos de Trabajo (PT) desde la fase de la adquisición del material hasta la fase de servicio con la gestión del mantenimiento durante su ciclo de vida para aumentar la competitividad de la organización mediante la mejora continua de la cadena de valor que aporta el ciclo de la Gestión por Procesos (GpP).

En el presente trabajo se realizará el trabajo de campo con la recogida de datos principales, se asociará la documentación obtenida mediante metodologías de análisis estratégico la implementación del MP con metodología FMECA e IA y las actividades o PT que estarían relacionadas.

Palabras clave: Transformación digital, Mantenimiento predictivo, Gemelo digital, Gestión por procesos, Cadena de valor.

ABSTRACT

For more than a decade, the Spanish Navy Data Analysis and Supervision Center (CESADAR.) began the implementation of Predictive Maintenance (PM) focusing on the vital systems of its ships: the main propulsion systems, electrical generators and auxiliary engines. The MP is one more technique within the methodology based on the reliability "Reliability Centered Maintenance" (RCM) and its use is justified by the savings in maintenance costs, to extend the useful life, increasing safety by reducing or avoiding risks or accidents and by increasing the availability of systems and equipment. A technique of the RCM methodology applied by the Spanish Navy requires a database of failures that is materialized through a "Failure Mode and Effect Criticality Analysis" (FMECA), analysis of failure modes, criticalities and effects, which added to techniques of Artificial Intelligence (AI) result in a hybrid PM system.

Insufficient financial resources and technological limitations did not allow, until five years ago, the takeoff of the PM system incorporating AI techniques. The catalytic element of this digital transformation was the acquisition of the new F-110 frigates and its Digital Twin (GD) project where the MP will be integrated with AI techniques, a unique scenario in naval platforms where there is no well-defined theoretical framework; Said catalyst element, together with the declaration of the MP and the automation of processes as strategic objectives of the Spanish Navy, has promoted the development of the MP with AI techniques and the GpP through the formalization of contracts with the national industry and the empowerment of the collaboration. with several universities. In order to improve logistics efficiency, the main objective is to determine the strategy to be followed in the implementation of the MP and as a specific objective, to identify those activities or Work Processes (PT) from the phase of the acquisition of the material to the phase of service with maintenance management during its life cycle to increase the competitiveness of the organization through the continuous improvement of the value chain provided by the Process Management (GpP) cycle.

In the present work, the field work will be carried out with the collection of main data, the documentation obtained through strategic analysis methodologies will be associated with the implementation of the MP with the FMECA and IA methodology and the activities or PT that would be related.

Keywords: Digital transformation, Predictive maintenance, Digital twin, Process management, Value chain.

1 INTRODUCCIÓN

La Armada ha avanzado significativamente en la transformación digital en los últimos años, implementando nuevas tecnologías para mejorar sus capacidades operativas y su eficiencia en la gestión de recursos.

El impulso de las tecnologías de la información y las comunicaciones, el desarrollo de las capacidades de almacenamiento y proceso de datos y la conectividad global, ha motivado la aparición de nuevas herramientas de control y gestión que abren un camino en la Armada para mejorar notablemente su eficiencia logística, el modo de empleo de sus buques, la organización, el sostenimiento y la gestión de los recursos puestos a su disposición. A consecuencia de este salto tecnológico, causado por la cuarta revolución tecnológica y por directrices emitidas por el Ministerio de Defensa, se inicia formalmente en el año 2018 el proceso de transformación digital de la Armada. Un año antes, en 2017, ya se dio un primer paso en esta apuesta decidida por la transformación digital, con la aprobación, en julio de 2017, del “Concepto de Apoyo Logístico”, donde se adoptan los principios y criterios conceptuales surgidos del concepto “Industria 4.0” adaptados a las particularidades de la Armada. La finalidad del concepto de Apoyo Logístico es mantener la mayor operatividad de los buques, plataformas y sistemas con un menor coste aprovechando el nuevo programa de obtención de las fragatas tipo F-110, donde se contempla la digitalización de la gestión de las actividades logísticas que se deberían realizar para que siempre se ejecuten de la misma forma, es decir, desarrollando las mismas actividades y en la misma secuencia, la optimización de los periodos de mantenimiento de los sistemas y equipos mediante la predicción de averías

(para actuar antes de que éstas se produzcan), la virtualización de plataformas o sistemas, el empleo de la conectividad de “Internet de las Cosas” (IoT), la gestión masiva de datos, etc.

Partiendo entonces de un concepto de apoyo logístico para la Armada en línea con la cuarta revolución tecnológica y un plan de transformación digital, se formalizó el proceso de obtención de las futuras fragatas F-110 y el programa de desarrollo de su Gemelo Digital con la empresa NAVANTIA. Estos dos programas actuarán como elementos catalizadores para impulsar las inversiones en los programas de MP, hasta entonces, y desde el año 2010, con bajo nivel de madurez y grado de implementación en los buques de la Armada, ya que, a finales del año 2019, se vio que el Gemelo Digital tenía un potencial mayor y que su concepción y requisitos podrían abarcar diferentes ámbitos, incluido el ámbito que nos ocupa, la predicción de averías.

Asimismo, no puede haber revolución tecnológica y transformación digital eficaz en la implementación del MP en la Armada sin antes determinar los factores y procesos que intervienen en dicha transformación.

Los factores nos permitirían identificar las líneas de acción o estrategias que se deben poner en marcha y los procesos nos ayudarán a lograr la mejora constante a partir de datos objetivos proporcionados por los indicadores de rendimiento de la Armada. El análisis de los factores consiste en la evaluación de los puntos fuertes y débiles internos de la organización con las amenazas y oportunidades externas y determinar la estrategia que encaje entre sus capacidades internas y su posición competitiva externa. La GpP identifica, analiza y mejoran los procesos clave dentro de la organización, ayudando a mejorar la eficiencia y la efectividad de las operaciones, lo que a su vez reduce los costes y mejora la calidad de los servicios; se utilizan los indicadores de rendimiento para medir el valor añadido de los procesos y para identificar oportunidades de mejora en la eficiencia, eficacia y calidad. El análisis de estos indicadores puede ayudar a tomar decisiones informadas y a implementar mejoras continuas en sus procesos.

Hasta ahora, los procedimientos y PT no contemplaban el MP y por ello no está automatizado junto al mantenimiento preventivo clásico, el planeado/programado. En la transformación digital de la Armada, tanto el mantenimiento programado como el MP tienen un papel

importante a desempeñar. Ambos enfoques de mantenimiento se utilizan para garantizar la disponibilidad y fiabilidad de los equipos navales, pero se basan en diferentes enfoques y tecnologías.

En la transformación digital de la Armada, el MP se ha vuelto más eficiente y preciso gracias a la integración de estas tecnologías avanzadas que se están implementando actualmente en los sistemas de propulsión principal, generadores y motores auxiliares de las fragatas de la serie F-100, en los buques de acción marítima y en los buques logísticos.

El MP, el GD de la fragata F-110 y la implantación de la GpP están interconectados en términos de mejorar la eficiencia y la efectividad de las operaciones navales. La implementación del MP con técnicas de IA en buques militares es un sistema novedoso sin precedentes en fuerzas navales de nuestro entorno, y si además se puede integrar y gestionar con un GD, como tecnología incipiente, entraría en el concepto de tecnología disruptiva. Como gran proyecto que supone para la Armada, el problema es que no se ha realizado un estudio de cuál sería la estrategia apropiada o principal para seguir en la implementación del MP dentro del GD y qué PT actuales hay que crear/modificar.

Ante este escenario hay tres variables para tener en cuenta. Primero la implementación del MP con una reciente e importante inyección de recurso financiero para avanzar en su grado de madurez teniendo en cuenta la existencia del mantenimiento programado/planeado actual; segundo, la integración del MP en el futuro GD de las fragatas F-110 y tercero, la identificación para su actualización o creación de los PT necesarios para la automatización de las actividades relacionadas con el MP y el GD. Por lo expuesto, partiendo del GD como nexo común, el objetivo principal de este trabajo es determinar cuál es la mejor estrategia que se debería seguir en la implementación del MP, acompañado del objetivo específico de identificar las actividades o PT que se incluirían en la GpP del MP en la Armada.

La **metodología** que se seguirá para determinar la principal estrategia de la Armada en cuanto a la implementación del MP será mediante un análisis cualitativo de los puntos fuertes y débiles, controlables o no controlables de la organización. Para identificar los PT relacionados con el MP para la GpP desde la adquisición del material hasta la vida operativa y baja de servicio se seguirá una metodología de ventaja competitiva en la cual, se separan las

actividades clave o principales de las de apoyo o de soporte, y de forma también cualitativa se conocería el valor añadido de los nuevos PT. Durante el desarrollo del trabajo también se utilizarán las metodologías siguientes:

- Explicativo: se expondrán los problemas.
- Exploratorio: consistirá en buscar información sobre la que no existe un marco teórico bien definido o una aproximación en otros sectores de la industria.
- Descriptivo: se describirán los actuales sistemas de mantenimiento y de la GpP.

Al final se realizarán unas propuestas en el sentido de citar las acciones necesarias que favorezcan la estrategia principal de la Armada y mejoren la competitividad mediante la GpP.

2 MARCO TEÓRICO

El MP está implementándose en la Armada en respuesta a un plan de transformación digital que requiere la actualización de los procesos actuales de mantenimiento en los buques de la Armada; el avance tecnológico de la Industria 4.0 ha permitido incorporar la IA en el MP como un sistema novedoso no implementado dentro en las fuerzas navales de nuestro entorno. Esta tecnología disruptiva e incipiente se incluirá en el GD de las futuras fragatas F-110 que se construirán en los astilleros de NAVANTIA, siendo esta circunstancia el elemento catalizador para mejorar las técnicas del MP.

En los apartados siguientes se describirán en primer lugar los conceptos de Industria 4.0 y GD de la Armada y las definiciones del Apoyo Logístico y Mantenimiento; en segundo lugar se estudian algunos estudios de costes del sostenimiento y mantenimiento en la industria civil y militar para justificar el considerable ahorro del gasto durante el ciclo de vida del material y siendo la Armada un caso único en la implementación del MP con IA en plataformas navales, finalizando con los desafíos y oportunidades de los GD; en tercer lugar se resume el sistema de mantenimiento basado en la fiabilidad con IA y el basado en la condición y por último se detalla la situación actual de la implementación del MP, de la integración en el GD, de los PT involucrados, inversiones realizadas y futuras actuaciones.

2.1 El mantenimiento predictivo y relación con el gemelo digital

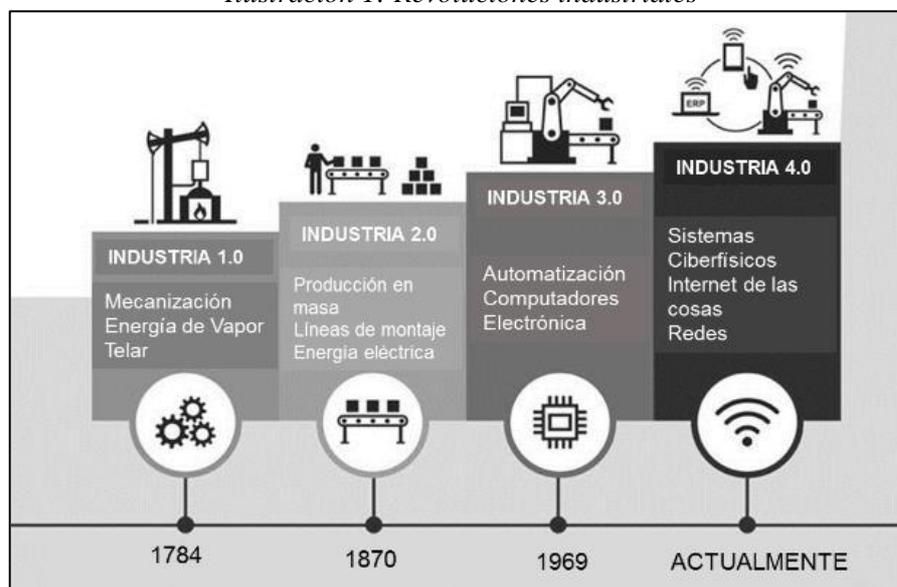
Dentro de la transformación digital del Ministerio de Defensa (MINISDEF) se tiende a aprovechar los avances en el ámbito civil de la denominada tecnología 4.0 o cuarta revolución industrial para apoyar el proceso de transformación a través de iniciativas de innovación tecnológica con un alto grado de valor añadido. El desarrollo de tecnologías para los principales desafíos y retos tecnológicos de la Defensa “están orientados al apoyo de la Base Tecnológica Industrial (BTI) nacional” (DGAM, 2020, pág. 38).

La DGAM (2020) amplía el ámbito de aplicación de las nuevas tecnologías que componen el concepto de la **Industria 4.0** a la “inteligencia artificial, Big Data (BD), blockchain, IoT, simulación virtual, realidad aumentada, **mantenimiento predictivo**, robótica, fabricación aditiva, **Gemelo Digital (GD)**, hiperconectividad, etc. para dar lugar a una profunda transformación de los **procesos** y servicios que proporcionan las organizaciones y de la sociedad en general”.

La referencia a “industria 4.0” corresponde a la última revolución industrial, la cuarta, y es denominada por algunos autores como la era de la digitalización; las anteriores revoluciones (ver ilustración 1) se describen a continuación (Rozo-García, 2020):

- La primera revolución industrial se inició en Inglaterra entre los años 1750-1840. El icono de la primera revolución industrial está representado por la primera máquina de vapor.
- La segunda revolución industrial se inició a mediados del siglo XIX y principios del siglo XX, estuvo caracterizada por la consolidación en el avance científico y tecnológico y la expansión a otros países. Esta etapa es caracterizada por el surgimiento de la era eléctrica, de los primeros medios de comunicación eléctricos, el desarrollo de la industria química, etc.
- La tercera revolución industrial, conocida como la del conocimiento y de las tecnologías de la información, se desarrolló aproximadamente entre los años 1960 y 1990. Esta época presenció el surgimiento y el avance acelerado y sin precedentes de la electrónica, la bioingeniería, los ordenadores, etc.

Ilustración 1: Revoluciones industriales



Fuente: (Rozo-García, 2020)

Paralelo al concepto de Industria 4.0, sigue el concepto del apoyo logístico 4.0, cuyos aspectos tecnológicos se resumen en (CONLOG AJEMA, 2017):

- Interoperabilidad: capacidad de interconexión de todos sus elementos, materiales y humanos, sobre una plataforma digital de estándar único.
- Virtualización: integración de los procesos logísticos en un entorno o maqueta digital que contenga toda la información, que sea única (dato único) y permita el sostenimiento, configuración, simulación, enseñanza, adiestramiento, etc.
- Automatización: utilización de algoritmos y sistemas inteligentes de aquellas actividades que se puedan realizar de forma automática.
- Capacidad de trabajo en tiempo real: reaccionar automáticamente a los fallos que se produzcan en un proceso.

Sobre el concepto de Industria 4.0, el GB INA Martínez & CN INA González (2018) citan sobre su origen que “El concepto de Industria 4.0 fue publicado por primera vez en 2013, en el documento (Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0), elaborado con apoyo del Gobierno alemán, que planteaba tomar la iniciativa para aprovechar en el campo de la industria los extraordinarios avances en capacidad de proceso y comunicación de datos (IoT, BD e IA). De acuerdo con este documento, la aplicación de lo anterior nos introducirá en una Cuarta Revolución Industrial”.

Para el desarrollo de la Industria 4.0 se precisan relaciones entre cliente, fabricante y proveedores distintas a las anteriores revoluciones industriales, incluso de cambios organizativos internos de la organización y de la gestión en el sostenimiento; el GB Martínez y el CN González (2018) citan dichos cambios en los siguientes niveles de integración:

- Integración horizontal (cliente, fabricante y proveedores).
- Integración vertical dentro de la propia empresa (dirección, ingeniería y planta de producción).
- Gestión integral del ciclo de vida desde la producción hasta la baja o retirada del material.

La aplicación de las nuevas tecnologías que componen el concepto de la Industria 4.0 incluye al GD de las futuras fragatas F-110 y la necesidad del Apoyo Logístico 4.0 dentro del plan de transformación digital. El desarrollo del concepto de GD de NAVANTIA recibió un impulso esencial con la participación en los grupos de trabajos lanzados por la Armada en abril de 2017 dentro del marco del Plan de Acción para la transformación del Apoyo Logístico al concepto 4.0 del Estado Mayor de la Armada (EMA), (Recamán, 2018, pág. 236). Las especificaciones de contrato del programa de construcción de las nuevas fragatas F-110 contemplan la adquisición de un GD (réplica digital de una entidad física) en respuesta al concepto de apoyo logístico 4.0:

“...el buque dispondrá de capacidades orgánicas de recepción y tratamiento de datos provenientes principalmente del Sistema Integrado de Control de Plataforma y de los sensores del Sistema de Combate a través de capacidades de autodiagnóstico embebidas en los sistemas. Igualmente se desarrollará una “maqueta digital” del buque (sistema de información que contiene una representación gráfica en tres dimensiones) del buque que deberá estar integrada con los sistemas logísticos y administrativos de la Armada”. (GB INA Martínez & CN INA González, 2018)

Una denominación de GD sería el “conjunto de construcciones virtuales de información que describe de forma completa un producto físico existente o potencial desde el nivel microatómico hasta el nivel macrogeométrico. De forma óptima, cualquier información que pueda obtenerse a partir de la inspección de un producto fabricado físicamente, puede

obtenerse desde su GD” (Grieves & Vickers, 2017), entre otras (Ferreño, 2022, pág. 37). Según el GB INA Martínez y el CN INA González (2018), el GD de la fragata F-110 residirá en tres plataformas que deberán estar permanentemente sincronizadas:

- Plataforma NAVANTIA: proporcionará apoyo al diseño, construcción, pruebas, sostenimiento y mejora del producto durante el ciclo de vida completo de la serie.
- Plataforma MINISDEF: almacenará todos los datos estáticos y dinámicos de la clase. Proporciona soporte a las aplicaciones logísticas y de alistamiento en tierra, incluyendo el CESADAR.
- Plataforma Buque: acumulará todos los datos estáticos y dinámicos del buque y proporcionará soporte a las aplicaciones logísticas y de alistamiento a bordo.

La plataforma NAVANTIA para el GD de la fragata F-110 está en marcha mediante la denominación del “Astillero 4.0” con el objeto del “...dato único, entendiendo por tal el dato que se captura y registra una única vez, debe fluir a través de la cadena de valor: desde el concepto hasta que el buque se da de baja” y “...este sistema debe generar un GD de las plantas de NAVANTIA, de las personas y de sus buques de tal forma que se puedan aprovechar las capacidades de las nuevas tecnologías 4.0” (NAVANTIA, 2022).

En febrero de 2019, el Segundo Almirante Jefe del Estado Mayor de la Armada sobre la transformación digital y el sostenimiento 4.0 en la Armada, informaba que los datos obtenidos del GD había que entenderlos:

“...no solo como una virtualización del buque, sino también de la organización interna, adiestramiento, etc. sirviendo de base para alimentar los **procesos de trabajo** automatizados que se ejecutarán sobre el Sicor¹ (Sistema de Control de Organización), plataforma que servirá de soporte al conjunto de procesos utilizados por la Armada para gestionar y controlar su actividad. Este nuevo sistema, herramienta clave para la transformación digital, está siendo desarrollada en coordinación estrecha con el Centro de Sistemas y Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (CESTIC)”. (ALTE. Urcelay, 2019)

¹ Actualmente se denomina ARGO (Plataforma de Armonización para la Gestión de la Organización).

Una funcionalidad del GD será la de incorporar los procesos de mantenimiento del buque (especialmente el MP con capacidades añadidas de adiestramiento, simulación y cuadros de mando para la ayuda a la toma de decisiones; la DGAM (2020, pág. 68,116) considera un objetivo la IA dentro de la inteligencia de datos para el **MP** en las plataformas de Defensa dentro del ámbito específico de actuación de aprovechamiento del empuje tecnológico civil. El programa de obtención de las fragatas F-110 con GD ha sido el catalizador para mejorar las técnicas de MP al resto de buques ya iniciado sobre el año 2010 en el CESADAR. Conviene citar que en la Armada hay tres tipos de mantenimiento en función de la naturaleza al que se somete el material (CONLOG AJEMA, 2017):

- **Preventivo:** acciones programadas que se realizan para evitar o retrasar posibles fallos o averías mediante inspecciones, reemplazos, acciones periódicas, vigilancia continuada y rehabilitación o recorrido del sistema. El MP está dentro de este tipo de mantenimiento.
- **Correctivo:** acciones para restablecer el funcionamiento de un sistema tras un fallo.
- **Modificación:** acciones para actualizar o mejorar las capacidades del sistema en cuanto rendimiento, fiabilidad o mantenibilidad.

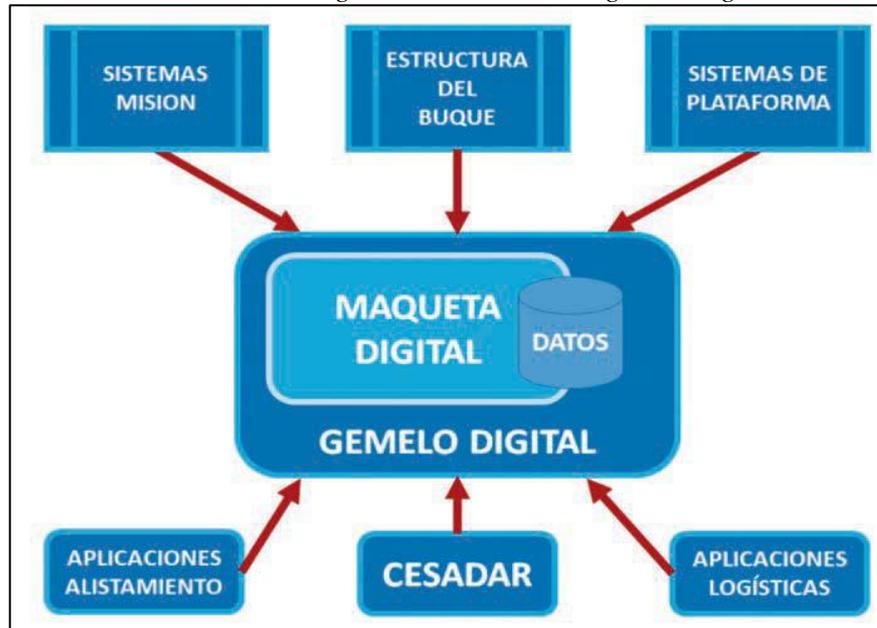
Existen varias definiciones de MP, una de ellas se puede interpretar como un tipo de mantenimiento donde se asocian parámetros físicos con el desgaste o estado de un equipo/sistema; también se puede considerar como una técnica para predecir un punto futuro de error o fallo del equipo/sistema para reemplazar el componente justo antes del fallo. El objetivo es detectar y corregir problemas antes de que ocurran, lo que permite evitar interrupciones en la operación y reducir los costos de mantenimiento que forman una parte importante de los costos totales del ciclo de vida de una plataforma. Se utiliza en una variedad de industrias, incluyendo fabricación, minería, energía, transporte y servicios públicos. Normalmente son técnicas no invasivas y algunos ejemplos de tecnologías y técnicas utilizadas en el MP incluyen (Pérez, 2021, pág. 48):

- **Análisis de vibraciones mecánicas:** Se utilizan sensores para medir las vibraciones de un activo y luego se analizan los datos para detectar patrones anómalos que puedan indicar problemas.

- **Análisis de aceites:** Se utilizan sensores para medir las propiedades de la lubricación (por ejemplo, el nivel, la temperatura, la presión) y luego se analizan los datos para detectar problemas con el lubricante o con el equipo.
- **Aplicación de termografías:** Se utilizan cámaras térmicas para crear imágenes térmicas de un activo y luego se analizan las imágenes para detectar problemas con el aislamiento o problemas con el enfriamiento.
- **Análisis de ultrasonidos:** Se utilizan transmisores/receptores de ultrasonidos capaces de medir desplazamientos físicos de los elementos de un sistema o detección de obstáculos.
- **Análisis por medio de luz ultravioleta:** Se utiliza para comprobar el grado de contaminación de lubricantes y aceites, detección de fugas o descargas parciales de electricidad, etc.
- **Control de espesores:** Se utilizan medidores especiales para detectar el grado de desgaste del material.
- **Inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático:** Se utilizan algoritmos de IA y aprendizaje automático para analizar grandes cantidades de datos y detectar patrones y tendencias que puedan indicar problemas.

La ilustración 2 muestra la conexión del GD con el resto de los sistemas logísticos, de misión, de plataforma y estructura, de alistamiento y de supervisión/análisis de datos (CESADAR) para el tratamiento del MP.

Ilustración 2: Diagrama de contexto del gemelo digital



Fuente: (GB INA Martínez & CN INA González, 2018, pág. 301)

En el CONLOG AJEMA (2017) aparece la “maqueta digital” como elemento base para la producción, el apoyo al ciclo de vida e, incluso, para la instrucción y adiestramiento de operadores y mantenedores, se potencia el RCM y la evolución del CESADAR hacia un concepto más amplio que permita una gestión integral del apoyo logístico.

Para llevar a cabo los diferentes tipos de mantenimiento en función del personal que lo realiza, el lugar y la Autoridad responsable, existen en la Armada tres escalones de mantenimiento (CONLOG AJEMA, 2017):

- Primer escalón: lo realiza el personal del buque con la responsabilidad del Comandante del buque.
- Segundo escalón: lo realiza el personal o en instalaciones de apoyo logístico bajo la autoridad subordinada al Almirante Jefe de Apoyo Logístico (AJAL).
- Tercer escalón: igual que el segundo escalón, pero realizado por personal o entidades ajenas a la Armada.

En los retos y oportunidades de material, el sostenimiento de los sistemas y plataformas también ha de evolucionar hacia una mayor agilidad y eficiencia, siendo importante diseñar la sensorización y conectividad de los sistemas en una filosofía de sostenimiento predictivo y

relativo a la disminución de la huella logística, contempla la exploración de áreas como el ajuste de stocks y el **Mantenimiento Predictivo**, ambos conceptos de **nivel estratégico** (Centro Conjunto de Desarrollo de Conceptos, 2022, págs. 97, 110).

2.2 Costes del mantenimiento y desafíos y oportunidades del gemelo digital

Un estudio de sobre la evolución de los costes del transporte marítimo entre 2003-2008 revela que “los gastos corrientes de funcionamiento de los buques (tripulación, mantenimiento y reparaciones, seguros, etc.) sufrieron incrementos muy importantes”, y que “...en lo que respecta al mantenimiento y las reparaciones, el aumento promedio en 2007 fue del 12%” (Polo, 2012, págs. 22-23).

En particular el coste de operación y mantenimiento en España de la fragata F-105 alcanza 0,93 veces el precio de adquisición de 823 M€ durante el ciclo de vida de 30 años, o sea, 765 M€ (Pastor, 2016, pág. 173). En general, sin incluir los costes de modernización de media vida, los sistemas de estimación de costes calculan que la etapa de operativa de una nueva clase de buques conlleva un coste casi igual al de adquisición. Dentro del coste de ciclo de vida, el sostenimiento se lleva alrededor del 70%, del que el 40% corresponde al mantenimiento (CN RES Díaz del Río J. , 2021).

La importancia del coste de mantenimiento ha aumentado con el tiempo; Moubray (2004) indica que tanto en términos absolutos como en proporción del gasto total, en algunas industrias representa ahora el segundo ítem más alto y en consecuencia, en sólo treinta años ha pasado de ser un coste casi sin importancia a estar en la más alta prioridad en el control de costes.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que el costo inicial de implementar el MP puede ser compensado por los ahorros a largo plazo en costos de mantenimiento y mejora de la disponibilidad de los activos. En un estudio en 35 pequeñas y medianas empresas de Castilla la Mancha sobre el grado de implementación del MP concluye con los siguientes datos:

“El 50% de las empresas han reducido sus costes de mantenimiento correctivo entre un 10-20% y, el 62,5% sus costes de mantenimiento preventivo en un rango similar (10-20%).

El 57,1% de las empresas han conseguido una reducción en la prima de seguros como consecuencia de implantar un Plan de MP”. (Carnero, 2013)

Un estudio de sobre la utilización de BD en el mantenimiento de la industria añade que se “puede reducir los costes operacionales entre un 10% y un 25% e incrementar potencialmente la producción un 5% o más” (Wang y otros, 2020, pág. 4) ; otros autores citan que el enfoque de MP en las industrias manufactureras, sin especificar la utilización de BD o IA, que puede minimizar los costos de mantenimiento hasta en un 30 % y eliminar las averías hasta en un 75 % en comparación con el mantenimiento preventivo clásico (Kurt y otros, 2017).

Hay mucha literatura sobre el empleo del MP en la industria civil y en el ámbito universitario; por ejemplo, en referencia sobre la implementación del análisis predictivo mediante sensores de vibraciones de un compresor de metano de una plataforma petrolífera y de un motor de inducción de un sistema elevador, se concluye con la “rentabilidad y precisión” de aplicar este tipo de mantenimiento (Niu y otros, 2010); en contrapartida, no hay estudios conocidos o documentados de la implementación del MP en sistemas de plataformas navales militares ni civiles excepto en una tesis doctoral de un motor diésel marino generador de electricidad, pero en instalaciones de fábrica (Pagán, 2017).

Resumiendo, el coste de implementar el MP varía dependiendo de una serie de factores, como el tamaño y la complejidad del activo, la tecnología utilizada y el alcance del programa. Sin embargo, según las estimaciones generales, el costo medio de implementar el MP puede ser alto, y depende mucho de cada caso específico. Además, el MP también ayudar a reducir los costos de repuestos, ya que permite planificar mejor los trabajos de mantenimiento y asegurarse de que los repuestos necesarios estén disponibles cuando se necesiten. En todo caso, cualquier inversión en mantenimiento producirá un ahorro mayor durante el ciclo de vida del material. Es importante también mencionar que el costo no solo se refiere a la inversión en tecnología, sino que también en personal capacitado para implementar y operar el MP, además de un plan de mantenimiento adecuado. En general, el coste de implementar el MP puede ser significativo, pero los beneficios a largo plazo pueden justificar la inversión y se realizaría un análisis de costo-beneficio antes de tomar una decisión sobre implementar el MP.

Relativo al GD en la construcción naval militar, los principales astilleros de construcción naval ya están contemplando en mayor o menor medida su desarrollo; por ejemplo, Estados Unidos está en una fase primaria en su desarrollo de GD, pero orientado a simular buques antes de su construcción y al MP (Fu, 2017). También Australia está avanzando en la aplicación de gemelos digitales a buques militares; la “Royal Australian Navy” y la empresa “Kongsberg Digital” colaboran en el desarrollo de un simulador del puente de gobierno de un buque, denominado “K-Sim Navigation” que permite la simulación de diferentes escenarios tácticos / navegación de forma realista. En Canadá, la “Royal Canada Navy” ha elaborado una estrategia para la digitalización de su flota basada también en el desarrollo del GD (Ferreño, 2022). El Director de Tecnologías y Transformación Digital de NAVANTIA, Donato Martínez, afirmó que el GD es único en el mundo y que conceptualmente no tiene nada que ver con la maqueta digital que es visualizar en tres dimensiones o realidad aumentada el buque, frente al GD que se apoya en el modelado, la simulación y la IA (Carrasco, 2020).

VanderHorn & Mahadevan (2021) publicaron en la revista *Elsierer* los resultados de un proyecto apoyado parcialmente con fondos de “American Bureau of Shipping²”; en ese proyecto se revisaron 46 definiciones de la literatura de los últimos diez años de gemelos digitales para la construcción de buques, contemplando los siguientes desafíos y oportunidades en la implementación del GD:

- Es necesario definir una terminología común para evitar la falta de comunicación entre los diferentes dominios técnicos.
- Estandarización: el empleo de una amplia gama de tecnologías que van desde los datos recopilados hasta la generación de información y ayuda a la toma de decisiones deben estar sujetos a estándares, cuyo desarrollo es lento.
- Cultura de organización: entre las múltiples partes interesadas debe existir cooperación y colaboración en el acceso a datos e información garantizando la seguridad de los datos, los derechos y la propiedad intelectual.

² Sociedad de clasificación con sede en Houston, Texas. ABS fue fundada en 1862 y actualmente es una de las tres empresas líderes en su sector a nivel mundial.

- **Madurez tecnológica:** lo normal es que el GD se construya con un mosaico de diferentes tecnologías y soluciones de varios vendedores y se deben seleccionar teniendo en cuenta el nivel de madurez tecnológica y los que ofrezcan un significativo grado de eficacia y eficiencia y el impacto sobre el costo del proyecto.
- **Verificación y Validación:** normalmente el GD está compuesto de múltiples modelos y procesos y la verificación y validación es un desafío para realizarlo como un único modelado del sistema físico y puede que haya instancias que no sea posible validar por separado individualmente y como un sistema integral.
- **Automatización:** el objetivo más importante en muchos gemelos digitales es reducir el esfuerzo manual a través de la automatización de intercambio y análisis de datos y todavía existe una fuerte dependencia del factor humano.

El GD de la fragata F-110 es una herramienta que crea una réplica virtual de la fragata para simular el rendimiento y las operaciones antes de que se implementen en la vida real. Esto ayuda a la Armada Española a identificar posibles problemas y mejorar los procesos antes de que ocurran situaciones reales, lo que reduce los riesgos y los costes.

En línea con lo anteriormente expuesto, se puede afirmar que los costes de mantenimiento forman una parte importante de los costes del ciclo de vida y la solución para reducirlos o minimizarlos es implementar metodologías de prevención basadas en la fiabilidad (mantenimiento planificado, mantenimiento basado en el estado o condición y MP). El costo total de mantenimiento se compone de varios factores, como el costo de reparación, el costo de parada de la producción, el costo de los repuestos y el costo de las horas de trabajo. El MP ayuda a reducir estos costos al permitir que los problemas se detecten y corrijan antes de que se conviertan en fallos graves. Esto reduce el tiempo de parada de la producción, disminuye la necesidad de reparaciones costosas y prolonga la vida útil del equipo. La integración del MP con técnicas de IA en el GD utilizando tecnologías emergentes y disruptivas proporciona un notable valor añadido al sector de la construcción naval y un reto a alcanzar en la logística 4.0 (VA CGA Bueno, 2018).

2.3 Bases sobre el RCM y FMEA

El primer antecedente en el Ministerio de Defensa (MINISDEF) donde se cita la estrategia de fiabilidad del mantenimiento fue en el año 2008, donde la Secretaría de Estado de Defensa promulgaría una instrucción sobre **sostenimiento** definiéndolo como: “el conjunto de actividades logísticas necesarias para mantener y reparar los sistemas de armas y sus elementos asociados de forma que se garantice su correcta operación cuando y donde sean requeridos, así como el mantenimiento y la actualización de sus capacidades a lo largo de su ciclo de vida” y que engloba al **mantenimiento** como una actividad dentro del sostenimiento (entre otras del mismo nivel como aprovisionamiento e ingeniería del ciclo de vida) señalando que “la estrategia de optimización del mantenimiento evolucionará orientándose a través del análisis de fiabilidad” (Carriazo, 2018).

Los planes de mantenimiento de la Armada se remontan al año 1981, con la introducción del PMS (Sistema de Mantenimiento Planeado), sistema que no contemplaba los trabajos de mantenimiento durante las inmovilizaciones prolongadas de los buques por grandes obras; es por ello por lo que posteriormente surge el primer sistema de mantenimiento que solucionaría el problema anterior, el Plan de Mantenimiento de Clase (CMP), en el que cada buque tenía su programa propio (Blanco, 2012). Con la creación, a posteriori, del Plan de Mantenimiento Integrado de la Clase (ICMP), lo que se pretende es unificar los mantenimientos de la flota basándose en un Mantenimiento Basado en la Condición (CBM del inglés “Condition-Based Maintenance”), el cual se puede considerar como un mantenimiento de tipo predictivo (Pery, 2011). Aclarar que el sistema de PMS, también denominado sistema de mantenimiento programado es un sistema particular de la metodología del RCM³ (del inglés “Reliability-Centered Maintenance”). En resumen, el mantenimiento programado tiene un enfoque de mantenimiento preventivo que se basa en programar actividades de mantenimiento periódicas de manera regular, independientemente del estado real del equipo. Este enfoque se basa en la suposición de que los equipos tendrán una tasa de fallos constante y que se pueden prever las averías a través de la experiencia y la historia de los equipos. El mantenimiento programado

³ Algunos autores, sobre todo latinoamericanos, lo traducen como Mantenimiento Centrado en la “Confiabilidad” debido a error de traducción inicial de primeros textos sobre RCM.

se ha vuelto más eficiente mediante la integración de tecnologías avanzadas, como la automatización y la optimización de la programación de mantenimiento, lo que ha reducido el tiempo de inactividad no planificado y aumentado la disponibilidad del equipo.

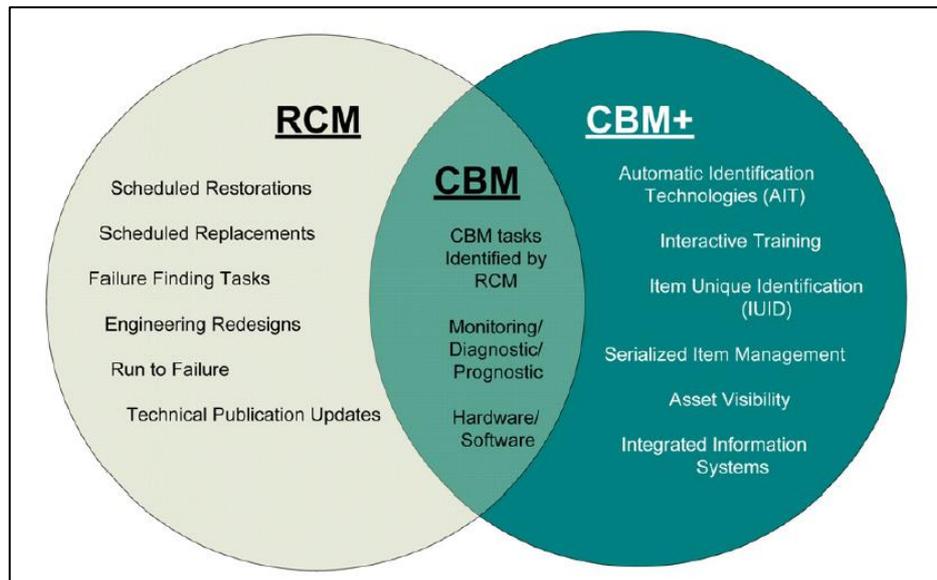
El RCM es una metodología reconocida (entre otras) y de uso extendido para elaborar planes de mantenimiento preventivo, predictivo, localización de fallos, etc. Fue desarrollada inicialmente por la industria comercial de aviación de los Estados Unidos para mejorar la seguridad y confiabilidad de sus equipos, fue definida por los empleados de la United Airlines Stanley Nowlan y Howard Heap en 1978 y sentó las bases de la mayoría del trabajo hecho en este campo fuera de la industria aeronáutica en los últimos años y definida como un proceso utilizado para determinar que se debe hacer para asegurar que cualquier activo continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional (Moubray, 2004).

La diferencia entre el mantenimiento programado y el centrado a la fiabilidad es que el primero busca mantener la funcionalidad del activo físico y el segundo busca mantener la operatividad dentro de unos márgenes establecidos (Moubray, 2004).

La ilustración 3 muestra la relación del RCM/CBM/CBM+, donde se puede observar que la metodología CBM es una parte de la metodología RCM. La metodología CBM+ es una mejora del CBM que aplica la integración de procesos, tecnologías y capacidades para mejorar la fiabilidad y la efectividad del mantenimiento que se hizo popular en el Departamento de Defensa de EE. UU en el 2006.

El RCM emplea el CBM como principal estrategia de gestión de fallos: “El uso de la estrategia de fusión de datos puede aumentar la precisión de mantenimiento... con un óptimo beneficio-coste” (Niu y otros, 2010, pág. 787).

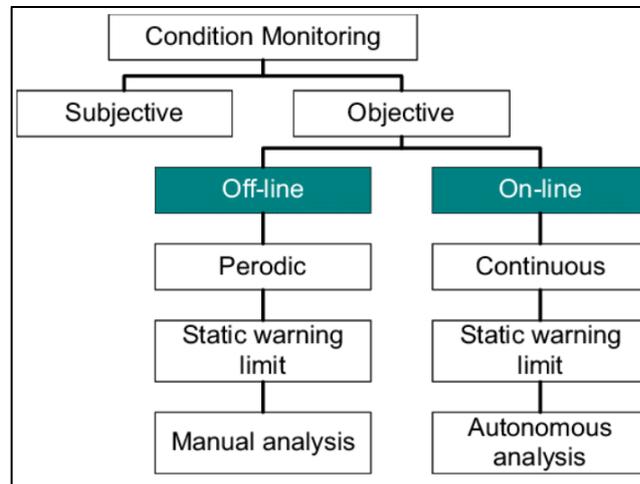
Ilustración 3: Relación RCM/CBM/CBM+



Fuente: (Niu y otros, 2010)

El sistema CBM monitoriza el estado de los sistemas de forma “on-line” y “off-line” dependiendo de la disponibilidad de la conexión de red (ver ilustración 4). La monitorización en tiempo real es continua y se activa una alarma de advertencia cuando algo funciona por debajo de un umbral fijado o existe un fallo; pero hay dos limitaciones: normalmente es costoso y monitorizar de forma continua las señales en presencia de ruido y sin procesar podría informar con diagnósticos inexactos. La forma de monitorización periódica tiene un costo menor y proporciona diagnósticos más precisos utilizando datos filtrados y/o procesados, pero, a riesgo de perder eventos de fallo entre inspecciones sucesivas. Ambas formas de monitorización en CBM son objetivas, disponiendo el personal mantenedor de instrumentos y herramientas para obtener mediciones directas de los parámetros de la condición del componente, equipo o sistema. La monitorización subjetiva es como la anterior pero el personal mantenedor emplea dispositivos o artilugios simples que se suman a su habilidad de percepción para detectar mejor las anomalías (Niu y otros, 2010).

Ilustración 4: División de la monitorización del mantenimiento basado en la condición



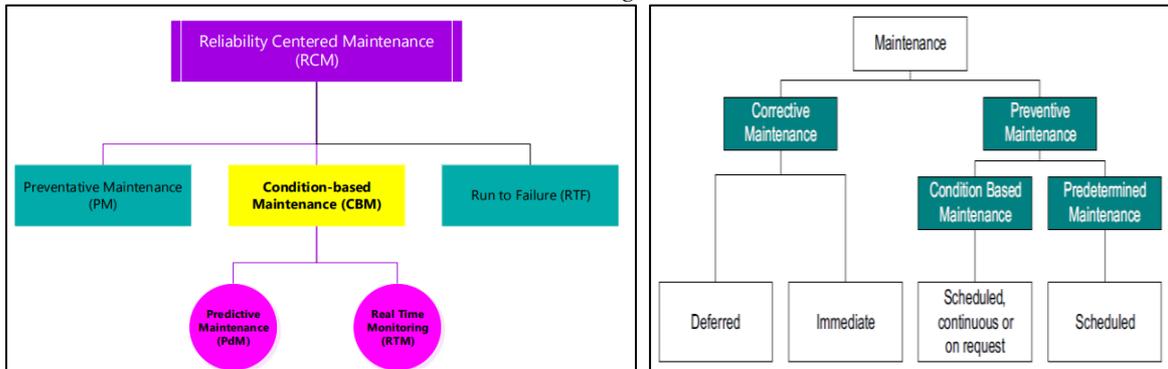
Fuente: (Niu y otros, 2010, pág. 790)

Para la monitorización del estado de los sistemas por la metodología CBM se utilizan sensores que por ejemplo miden el nivel de concentración de partículas, nivel de líquido en un tanque o depósito, temperatura, humedad, desplazamiento, aceleración, vibraciones, etc (Wang y otros, 2020, pág. 11). En resumen, el MP tiene un enfoque de mantenimiento que se basa en la monitorización en tiempo real del estado de los equipos y en la predicción de las averías antes de que ocurran; utiliza tecnologías avanzadas, como sensores, análisis de datos y algoritmos de IA, para recopilar y analizar datos sobre el estado de los equipos navales en tiempo real. Cada industria tiene sus especificidades y es importante asegurarse de que el equipo utilizado sea el más adecuado para el caso específico. Es importante contar con un equipo de mantenimiento calificado para implementar y operar estas tecnologías, al igual que un plan de mantenimiento adecuado.

Otros autores como Gillespie (2015) y Niu y otros (2010) emplean una organización similar del RCM como el mostrado en la ilustración 5, que simplemente es otra forma de organizar el mantenimiento y a veces puede conducir a confusiones por las numerosas publicaciones que tratan del RCM o del mantenimiento en general, pero de fondo no altera a la descripción metodológica sobre RCM de mayor divulgación como Moubray (2004) donde describe más tipos de mantenimiento que los citados en este trabajo, como el RTF (Run To Failure) de la ilustración 5 (política de manejo de fallos que permite que ocurra un modo de fallo específico sin hacer ningún intento de anticiparlo o prevenirlo, metodología que está fuera del alcance

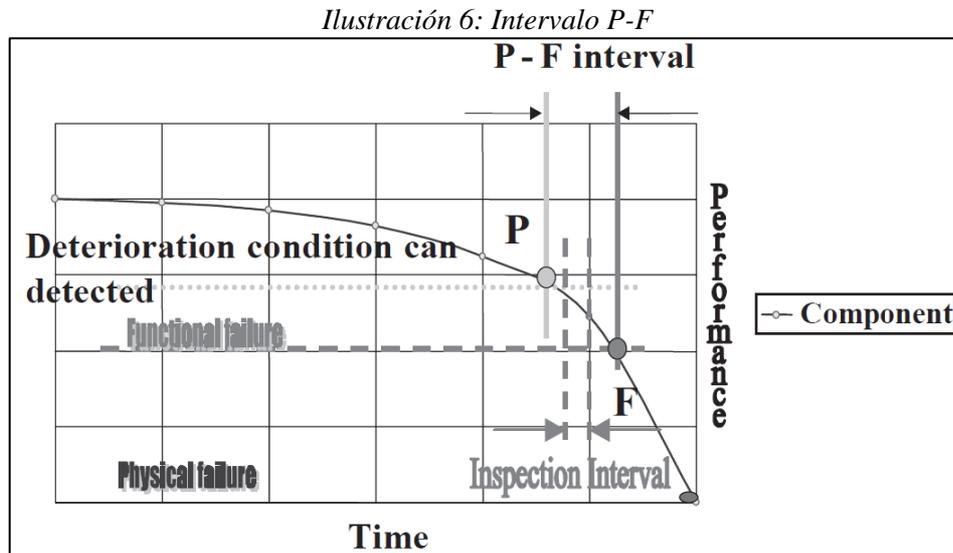
de este trabajo). En resumen, la metodología RCM incluye la mayoría de las técnicas de mantenimiento, la mayoría de carácter preventivo.

Ilustración 5: Diagramas RCM



Fuentes: (Gillespie, 2015; Niu y otros, 2010)

El RCM prioriza el CBM (o mantenimiento predictivo) siempre que sea técnicamente posible realizarla y sea rentable respecto a las consecuencias del fallo; para poder llevar a cabo el CBM, es importante el concepto de la curva o intervalo P-F que se muestra en la ilustración 6. El intervalo P-F representa la degradación que se produce en un equipo con el tiempo. Según el indicador que se monitorice y el tipo de fallo, el indicador de fallo potencial aparece con más o menos antelación a que se produzca el fallo funcional, que es cuando el equipo deja de realizar la función que se le exige. “El intervalo P-F neto, es el tiempo que existe entre que se detecta el fallo potencial con el parámetro predictivo que se haya utilizado y el fallo funcional. A mayor intervalo P-F neto, más tiempo para planificar la reparación/sustitución para que no tenga o tenga el mínimo impacto en la operatividad y disponibilidad del equipo” (Pagán, 2017).



Makashaki y otros (2002) aseguran que el CBM se puede llevar a cabo en todos lados. Antes de una realizar una tarea de mantenimiento basada en la condición se deben determinar y cumplir algunos criterios si técnicamente es factible:

- Definir una falla potencial con una condición clara.
- Si el intervalo P-F es razonablemente consistente (ver ilustración 6) donde la curva P-F es la duración del tiempo desde el punto donde el deterioro de la condición puede ser detectado hasta el punto donde el equipo falla funcionalmente.
- Si es práctico monitorizar un equipo a intervalos menores a el intervalo P-F.

Por otro lado, a la metodología RCM se le puede añadir una herramienta de análisis de fallos:

“La metodología de RCM es un marco ideal para desarrollar un “Failure Modes, Effects and Criticality Analysis” (FMECA⁴), que significa “análisis de modos de fallo y efectos indicando su criticidad”, siendo la criticidad la combinación de la severidad de un efecto y la frecuencia de su ocurrencia y otros atributos de un fallo como una medida de la necesidad de tratarlo y atenuarlo. El análisis FMECA es una base de datos de fallos completa en la que se

⁴ Diversas fuentes identifican al FMEA/FMECA como “metodología” o “método sistemático...” de forma indiferente; también algunos autores los incluyen dentro de la metodología RCM y viceversa. Aclarar que son todas consideradas metodologías, la primera perteneciente al estándar IEC 80812:2018 y la segunda al IEC 60300-3-11.

incluyen los síntomas que se producen cuando existe un fallo y la criticidad de este. En ocasiones, no se analiza la criticidad, en ese caso el análisis se denomina “Failure Modes, Effects Analysis” (FMEA)”. (Pagán, 2017)

El análisis con la metodología FMEA también se utiliza “para detectar y eliminar de forma sistemática los problemas de diseño y fabricación de productos...fallos potenciales de los procesos que tienen efectos internos dentro de la instalación productiva” (Arias & Minguela, 2018, pág. 83).

Según Arias & Minguela (2018), aplicar FMEA consiste básicamente en la construcción de un documento de forma sistemática. Dicho documento tiene el formato de la ilustración 7 que servirá para determinar qué fallos y qué causas de estos fallos deben ser atendidos con mayor prioridad. Se valoran los aspectos de severidad (S) como la importancia o calificación del efecto de un modo de fallo sobre la operación del elemento, sobre el entorno del elemento o sobre el operador del elemento, ocurrencia (O) que expresa en términos de probabilidad (improbable, poco probable...muy probable) y detección (D) como medios de identificación temprana de fallos existentes o incipientes, permitiendo asignar a cada causa de cada modo de fallo un índice de prioridad llamado RPN (Risk Priority Number).

Además de los parámetros anteriores, si se añade el parámetro de criticidad (C) de los sistemas (que es el caso que nos ocupa), el documento obtenido es un caso particular de FMEA, el FMECA, y cuyo resultado final se resumiría en una matriz de criticidad con efectos globales de tres niveles similar al de la ilustración 8 (de menor criticidad a mayor, verde-amarillo-rojo)⁵:

⁵ Los niveles de criticidad y los valores de severidad y ocurrencia de la ilustración son un ejemplo.

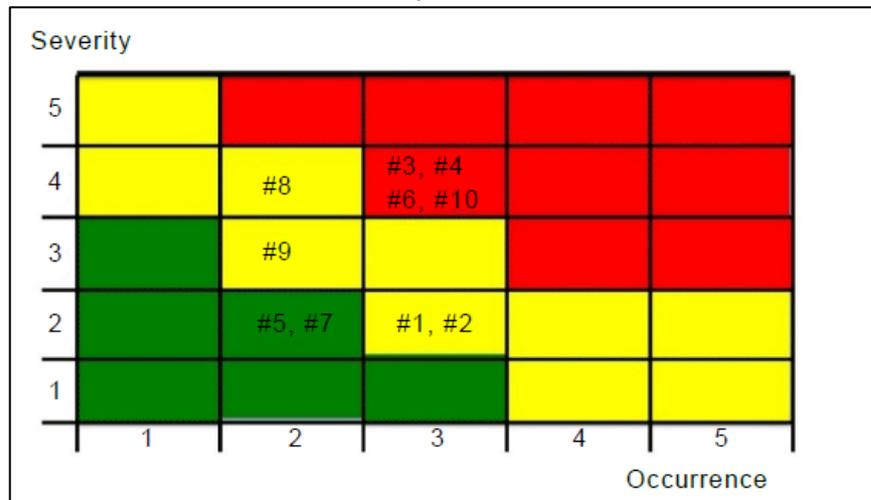
Ilustración 7: Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE)

| Análisis modal de fallos y efectos (AMFE) | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------------------------|---|--|---|---|--|---|--------------------|---|--|---|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Nombre del proceso o producto: | | | | Realizado por: | | | | Pág: de | | | | | | | |
| Propietario del proceso: | | | | Fecha del AMFE: | | | | Rev: | | | | | | | |
| Producto / proceso | Modo de fallo (potencial) | Efecto del fallo (potencial) | SEV | Causas | OCU | Controles actuales | DET | RPN | Acciones recomendadas | Resp. | Acciones emprendidas | SEV | OCU | DET | RPN |
| ¿Cuáles son los elementos a analizar? | ¿De qué forma fallan? | ¿Cuál es el impacto de dicho fallo, es decir, su efecto en nuestros clientes o requerimientos internos? | ¿Cómo de severo es el fallo para los clientes? | ¿Cuáles son las potenciales causas de este fallo? | ¿Cuál es la frecuencia con la que ocurre? | ¿Cuáles son los controles existentes que previenen los fallos? | ¿Hasta qué punto somos capaces de detectar este fallo o efecto? | | ¿Cuáles son las acciones a emprender para reducir el RPN? | ¿Quién es el responsable de la acción? | Notas sobre la acción, incluyendo fechas. | Nueva SEV después de la acción. | Nueva OCU después de la acción. | Nueva DET después de la acción. | Nueva RPN después de la acción. |
| | | | | | | | | 0 | | | | | | | 0 |
| | | | | | | | | 0 | | | | | | | 0 |
| | | | | | | | | 0 | | | | | | | 0 |
| A | B | C | | D | | E | | F | G | | | H | | | |

Fuente: (Arias & Minguela, 2018, pág. 84)

En Arias & Minguela (2018) se desarrolla la implementación del FMCA, comenzando una vez descrito el producto o proceso que queremos analizar del bloque A (de la ilustración 7), se identificarían los posibles modos de fallo del bloque B, el posible efecto de ese fallo valorando numéricamente su severidad (S) del bloque C, se identificarían las posibles causas de ese fallo y valorando la probabilidad de ocurrencia (O) del apartado D. Por último, se especificarían los controles actuales y se valoraría la probabilidad de detección de fallo del bloque D antes del punto de detección de dicho fallo por los medios disponibles del apartado E. Los aspectos S, O y D valorados permiten asignar a cada causa de cada modo de fallo un índice de prioridad RPN, consistente en el producto de los tres parámetros del bloque F. Para aquellas causas que presentan un RPN demasiado elevado se establecerían actividades de mejora, se nombrarían los responsables de su ejecución y se harían constar los logros en el bloque G. Por último, se recalcularían los valores S, O, D y RPN tras las acciones realizadas, cuantificando así la mejora obtenida en el índice RPN del bloque H. En caso de que esto no se encuentre en el nivel deseado, se volverían a plantear nuevas acciones.

Ilustración 8: Matriz de criticidad de FMECA



Fuente: (IEC 60812, 2018)

La efectividad de la metodología FMEA puede mejorar si se combina con otros métodos dependientes del sistema a analizar (IEC 60812, 2018, pág. Anexo D), por ejemplo, realizando una regresión “Dempster–Shafer”⁶ y “Leastsquare - Support Vector Machine”⁷ (LS-SVM) (Niu y otros, 2010). Si a la metodología RCM se le aplican o implementan los análisis de FMECA con tecnologías de detección automática de fallos (p.e. de IA), se le denomina “modelo híbrido” (Pagán, 2017, pág. 3).

2.4 Alcance de la implementación del mantenimiento predictivo

La perspectiva de las herramientas de diagnosis que se utilizan en el análisis para motores principales, generadores eléctricos y motores auxiliares en los buques de la Armada es hacia la utilización de modelos híbridos que combinan las ventajas de sistemas basados en datos (estadísticos/IA) y sistemas basados en el conocimiento, sistemas físicos (AN INA Lamas, 2022, pág. 111).

Según Lamas (2021), independientemente de la herramienta que se utilice es necesario disponer de una gran base de datos que sean constantes, completos y fiables para diagnosticar

⁶ También conocida como teoría de las funciones de madurez, permite basar los grados de madurez de una pregunta en las probabilidades de una pregunta relacionada.

⁷ Conjunto de métodos de aprendizaje supervisado relacionados que analizan datos y reconocen patrones, y que se utilizan para la clasificación y el análisis de regresión.

el problema; en plataformas navales es muy difícil obtener dichos datos en el servidor central instalado en tierra sin que se produzcan interrupciones en la entrada de datos por pérdidas de conectividad de comunicaciones en la mar, bebiendo recurrir a datos históricos donde se produjeron averías típicas incluso obtenidos de otras plataformas de la misma clase. La solución al problema es dotar al barco de sistemas embarcados que permitan recibir los datos de los motores principales, generadores eléctricos y motores auxiliares, tratarlos (formatearlos/filtrarlos) para que sean presentados en una pantalla gráfica al personal mantenedor y al mismo tiempo aplicar técnicas de IA con datos entrenados⁸ con objetivo de predecir la probabilidad y severidad de futuras averías en base a los criterios de una matriz FMECA-IA. Para mantener la consistencia de las dos bases de datos (embarcada y en tierra), los nuevos datos obtenidos del buque se deben enviar periódicamente al servidor de tierra para continuar con su “entrenamiento”.

El software empleado en los sistemas de MP, tras limpiar y procesar los datos provenientes de los sensores del buque, dispone de algoritmos matemáticos que le permite anticipar con cierto grado de certeza cuándo va a fallar un determinado elemento, equipo o sistema. El almacenamiento de datos de los sensores no es suficiente y es preciso someterlos, primero, a un filtrado que descartaría posibles fallos de sensores, errores de medición, unificación de la frecuencia de toma de muestras, etc. y los prepararía para su explotación en las fases posteriores. Una vez procesados los datos, se almacenarían para evitar repetir el proceso de limpieza en un futuro cuando sea necesario analizarlos. A continuación, se procedería a la “normalización de datos” y se introducirían en un módulo de predicción para conocer el estado del equipo en un instante de tiempo futuro, donde serían empleados para aplicar los diferentes métodos de predicción del sistema; esta etapa correspondería a la de “entrenamiento de datos” referida por Lamas (2021) en el párrafo anterior “Aunque muchos de los modelos de algoritmos matemáticos utilizados existen desde hace años, ha sido ahora cuando la tecnología ha alcanzado la madurez y la adecuada capacidad de almacenamiento, tratamiento y computación para poder obtener dicha capacidad de predicción”. Por último se realiza la automatización, consistente en crear una base de datos de todos los buques y

⁸ Los datos se entrenan en un sistema instalado en tierra con técnicas de IA y posteriormente se almacenan en las bases de datos de los sistemas embarcados.

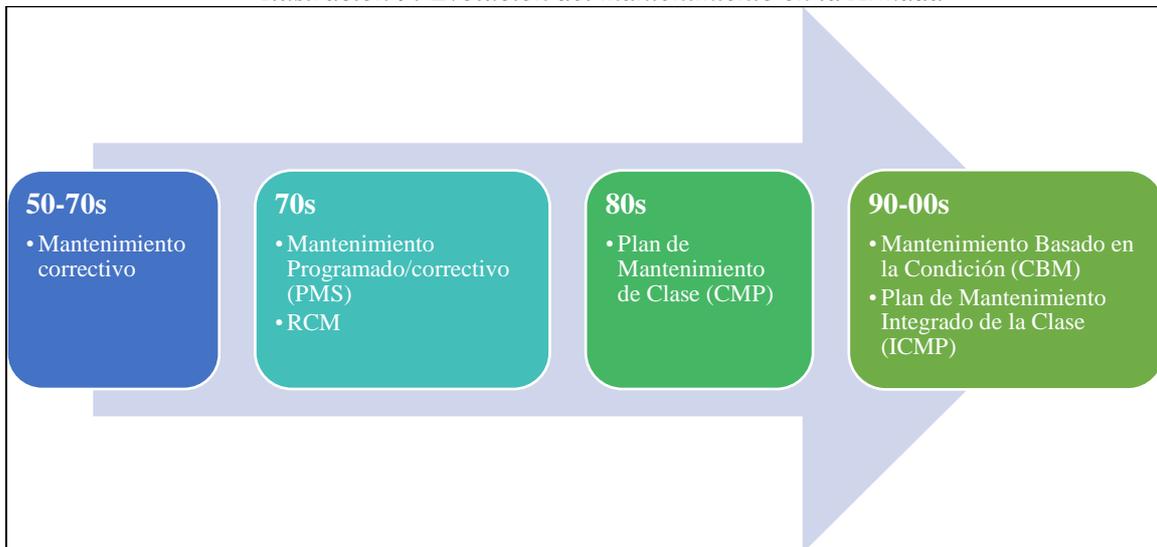
sistemas a analizar, de forma que al recibir los datos de los buques se les sometía a la ejecución de los scripts⁹ correspondientes, reduciendo la intervención humana en el estudio final de la detección de anomalías; con esto se suprimía el error humano en el análisis inicial y se podían clasificar y priorizar los fallos detectados con un considerable ahorro de esfuerzo y horas de trabajo (CN RES Díaz del Río J. , 2021).

La implementación del MP con técnicas de IA en los motores principales, generadores eléctricos y motores auxiliares de los buques de la Armada ha requerido la contratación encadenada e incrementalmente complejos proyectos desde el año 2010-2011 con diferentes empresas nacionales al ritmo de los recursos económicos y tecnologías disponibles, implementación que actualmente está en despliegue y en aquellos buques que disponen un control de plataforma automatizado denominado Sistema Integrado de Control de la propulsión (SICP). Por lo anterior, se creó el Centro de Supervisión y Análisis de Datos de la Armada (CESADAR), instalaciones ubicadas en Cartagena (Murcia) en el año 2010 y no fue hasta el 2017 cuando inició su embarque en las tecnologías 4.0 (Carrasco, 2017).

Sin lugar a duda la Armada ha dado un salto tecnológico importante para implementar un mantenimiento eficiente de los sistemas con el objetivo del “óptimo beneficio-coste” que abarca desde tradicional sistema del PMS implementado en el año 1981, posteriormente añadiendo el ICMP, basado en la metodología RCM-CBM (ver ilustración 9) y finalmente la metodología RCM-FMCA-IA.

⁹ Líneas de código de programación, normalmente sencillo, que contiene comandos u órdenes que se van ejecutando de manera secuencial.

Ilustración 9: Evolución del mantenimiento en la Armada



Fuente: Elaboración propia

El plan de implementación del MP con técnicas IA de la Armada contempla su finalización en 15 buques al final del año 2024. Paralelamente, los procedimientos y **procesos de trabajo**¹⁰ de mantenimiento están orientados a la metodología programada o planeada y la basada en la condición, excluyendo el MP; es por ello necesario una actualización del proceso actual para un óptimo beneficio-coste.

En el año 2010, el Centro de Supervisión y Análisis de Datos de la Armada (CESADAR), pionero en su misión, comenzó a desarrollar un proyecto (entonces en fase primigenia) para la detección de fallos mediante el análisis de las señales procedentes del Sistema Integrado de Control de Plataforma (SICP) principalmente de vibraciones de motores y análisis de termografías.

El AN INA Lamas (2021) señala que “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 desarrollado por la empresa NAVANTIA en 2008 (CESADAR v1). Esto impedía cualquier automatización de análisis, así como la aplicación

¹⁰ Conjunto de actividades iterativas, secuenciales y sistemáticas, relacionadas entre sí y sometidas a control, que transforman una entrada (input) en un producto o resultado (output), añadiendo valor (publicación gestión por procesos de la Armada).

de modelos de computación sobre los datos y se dependía enormemente de las personas que los analizaban y de su conocimiento experto”.

En los buques de la Armada, una parte de la metodología CBM se denomina en castellano “Sistema de Mantenimiento Basado en la Condición” (SMBC¹¹) y engloba, entre otros como el análisis de señales de vibraciones, termografías, etc, procedentes del SICP, el mantenimiento que precisa de análisis en laboratorios del Instituto Nacional Técnica Aeroespacial (INTA), como la comprobación del estado de aceites a través del programa PAESA, que es un programa del INTA que data del año 1969 y su ámbito de aplicación se centraba en el control de la evolución del desgaste de los motores de aviación militares y con el tiempo ha ido ampliando su utilización a otros tipos de sistemas mecánicos lubricados como un servicio a la industria, Armada Española y Organismos Oficiales; actualmente integrado en el CESADAR desde el año 2018-2019 (AN INA Lamas, 2021) .

Para la automatización de dicho análisis, en agosto 2018 se anunció la formalización del contrato por parte de la Subdirección General de Adquisiciones de Armamento y Material (DGAM) con objeto de la utilización de redes neuronales como método para el mantenimiento basado en la condición en los buques de la Armada (SOPRENE), contrato adjudicado a la empresa INDRA SISTEMAS, S.A.¹² por un valor de 535.537,19 euros. Actualmente, SOPRENE ha alcanzado un TRL (Technology Readiness Level) o grado de madurez tecnológico de nivel 7 - prototipo en un entorno real (Ibáñez de Aldecoa, 2014).

En el año 2020, “DigitalLabs” perteneciente a la empresa “INDRA, IA” junto a investigadores de la Universidad de A Coruña y del CESADAR, realizaron una investigación en el marco del proyecto SOPRENE con varias técnicas de IA en un motor de combustión de un buque de la Armada. Aunque se disponía de un histórico de datos de cuatro años obtenidos de los diferentes sensores de los motores de cuatro buques, los datos registrados presentaban una calidad heterogénea debido a fallos en los sensores o problemas en las comunicaciones debido

¹¹ El Sistema SMBC es un sistema de monitorización “on line” de la condición operativa de máquinas rotativas.

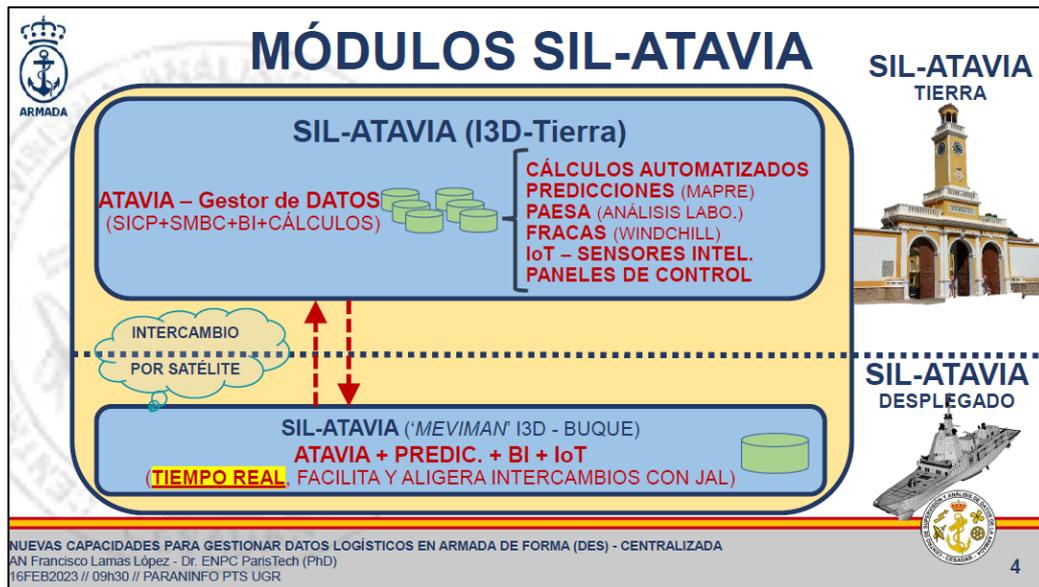
¹² [Anuncio 58872 del BOE núm. 301 de 2018](#)

a las diferentes frecuencias de muestreo, además que la ingente cantidad de datos hacía inviable la carga, procesamiento, normalización y preparación de la totalidad de éstos; para suplir el problema se utilizó un FMCA teórico y se obtuvieron distintas soluciones parciales que conformaron la solución final supeditada a una evaluación mayormente cualitativa por los expertos, concluyendo que “La solución desarrollada permite predecir la aparición de los diferentes modos de fallo descritos en el FMECA del motor de combustión de un buque...El sistema es altamente configurable y su uso se puede extrapolar a otros buques que presenten características similares” (Sanz y otros, 2020). La tabla del anexo II muestra el FMECA de un motor generador de una fragata F-100, indicando la correspondencia de bloques identificados en la ilustración 7 del apartado 2.3 (Arias & Minguela, 2018).

De forma paralela se necesitaba una herramienta que estructurase los datos de una forma fácilmente legible por terceros programas y desde septiembre de 2021, la Jefatura de Apoyo Logístico de la Armada, a través de un Acuerdo Marco con la empresa NAVANTIA, formalizó el servicio de Mantenimiento del Sistema ATAVIA (Automatización de Tareas de Vigilancia y Análisis)¹³ con un valor de oferta de 495.867,77 euros. ATAVIA es una aplicación integradora de soluciones de mantenimiento, accesible desde la I3D/WAN-PG (Infraestructura Integral de Información para la Defensa/Red de Propósito General) y que forma parte de la plataforma SIL (Sistema de Información Logístico), plataforma que centraliza todos los sistemas relacionados con la logística de la Armada hasta entonces independientes. El sistema ATAVIA realiza tareas de análisis basadas en reglas expertas mediante “scripts” desarrollados en tierra. La ilustración 10 muestra el esquema de módulos que integran el SIL donde se pueden observar dos grandes bloques: SIL en tierra y SIL desplegado.

¹³ [Anuncio 37515 del BOE núm. 214 de 2021](#)

Ilustración 10: Módulos del SIL



Fuente: (AN INA Lamas, 2023)

Hasta ahora, los buques enviaban los datos obtenidos del SICP en la mar o en puerto de forma periódica a CESADAR-Central o periféricos¹⁴ por vía telemática o mediante un dispositivo de almacenamiento externo para ser formateados/filtrados y analizados con técnicas de IA en CESADAR-Central con los sistemas ATAVIA y SOPRENE respectivamente. Para facilitar el envío de dichos datos “online” se instalaron a bordo de los buques el sistema “CESADAR on Board” (COB) y según Lamas (2021), con el fin de dotar a los buques de dicha autonomía mediante un COB, se desarrolló en 2021 el proyecto de Módulo Embarcado de Vigilancia y Mantenimiento (MEVIMAN)¹⁵ con un valor de oferta de 124.961,55 euros, contrato anunciado por la Jefatura de Apoyo Logístico (JAL) de la Armada y adjudicado a la empresa NAVANTIA, con objeto de facilitar a los mantenedores el acceso de los datos formateados/filtrados mediante la ejecución en tiempo real a bordo de los buques de los “scripts” desarrollados en tierra para la mejor visualización e interpretación en un terminal de usuario final (back-end) con una pantalla o “interface” similar al sistema ATAVIA instalado en el servidor del CESADAR-Central.

¹⁴ El CESADAR-Central está en Cartagena y los periféricos en Arsenales de Ferrol, Rota, Las Palmas y en la JAL.

¹⁵ [Anuncio 6081 del BOE núm. 35 de 2021](#)

Para dotar de cierta capacidad de análisis de datos con IA mediante técnicas de ML “(Machine Learning) similares al sistema SOPRENE, éste y sus algoritmos de predicción deben de ser embarcados, actualizando y ejecutando a bordo, en tiempo real, los datos generados por la plataforma. Esto aumentaría la precisión en las diagnosis realizadas del sistema, su fiabilidad y también la autonomía del sistema. Ello requiere su “miniaturización” para poder ejecutarse a bordo de buques con menor capacidad de computación, siguiendo la tendencia del “Computing on the edge”, o Computación distribuida (paradigma informático distribuido que acerca la computación y el almacenamiento/procesado de datos a la ubicación donde se necesita para mejorar los tiempos de respuesta y ahorrar ancho de banda). En el marco de la nueva necesidad, se formalizó otro contrato con la DGAM sobre el servicio denominado MAPRE (**MA**ntenimiento **PRE**dictivo): Sistema MP embarcado sobre activos y plataforma naval y diseño de sensores inteligentes instalables a bordo para el CESADAR¹⁶ con un valor de oferta de 515.000,00. El contratista adjudicatario del programa es la UTE-MAPRE (pilotada por NAVANTIA, junto a HI Iberia y Grupo Álava Ingenieros). El objetivo principal de MAPRE en la “modificación del demostrador actual en tierra SOPRENE para obtener un «predicador en tierra» (PET) y un predicador a bordo (PAB) para computar grandes volúmenes de datos y predecir anomalías de activos en distintos horizontes temporales (ligadas a modos de fallo) en sistemas (o equipos de estos) a bordo de buques de la Flota” (AN INA Lamas, 2022); el concepto inicial es el entrenamiento en tierra y ejecución a bordo. Actualmente, según Lamas (2022) el TRL de MAPRE está en vías de obtener el nivel 8 - sistema completo y certificado a través de pruebas y demostraciones - y se espera alcanzar el nivel 9 - sistema probado con éxito en entorno real - (Ibáñez de Aldecoa, 2014) a finales de 2023.

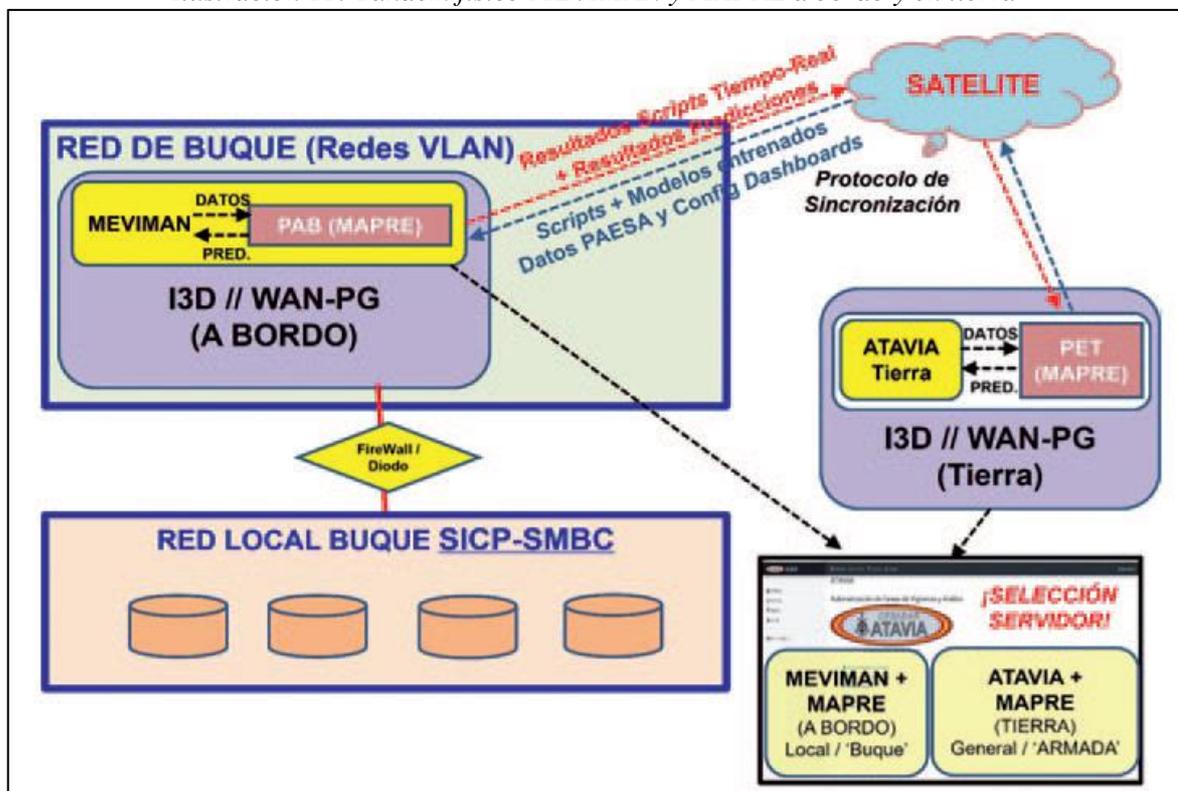
Los sensores inteligentes instalables a bordo para el sistema MEVIMAN fueron incluidos en el contrato MAPRE mediante la obtención de 8 prototipos, ampliables por nuevo contrato a 40 buques tras la finalización del proyecto para el “monitoreo de activos embarcados para medir aspectos no contemplados en diseño o concepción del sistema que puedan ser interesantes en un momento dado según condicionantes de uso de un activo” (AN INA Lamas,

¹⁶ [Anuncio 51750 del BOE núm. 306 de 2021](#)

2022). La filosofía del sensor inteligente es disponer de un IoT desplegado y conectado al sistema MEVIMAN.

La ilustración 11 muestra la configuración a bordo, MEVIMAN y MAPRE comparten hardware, 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.

Ilustración 11: Tándem físico MEVIMAN y MAPRE a bordo y en tierra



Fuente: (AN INA Lamas, 2022)

Relativo a la seguridad en las comunicaciones desde los buques al CESADAR, se cumplen una serie de requisitos para garantizar la confidencialidad, integridad y disponibilidad de los datos clasificados mediante mecanismos de seguridad de acceso al sistema, de comunicación en un solo sentido, instalación de “firewalls”, cifrado y encendido/desconexión automática del sistema en el período de realizar la transmisión de datos. Con la implementación del GD, la ciberseguridad será un reto. “Se utilizará como referencia la norma CCN-STIC-220 de Arquitecturas Virtuales, desarrollada en julio de 2020 por el Centro Criptológico Nacional

(CCN), que recoge las medidas de seguridad que se deben aplicar a los sistemas de esta naturaleza” (AN INA García & Santos, 2023).

El próximo paso, según Lamas (2022), será con perspectiva de la utilización de modelos híbridos cuando concluya el proyecto MAPRE para sumar las capacidades de ATAVIA y de predicción con IA del PET-PAB de MAPRE (reglas expertas junto a los modelos basados en IA) y servirá para minimizar los falsos positivos y las incertidumbres de predicción, maximizar la confianza en el sistema y avanzar en el estado del arte del sistema. En este aspecto, el CESADAR se encuentra trabajando en el desarrollo conceptual del Módulo de Automatización del Sosténimiento Inteligente de la Armada (MASTIA) para automatizar la preparación y alistamiento logístico de un buque previo a una misión o despliegue. Sin tener en cuenta la licitación pendiente del sistema MASTIA y las inversiones realizadas desde el año 2010 en el CESADAR, se puede concretar que desde el año 2018 se han invertido 1.671.366,51 euros en la implementación del MP en la Armada.

Existen por tanto dos modalidades de automatización del MP en los buques de la Armada, el basado en reglas expertas (ATAVIA) y el basado en ML (SOPRENE-MAPRE) que según lamas (2023) tienen las siguientes ventajas e inconvenientes:

- Basado en reglas.
 - Ventaja: Sistema transparente que permite explicar su proceso de razonamiento.
 - Desventajas: No se pueden resolver algunas tareas y no aprenden de la experiencia.
- Basado en ML o aprendizaje automático.
 - Ventajas: No necesitan conocimiento experto para resolver tareas y es adaptativo.
 - Inconvenientes: Sistema opaco.

Otra línea futura de desarrollo tecnológico relacionadas con la Industria 4.0 es el Arsenal Inteligente, aprobado en enero de 2023 por el AJAL en su documento “Visión del Arsenal Inteligente” introduce las siglas HI3E¹⁷ y desarrolla el CONLOG del AJEMA del 2017 que

¹⁷ HI3E: H (Hibridación del mundo físico y virtual), I (Inteligente), 3E (Eficacia operativa, Eficiencia económica y Eficiencia medioambiental).

ya estableció un nuevo modelo por el que se asentaban los principios y criterios que orientan todas las actividades del apoyo logístico (AJAL, 2023). A este documento se le suman otros que muestran el esfuerzo innovador de la Armada, como son la Visión del Gemelo Digital o el Concepto de Transformación Digital (CN Fernández, 2023), involucrando al CESADAR y la plataforma ATAVIA dentro de las líneas de desarrollo:

“quizá la más significativa es la denominada evolución a una verdadera logística predictiva, prescriptiva y automatizada, por la que se promueve un decidido impulso del concepto de apoyo al ciclo de vida. Para ello, el documento propone la completa y automatizada coordinación de las acciones de mantenimiento con las de aprovisionamiento, a la vez que la ingeniería de ciclo de vida apoya a las anteriores y se adelanta a las obsolescencias, previendo así las actualizaciones de las capacidades de buques, aeronaves, medios de Infantería de Marina e instalaciones”. (CN Fernández, 2023)

La visión del Arsenal Inteligente del AJAL introduce el concepto de “mantenimiento prescriptivo” que se define como una extensión al MP con base en los análisis de los datos históricos y los datos entrantes en tiempo real con el cual, un sistema predice las medidas de mantenimiento requeridas y prescribe un curso de acción (AJAL, 2023, pág. 12). El mantenimiento prescriptivo significa pasar del mantenimiento preventivo planificado a la planificación de mantenimiento proactivo e inteligente (Kurt y otros, 2017); su estudio está fuera del alcance de este trabajo.

El futuro GD de las fragatas tipo F-110 estarán integradas en el CESADAR:

“La componente terrestre se basará en un centro de situación (CESADAR) que reciba datos en tiempo real proporcionados por sensores del buque que se analicen en base a técnicas de BD, de forma que se puedan implementar esquemas de detección de fallos y acciones de mantenimiento que optimicen el coste de ciclo de vida”. (GB INA Martínez & CN INA González, 2018)

En el año 2014 se firmó el documento de Requisitos de Estado Mayor (REM), donde no se contemplaba el desarrollo de la MD o GD; no fue hasta posteriormente, con el desarrollo del concepto de apoyo logístico 4.0 del AJEMA de 2017 cuando se materializó el concepto de apoyo logístico de la F-110; según este concepto, aparece la MD como elemento base para la

producción, el apoyo al ciclo de vida e, incluso, para la instrucción y adiestramiento de operadores y mantenedores y potenciando el mantenimiento RCM a través del CESADAR y, otras aplicaciones, para evolucionar hacia un concepto más amplio que permita una gestión integral del apoyo logístico (GB INA Martínez & CN INA González, 2018).

2.5 Gestión por procesos

El sistema de **MP no está contemplado en los planes de mantenimiento actuales de la Armada**, materializados mediante PT orientados al mantenimiento programado, correctivo e incidental. Los PT se pusieron en marcha mediante una Directiva del Almirante Jefe del Estado Mayor de la Armada (AJEMA) en el año 2005, comenzaron a implementarse en el año 2009 y se definen como “un método de trabajo que consiste en definir la Organización como un conjunto interrelacionado de procesos y que espera lograr la mejora constante a partir de datos objetivos proporcionados por los indicadores de rendimiento” (CF CGA Escrigas, 2011). La ilustración 12 muestra un cuadro por grupos de objetivos y sus Procesos Fundamentales (PF) asociados sobre la preparación de la actividad de la Flota, de la administración de recurso de personal, de material y financiero.

La GpP tiene como objetivo “ordenar, controlar y mejorar el trabajo repetitivo y habitual de una organización, y lo hace mediante tres pilares fundamentales” (CF CGA Escrigas, 2011), que en resumen son:

- Sistematizar y normalizar la documentación del trabajo.
- La medición de los resultados obtenidos por medio de un sistema de medición por indicadores.
- El análisis de resultados y aplicación de la mejora continua en las fases de planeamiento, ejecución, verificación y optimización.

Ilustración 12: Planeamiento de la Armada. Procesos de trabajo



Fuente: (CF CGA Escrigas, 2011)

Los objetivos del AJEMA se transforman en Capacidades Militares, cada una de ellas asociadas a los PF respectivos a cada Mando Orgánico en los ámbitos de la Flota, de Personal, de la Logística y de la Financiera:

“Para materializar los objetivos del AJEMA en Capacidades Militares listas para cumplir las misiones específicas en tiempo de paz o para ser entregadas a los mandos operativos para ejecutar las misiones que se le asignen, se ejecutan los Procesos Fundamentales PF-3 Planeamiento de la Preparación y Actividad Anual de la Flota y PF-6, **PF-7** y PF-8 Planeamiento de la Administración del Recurso de Personal, **de Material** y Financiero, respectivamente. Cada uno de estos procesos tiene como producto principal un Plan por medio del cual la Autoridad correspondiente convierte los Objetivos del AJEMA en prioridades y objetivos subordinados, que orientan la obtención de Capacidades Militares a través de los Procesos Clave y de Apoyo”. (CF CGA Escrigas, 2011)

La automatización de procesos en la Armada se realiza a través de la herramienta denominada Sistema de Tramitación Electrónica (SISTRAM), actualmente automatizados parcialmente, entendiéndose automatización por lo que “permite que todas las tareas, datos y documentos que antes figuraban meramente en un papel, fluyan instantáneamente entre los distintos usuarios que participan en el proceso con independencia de su ubicación física y disponibilidad” (CF CGA Escrigas, 2011). Por parte de la Armada, una preocupación importante desde hace diez años ha sido la modernización de las herramientas actuales de la GpP y la evolución del actual mapa de Procesos Fundamentales (PF) y sus derivados PT mediante la celebración de Jornadas de Transformación Digital y GpP en la Escuela de Guerra Naval (EGN) con la asistencia de conferenciantes y asistentes de diferentes ámbitos militares, civiles y empresariales (Armada, 2020). No fue hasta el 17 de septiembre de 2021 cuando se publicó en la Plataforma de Contratación del Sector Público el anuncio de licitación para la adquisición e implementación de la plataforma de Armonización para la Gestión de la Organización (ARGO) con cargo al Mecanismo de Recuperación y Resiliencia mediante fondos procedentes de la Unión Europea. Diseñado por el CESTIC, ARGO da respuesta al artículo 3 del Real Decreto 521/2020, de 19 de mayo, por el que se establece la organización básica de las Fuerzas Armadas, que señala que: “La organización se basará en la **gestión por procesos** como modelo principal a emplear para el desarrollo de la actividad, tanto de carácter específico como conjunto, en el marco del proceso de transformación digital del Ministerio de Defensa” (CESTIC, 2021). La formalización del contrato se realizó el 21 de diciembre de 2020 a favor de la empresa TELEFONICA SOLUCIONES DE INFORMÁTICA Y COMUNICACIONES DE ESPAÑA SA que se compone en (Unión Temporal de Empresas) UTE con TAISA SYVALU¹⁸ con un presupuesto base de licitación de 20.912.728,81 millones de euros. La licitación de la plataforma se ha estructurado en dos Lotes que incluyen:

- Lote 1: Suministro, configuración y puesta en servicio de la plataforma hardware y software de infraestructura.
- Lote 2: Suministro, configuración y puesta en servicio de soluciones software.

¹⁸ [Anuncio de adjudicación \(contrataciondelestado.es\)](https://www.contrataciondelestado.es)

Está previsto adquirir en el segundo Lote un potente motor de procesos, un módulo de Gestión de Datos y un Módulo de “Business Analytics”¹⁹. “ARGO se ha diseñado previendo la incorporación de IA y herramientas avanzadas de gestión de datos, que entrarán en operación una vez que el volumen de estos y la madurez digital del Departamento lo permitan” (CESTIC, 2021). Paralelamente, la empresa ISDEFE inició un proyecto para apoyar la definición y modelización de los procesos logísticos de la JAL de la Armada, orientado a suministrar información de entrada al proyecto ARGO (ISDEFE, 2021). En este sentido, deberán integrarse todos los PT de la Armada el resto de Los ejércitos en ARGO buscando mantener el correcto funcionamiento de los sistemas y capacidades en el ámbito de la Transformación Digital (CESTIC, 2021).

3 METODOLOGÍA

Realizada la revisión de la literatura, se realizará el trabajo de campo con la recogida de datos principales, se asociará la documentación obtenida con las técnicas de análisis DAFO en el caso del MP y de “Cadena de Valor de Porter” en el caso de la GpP; se analizará una encuesta para complementar la técnica DAFO.

Teniendo en cuenta el objetivo principal sobre el MP y el específico sobre PT en este trabajo, se considerará adecuado aplicar los siguientes métodos:

- Explicativo: se expondrá el origen, motivo y situación del MP, del GD y la necesidad de actualizar los PT actuales.
- Exploratorio: consistirá en buscar información sobre la importancia de la gestión del mantenimiento para la reducción de costes en el ciclo de vida de un activo, la implantación del MP con técnicas de IA en plataformas navales para explorar una situación sobre la que no existe un marco teórico bien definido o una aproximación en otros sectores de la industria.

¹⁹ Business Analytics o su acepción en español, Analítica Empresarial, consiste en llevar a cabo una serie de soluciones empresariales para satisfacer las necesidades de un negocio, lograr metas y alcanzar objetivos.

- Descriptivo: se describirán las fases de las revoluciones industriales, los conceptos de GD y Apolo Logístico, los métodos de mantenimiento basado en la fiabilidad y en la condición de los sistemas y el sistema de PT que han de actualizarse.

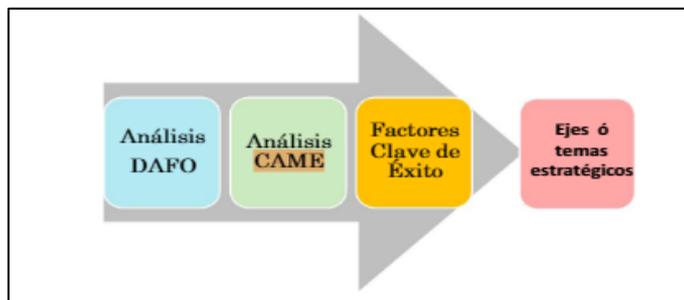
Las fuentes, técnicas e instrumentos utilizados en este trabajo son:

- Recopilación información: extracción de información de fuentes abiertas (libros, revistas, artículos de prensa y documentos de internet) y de fuentes oficiales (Instrucciones del MINISDEF).
- Observación directa, visitas y entrevistas.

3.1 Metodología DAFO

El conocimiento de nuestro entorno o la situación real de la organización en cuanto a la ejecución de un nuevo proyecto como es la implementación del MP con técnicas de IA en los sistemas de propulsión y motores auxiliares en los buques de la Armada actuales y en las futuras fragatas F-110 con GD, es de vital importancia para definir el análisis estratégico. En este sentido se utilizarán tres técnicas para la obtención de información necesaria para la selección priorizada de la actualización de los procesos y procedimientos actuales y las líneas de acción que se deberían llevar a cabo. La ilustración 13 muestra las tres técnicas que se utilizarán en el análisis; otros autores las denominan estrategias o herramientas (Sánchez, 2020).

Ilustración 13: Técnicas de obtención de información para selección de alternativas, estrategias y líneas de acción.



Fuente: (Jabaloyes y otros, 2020, pág. 72)

El análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades, Amenazas), más conocido por análisis DAFO o del inglés SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) “consiste

en resumir en una tabla resumen, la evaluación de los puntos fuertes y débiles internos del Centro (competencia o capacidad para generar y sostener sus ventajas competitivas) con las amenazas y oportunidades externas, pues la Estrategia debe lograr el encaje entre sus capacidades internas y su posición competitiva externa” (Universidad de Cantabria, 2014). La ilustración 14 muestra el gráfico de un DAFO.

Ilustración 14: Análisis DAFO



Fuente: (Jabaloyes y otros, 2020)

El análisis DAFO se debe confrontar mediante una “Matriz de confrontación” donde se cuantifica cada factor en una tabla con todas las variables a estudiar; la matriz de confrontación nos permite vincular las amenazas y oportunidades con las debilidades y fortalezas, según las relaciones que haya entre ellas (Universidad de Cantabria, 2014). Algunos autores denominan a la matriz de confrontación como una “Matriz DAFO” (Díaz & Matamoros, 2011) o viceversa, a la matriz DAFO la identifican como “Análisis DAFO” (Johnson y otros, 2006).

Sánchez (2020) determina que la confrontación de las variables internas (variables controlables) y las externas (variables no controlables) debe responder a las siguientes preguntas:

- Fortalezas contra oportunidades: ¿Nos permitirían las fortalezas aprovechar las oportunidades que provee el entorno?

- Debilidades contra amenazas: ¿Nos impedirían las debilidades hacer frente con garantías a las amenazas existentes o futuras?
- Fortalezas contra amenazas: ¿Nos permitirían las fortalezas hacer frente a las amenazas que se ciñen sobre la organización?
- Debilidades contra oportunidades: ¿Nos impedirían las debilidades aprovecharnos de las oportunidades que se presentan?

El siguiente paso tras la confrontación de la matriz DAFO es aplicar la técnica CAME (Corregir, Afrontar, mantener, Explotar) como muestra la ilustración 15. “Lo que dice el análisis CAME es que las debilidades hay que corregirlas (C), las amenazas hay que afrontarlas (A), las fortalezas hay que mantenerlas (M) y las oportunidades hay que explotirlas (E)” (Sánchez, 2020).

Ilustración 15: Análisis CAME



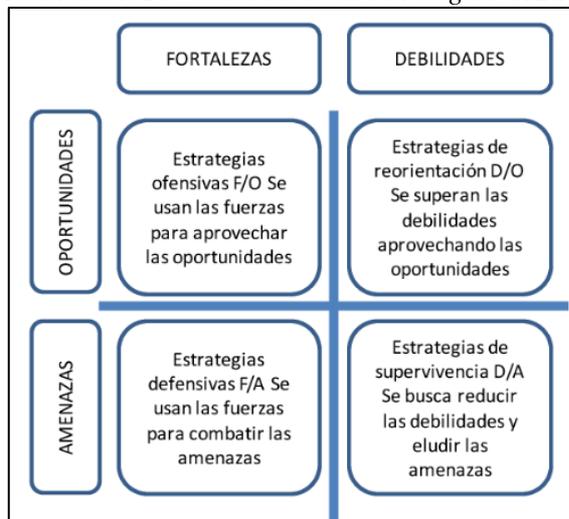
Fuente: (Sánchez, 2020)

El análisis CAME por cuadrantes (ver ilustración 16) orientará a la organización en el tipo de estrategia a seguir (Sánchez, 2020):

- Estrategia defensiva (cuadrante F-A): evitar que empeore la situación actual.
- Estrategia ofensiva (cuadrante F-O): busca mejorar la situación actual.
- Estrategia de reorientación (cuadrante D-O): busca transformar la situación haciendo cambios que eliminen o mitiguen las debilidades y creen nuevas fortalezas.

- Estrategia de supervivencia (cuadrante D-A): busca eliminar los aspectos negativos que nos perjudican.

Ilustración 16: Cuadrantes de estrategias CAME



Fuente: (Jabaloyes y otros, 2020)

Los Factores Críticos de Éxito (FCE)²⁰ es la tercera técnica que nos permitiría identificar las líneas de acción o estrategias que debe poner en marcha la organización. Para priorizarlas, se utiliza el análisis DAFO/CAME y se valora el impacto de las relaciones de los factores internos y externos de la matriz confrontada. La valoración, puede ser, por ejemplo, de 10 para relación alta, 5 para relación media, 1 para baja relación y 0 cuando no afecta en respuesta a las siguientes preguntas (Universidad de Cantabria, 2014):

- Si acentúo la fortaleza, ¿puedo aprovechar mejor la oportunidad? ¿En qué medida?
- Si supero la debilidad, ¿puedo aprovechar mejor la oportunidad? ¿En qué medida?
- Si acentúo la fortaleza, ¿estoy minimizando la amenaza? ¿En qué medida?
- Si supero la debilidad, ¿minimizo la amenaza? ¿En qué medida?

²⁰ Aquellos factores internos a la Organización o de su entorno esenciales para el funcionamiento de la Organización y el cumplimiento de sus objetivos. (De un proceso): Aspectos esenciales para el éxito del proceso, teniendo en cuenta el fin global del mismo, su relación con la estructura de la organización y la percepción de los destinatarios del proceso.

Posteriormente se suman los resultados totales y se obtiene información priorizada de las FCE, o sea, cuáles son los factores para tener en cuenta más importantes y qué estrategias debe realizar la Armada para potenciar unos y evitar otros.

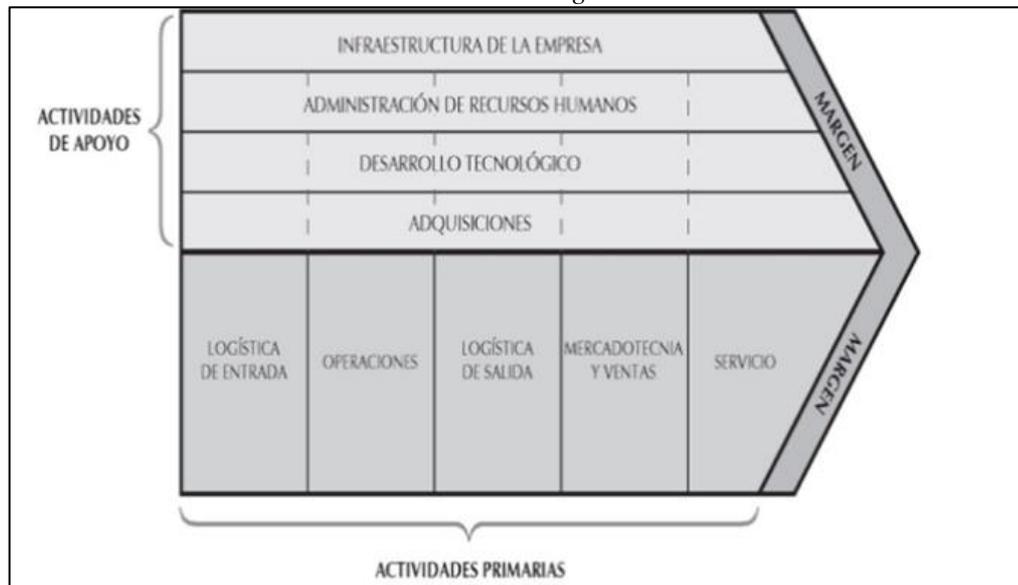
3.1 Metodología de la Cadena de Valor

La “cadena de valor” es un concepto que lo popularizó Porter (2015) al final de los años 80 como herramienta de pensamiento estratégico para obtener ventajas competitivas en sectores industriales y de la competencia. También se le atribuye la introducción del análisis del costo estratégico, con la “comparación de la forma en la que los costos por unidad de una compañía se pueden comparar con los costos por unidad de los competidores claves, actividad por actividad, señalando así cuales son las actividades clave con el origen de una ventaja o desventaja de costo” (Quintero & Sánchez, 2006). La cadena de valor muestra el conjunto de actividades y funciones entrelazadas que se realizan internamente y está constituida por tres elementos básicos según Quintero & Sánchez (2006):

- Las actividades primarias, donde se desarrolla el producto, su producción, las de logística y comercialización y los servicios de postventa.
- Las actividades de soporte o apoyo (a las actividades primarias), donde se administran los recursos humanos, compras, desarrollo tecnológico (automatización, desarrollo de procesos e ingeniería, investigación...), las de infraestructura (finanzas, contabilidad, asesoría...).
- El margen, que es la diferencia entre el valor y los costos incurridos.

Según Porter (2015), el valor se mide por los ingresos totales, reflejo del precio que se cobra por el producto que logra vender, siendo rentable si su valor supera los costes de fabricación de su producto; la organización debe fijarse en el valor y no en el costo para analizar su posición competitiva; la cadena de valor contribuye a identificar las fuentes de la ventaja competitiva. Las actividades de primarias que aparecen en la ilustración 18 son las que intervienen en la creación física del producto, en su venta y transferencia al cliente y la asistencia posterior (sostenimiento). Las actividades de soporte o apoyo respaldan a las primeras y viceversa. Las líneas de puntos indican la posibilidad de asociar actividades de apoyo a ciertas actividades primarias excepto la infraestructura que solo aporta soporte.

Ilustración 17: La cadena genérica de valor



Fuente: (Porter, 2015, pág. 111)

El análisis con la técnica de la cadena de valor es una literatura muy extendida en la Industria 4.0, ahora expandida como red de valor; está enfocada al entorno mercantil refiriéndose al valor en términos económicos que se mueven por motivos distintos a la Defensa Nacional, y su valor en la construcción naval es distinto al de los demás sectores económicos. Por ello, más allá del valor, hay que considerarlo como intrínseco a los objetivos de la Defensa Nacional y de la obtención de capacidades militares (la integración horizontal más allá de la cadena de valor económico) por nuestra particular relación con el principal astillero de construcción naval del que disponemos con funciones de diseñador, constructor y sostenedor; en esta cadena de valor se establece el concepto de integración horizontal para hacer posible intercambio masivo de datos durante todo el ciclo de vida de los productos, impuesto por naturaleza en la Industria 4.0 (Recamán, 2018). Recamán (2018) cita la integración horizontal para hacer masivo el intercambio de datos fabricante-cliente, pero en el contexto citado debe referirse a las relaciones horizontales de la estructura orgánica de la organización aludiendo a que se “...comparte abiertamente información relevante y, en la medida de lo posible...” (Arias & Minguela, 2018, pág. 59) o ser un error y referirse al concepto de “logística integral” desde el punto de vista externo (Miranda y otros, 2004, pág. 584) también denominado por otros autores como “integración externa” referidos a los niveles de integración de la cadena de suministro. Apreciar que la relación comercial de la Armada y NAVANTIA para la obtención de material según Recamán (2018) es extensible para el resto del tejido industrial

nacional como cita DGAM (2020) sobre los principales desafíos y retos tecnológicos de la Defensa y la orientación al apoyo de la BTI; se denomine la integración ARMADA-BTI externa o horizontal se podría concluir que es indistinto según el autor y de acuerdo al concepto de Industria 4.0 o Astillero 4.0 (NAVANTIA) se añadiría a dicha relación, la integración vertical e integral durante todo el ciclo de vida (GB INA Martínez & CN INA González, 2018).

La ventaja competitiva con el análisis de la cadena de valor en este caso de uso se centrará en la “diferenciación del producto” definida por Porter (2015) cuando una empresa se diferencia de sus rivales cuando ofrece algo especial que los compradores aprecian y justifica un precio alto o igual al de la competencia añadiendo que tiene un coste caro (como demuestran las inversiones realizadas en los sistemas GD, SIL, ATAVIA, SOPRENE, MAPRE, MASTIA, IoT...) y considerando la diferenciación como una estrategia. No se trata de convertir a la Armada en una organización mercantil, sino de elemento catalizador para aprovechar la oportunidad de la implementación del MP en plataformas navales como un “producto exportable” y “escalable” al sector marítimo/naval nacional e internacional en la necesidad de dinamización y recuperación de la BTI, “teniendo en cuenta que la industria de Defensa es un sector estratégico” (Dirección General de Armamento y Material, 2020).

El criterio para identificar las actividades del negocio es (Quintero & Sánchez, 2006, pág. 381):

- Cada actividad tenga distinto fundamento económico.
- Cada actividad tenga un fuerte impacto potencial en la diferencia.
- Cada actividad representa una parte significativa a la proporción creciente del monto total.

4 ANÁLISIS

4.1 Análisis DAFO del mantenimiento predictivo

La entrevista realizada Capitán de Fragata D. Alejandro Cervantes Roca (Jefe del CESADAR) que se puede ver en el anexo I, complementará el análisis DAFO sobre la implementación del

MP en la Armada. En dicho análisis DAFO, antes de realizar la matriz de confrontación, análisis CAME y extracción de las FCE, se matizan los comentarios siguientes según las respuestas a las preguntas formuladas:

- A la pregunta número 1 sobre “¿Qué barreras considera que pueden impedir o limitar el desarrollo y explotación del sistema de forma eficaz?” responde a los tres aspectos siguientes: organizativo, de formación y presupuestario. Los dos primeros (de naturaleza interna) y el último (de naturaleza externa); el organizativo y el de formación pueden considerarse como una debilidad (D). El último aspecto, el presupuestario, se entiende que no es preciso considerarlo amenaza (A) debido a la reciente consideración del MP como concepto de nivel estratégico y por tanto sujeto a mayor estabilidad presupuestaria (Centro Conjunto de Desarrollo de Conceptos, 2022) y se puede considerar como oportunidad (O) de “Carácter estratégico”.
- A la pregunta 2 sobre “¿Tiene conocimiento de la implantación del mantenimiento predictivo con técnicas de ML o similar en plataformas navales de terceros países?, la respuesta es “Hasta dónde conozco, en el ámbito militar europeo somos pioneros en la implantación de estas técnicas”; la respuesta en sí es una oportunidad (O) que puede ser incluida como “Producto exportable”.
- A la pregunta 3 sobre “¿Qué factores positivos y favorables considera que pueden ser aprovechados para mejorar la ventaja tecnológica o competitiva?”, la respuesta es “Favorecer el trabajo de manera coordinada con universidades e industria en el desarrollo de nuevos modelos de IA y tecnologías habilitantes para la transformación digital”. Con esto, se podría añadir la colaboración con centros de investigación de otras administraciones como oportunidad denominada “Colaboración/investigación con Universidades/administraciones”.

Con las citadas observaciones, se complementa el DAFO del MP (AN INA Lamas, 2023) y se desarrolla la matriz de confrontación que sería la que muestra la ilustración 17; los pesos de los diferentes factores para el análisis CAME y detección de los FCE han sido contrastados por un grupo de expertos del CESADAR.

Ilustración 18: Análisis DAFO/CAME implementación MP:

| MATRIZ DE CONFRONTACIÓN | | FACTORES EXTERNOS | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-----------------|--|------------------------------|---------------------|------------------------------|----------------------|----------------------------|---|----|---------------------------|--------------------------------|--|---|----|-------|----|
| | | (O) OPORTUNIDADES | | | | | | (A) AMENAZAS | | | | | | | | |
| | | Escalabilidad | Versatilidad/transversalidad | Producto exportable | Adaptación a otros Ejércitos | Carácter estratégico | Automatización de procesos | Colaboración/investigación con universidades/administraciones | M | Necesaria mejora continua | Soluciones de otras industrias | Potencial falta de interés en dar usos transversales | Potencial conflicto de interés con otras industrias | M | Total | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| FACTORES INTERNOS | (F) | Propiedad industrial MINISDEF | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 0 | 0 | 20 | 0 | 5 | 0 | 10 | 15 | 35 |
| | | Capacidad de modificar/adaptar | 1 | 10 | 10 | 5 | 5 | 10 | 5 | 46 | 0 | 10 | 0 | 0 | 10 | 56 |
| | | Escalabilidad de computación | 10 | 1 | 10 | 10 | 0 | 0 | 10 | 41 | 0 | 5 | 7 | 5 | 17 | 58 |
| | | Gestión conocimiento propia | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 5 | 0 | 15 | 5 | 0 | 5 | 0 | 10 | 25 |
| | | Sin costes de licencias | 0 | 1 | 5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 |
| | | Herramientas conocidas | 5 | 5 | 10 | 5 | 0 | 5 | 5 | 35 | 0 | 0 | 5 | 0 | 5 | 40 |
| | | Σ | 16 | 17 | 35 | 31 | 25 | 20 | 20 | 164 | 5 | 20 | 17 | 15 | 57 | |
| | (D) DEBILIDADES | Necesaria (formación) y adaptar experiencia usuario en función de necesidades de la Organización | 0 | 5 | 5 | 1 | 5 | 10 | 0 | 26 | 5 | 0 | 5 | 0 | 10 | 36 |
| | | Dependencia involucración todas las Unidades para completar funcionalidades | 5 | 10 | 0 | 1 | 10 | 10 | 0 | 36 | 0 | 5 | 10 | 0 | 15 | 51 |
| | | Gestión resolución de fallos propia | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 0 | 20 | 1 | 5 | 0 | 5 | 11 | 31 |
| Σ | | 5 | 15 | 5 | 2 | 25 | 30 | 0 | 82 | 6 | 10 | 15 | 5 | 36 | | |
| | Total | 21 | 32 | 40 | 33 | 50 | 50 | 20 | | 11 | 30 | 32 | 20 | | | |

Fuentes: DAFO (AN INA Lamas, 2023)/CAME elaboración propia

Las líneas de acción mediante análisis de la matriz DAFO son los siguientes FCE priorizados:

- Fortalezas.
 1. Escalabilidad de computación²¹.
 2. Capacidad de modificar/adaptar.
 3. Herramientas conocidas.
 4. Propiedad industrial MINISDEF.

²¹ Escalabilidad de computación: la palabra escalabilidad no existe en la RAE, es un anglicismo que describe la capacidad de un negocio o sistema de crecer en magnitud. El término adecuado de la RAE es “escalable”: que puede ser escalado. En el contexto de fortaleza, la escalabilidad de computación es la capacidad del sistema informático de cambiar su tamaño o configuración para adaptarse a las circunstancias cambiantes.

5. Gestión del conocimiento propia.
 6. Sin costes de licencias.
- Debilidades.
 1. Dependencia en la involucración de todas las Unidades²² para completar funcionalidades.
 2. Necesaria la formación y adaptar la experiencia del usuario en función de necesidades de la Organización.
 3. Gestión de resolución de fallos propia.
 - Oportunidades.
 1. Automatización de procesos.
 2. Carácter estratégico.
 3. Producto exportable.
 4. Adaptación a otros Ejércitos.
 5. Versatilidad/transversalidad (transversalidad en el contexto de oportunidad se refiere a que atañe a distintos ámbitos o disciplinas en lugar de a un problema concreto).
 6. Escalabilidad (escalabilidad en el contexto de oportunidad se refiere a un modelo de negocio con alto potencial de expansión).
 7. Colaboración/investigación con universidades/administraciones.
 - Amenazas.
 1. Potencial falta de interés en dar usos transversales.
 2. Soluciones de otras industrias.
 3. Potencial conflicto de interés con otras industrias.
 4. Necesaria mejora continua.

Según el análisis CAME, el cuadrante F-O posee el mayor peso absoluto y la organización debería seguir principalmente una estrategia ofensiva, y sin olvidar el resto de las estrategias, aprovecharía las fortalezas actuales para obtener las oportunidades futuras, intentando maximizar la situación favorable del entorno.

²² Indistintamente “buques”.

Del análisis de los factores internos (variables controlables), se desprende que, si se superan las debilidades, la oportunidad que más se beneficiaría sería la “automatización de procesos” y la amenaza que más se minimizaría sería la “potencial falta de interés en dar usos transversales”.

4.2 Análisis de Porter de los procesos de trabajo

Los PT son un conjunto de actividades iterativas, secuenciales y sistemáticas, relacionadas entre sí y sometidas a control, que transforman una entrada (input) en un producto o resultado (output), **añadiendo valor**. La automatización de procesos es el FCE de más peso dentro de las oportunidades de las dispone la Armada, actualmente en vías de modernización con el proyecto ARGO y, en la visión del AJAL sobre el Arsenal Inteligente citando como cimiento, entre otros, a “una gestión por procesos completamente automatizada” (CN Fernández, 2023). La inversión del MINISDEF en la plataforma ARGO de 21 millones de euros para automatizar la GpP por parte de la empresa TELEFONICA supone una contratación externa necesaria para cumplir con los objetivos de la transformación digital de la Armada como pilar de mejora continua (Dirección General de Armamento y Material, 2020, pág. 44); aclarar que la contratación externa se produce cuando las organizaciones deciden adquirir servicios o productos que anteriormente se producían en la propia organización y, sobre una cuestión de capacidad estratégica de la organización, es posible aumentar la cadena de valor de esta (Johnson y otros, 2006, págs. 420-421); se puede afirmar, por tanto, que la organización aumenta su valor en proporción al valor de sus actividades.

La **Estructura de Procesos de la Armada**, en otras organizaciones su **Cadena de Valor**, es una representación gráfica de la actividad de la organización desglosada en los procesos de mayor nivel, estructurados en tres grupos de procesos atendiendo a su naturaleza: Fundamentales, Clave y de Apoyo (CF CGA Escrigas, 2011).

A continuación, se describe cómo se podría implementar la cadena de valor de Porter (2015) para los procesos de MP-GD orientada al astillero como punto de partida para la elaboración de la cadena de valor del cliente, la Armada:

- Logística de entrada: En esta fase, se trata de identificar los componentes necesarios, tales como sensores, software y equipos de monitorización. En este punto, se podría

buscar fuentes de suministro fiables y seleccionar proveedores que ofrezcan los mejores productos y precios.

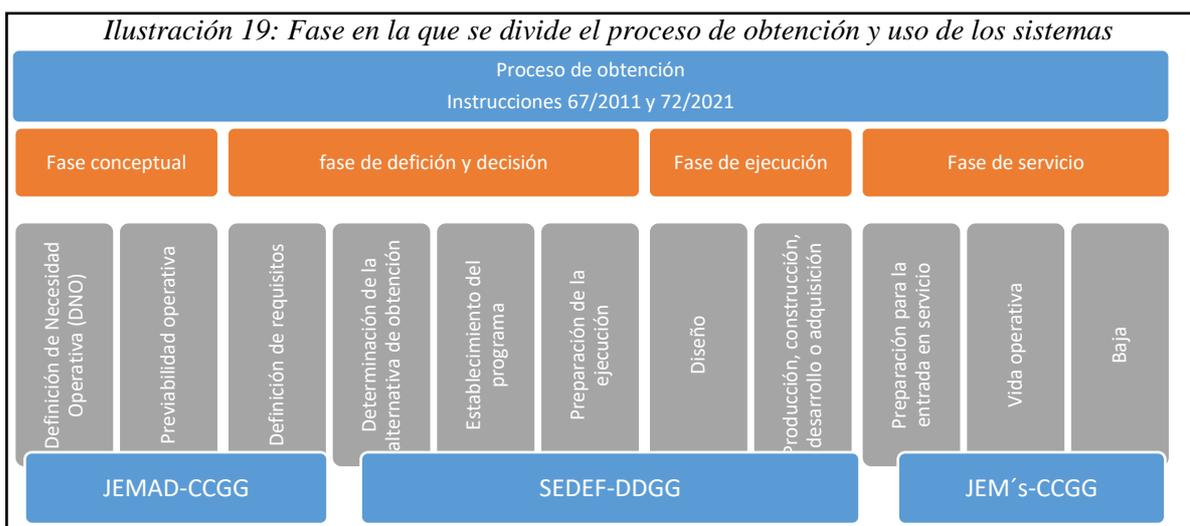
- **Operaciones:** Aquí es donde se realizan las actividades clave, como la recolección de datos de sensores, la evaluación y análisis de datos, y la identificación de patrones y anomalías. Para agregar valor a estas actividades, se podría invertir en tecnología de vanguardia para la recolección y análisis de datos, contratar personal altamente capacitado y desarrollar un enfoque orientado al cliente.
- **Logística de salida:** Una vez que se han realizado las actividades, es necesario proporcionar informes detallados a los clientes, incluyendo detalles sobre el desempeño del equipo, posibles riesgos y las acciones a llevar a cabo. En esta fase, se podría enfocar en mejorar la calidad de los informes, garantizar la entrega puntual y ofrecer un servicio al cliente excepcional.
- **Publicidad y ventas:** En esta fase, se debe desarrollar una estrategia efectiva de marketing y ventas para promocionar el servicio. Se podría invertir en publicidad en línea, asistir a ferias y eventos relevantes, y desarrollar un programa de referidos para los clientes satisfechos. Es importante enfocarse en la calidad del servicio, la rapidez de respuesta y la personalización del servicio para atraer y retener clientes.
- **Servicio:** Por último, es importante prestar un servicio excepcional a los clientes y responder de manera rápida y eficiente a cualquier problema que pueda surgir. Se podría enfocar en capacitar al personal de servicio al cliente, establecer canales de comunicación efectivos y ofrecer un servicio de soporte técnico de alta calidad.

En resumen, implementar una cadena de valor de Porter para los procesos de MP-GD implica enfocarse en agregar valor a cada actividad clave y asegurar una calidad excepcional en el servicio al cliente. Al hacerlo, se puede desarrollar una ventaja competitiva en el mercado y mejorar la rentabilidad del negocio. Para medir el valor, más allá del interés económico difícilmente medible partiendo sólo con el dato del costo, se utilizan indicadores de rendimiento de los procesos. En el Pliego de Prescripciones Técnicas²³ (Ley 9/2017 LCSP,

²³ Los pliegos de cláusulas administrativas y los pliegos de prescripciones técnicas (generales y particulares) conforman el contrato de la Ley de Contratos del Sector Público.

2017) del sistema ARGO se especifica en el apartado de GpP que “El adjudicatario establecerá indicadores medibles que permitan comprobar de forma permanente el rendimiento y la calidad de los procesos y aplicaciones desarrollados. Dichos indicadores deberán ser validados por el Ministerio de Defensa” (CESTIC, 2021, pág. 53); además, las actuaciones del MDEF para la segunda parte del Plan de Transformación Digital contempla las actuaciones de implementar “Indicadores de rendimiento que muestran cómo se progresa y cuantifican el grado de cumplimiento de la acción” (MDEF, 2020, pág. 87)

Del análisis DAFO del apartado 4.1 sobre el MP en la Armada, se dilucidó como prioritaria una estrategia ofensiva, siendo la oportunidad más beneficiada la automatización de procesos que deben ser considerados desde la obtención de los sistemas o material. La obtención de material en la Defensa está regulada por la Instrucción 67/2011, de 15 de septiembre, del Secretario de Estado de Defensa, por la que se regula el Proceso de Obtención de Recursos Materiales (Instrucción 67/2011 SEDEF, 2011) y por la Instrucción 72/2012, de 2 de octubre, del Secretario de Estado de Defensa, por la que se regula el proceso de obtención del armamento y material y la gestión de sus programas (Instrucción 72/2021 SEDEF, 2012); en la ilustración 19 se especifican las fases del proceso y por traslación en la cadena de valor se pueden considerar las actividades primarias.



Fuente: Ministerio de Defensa

La instrucción 67/2011 (Instrucción 67/2011 SEDEF, 2011) regula las dos primeras fases de la obtención de material: la Fase Conceptual donde se define la necesidad y se esboza la solución o alternativas de solución operativa o funcional y la Fase de Definición y Decisión, donde se concreta la solución operativa o funcional y se selecciona una alternativa viable para su obtención, así como a la regulación del procedimiento para el seguimiento y control de los programas.

La instrucción 72/2012 (Instrucción 72/2012 SEDEF, 2012) regula las dos últimas fases de la obtención de material: la Fase de Ejecución donde se ejecutan los contratos necesarios para el desarrollo de estos programas y la Fase de Servicio donde se desarrollarán los programas de obtención de recursos permanentes de armamento y material, de obtención de recursos asociados al sostenimiento y de baja.

En las diferentes fases del proceso de obtención, los actores responsables son los siguientes:

- El Jefe del Estado Mayor de la Defensa (JEMAD) y Cuarteles Generales: Definición de necesidad Operativa (DNO), Previabilidad operativa (fase conceptual) y definición de requisitos (fase de definición y decisión).
- La Secretaría de Defensa y Directores Generales: Determinación de la alternativa de obtención, establecimiento del Programa, preparación de la ejecución (fase de definición y decisión), diseño y producción, construcción, desarrollo o adquisición (fase de ejecución).
- Los Jefes de los Estados Mayores y Cuarteles Generales: Preparación de la entrada en servicio, vida operativa y baja (fase de servicio).

Las especificaciones se obtendrán a partir de los requisitos operativos y técnicos aprobados en los Requisitos de Estado Mayor (REM) y las establecidas en el Documento de Viabilidad (DDV); se deberán redactar de forma clara y concisa, asegurando que quedan cubiertos los requisitos de usuario.

Para asegurar que la Armada puede ser competitiva reduciendo los costos del mantenimiento utilizando las técnicas de MP con IA simultaneando con el clásico mantenimiento programado o planeado se deberían actualizar los PT actuales, tanto para las Unidades actuales como para

las nuevas adquisiciones. Por traslación, podríamos considerar las actividades primarias de Logística de entrada, Operación, Logística de salida, Venta y Servicio (ver ilustración 18) por similitud a la “obtención de material” (ver ilustración 19).

La Armada desarrolló el PT de “Obtención de Unidades y Sistemas Navales” derivado de un PF sobre el “Planeamiento de la administración de recursos”. El PT se ha modelado en la ilustración 20 como una cadena de valor en las actividades principales; de dicho PT, heredan o cuelgan otros PT que desarrollan las actividades del mantenimiento del material. Las actividades de soporte, para el estudio que nos ocupa se adaptarán al concepto de apoyo logístico 4.0 relacionadas con el MP, GD y los PT implicados en la transformación digital de la Armada, actividad avalada por Porter (2015) citando que “El desarrollo tecnológico es importante para la ventaja competitiva en todas las industrias, siendo el elemento clave en algunas”.

Ilustración 20: Cadena de valor de la obtención de material



Fuente: Elaboración propia

La visión de la Armada del GD sugiere la idea de considerarse desde las primeras etapas del proceso de obtención (reflejados en los documentos de necesidades operativas y de viabilidad), añadiendo que el concepto de Apoyo Logístico 4.0 “abre la puerta a digitalizar los procesos logísticos y a optimizar los periodos de mantenimiento, así como a predecir averías y actuar antes de que éstas se produzcan (MP)” y por otro lado que “debe ser la

referencia que guie el desarrollo incremental de los futuros gemelos digitales, tanto de las Unidades de nueva construcción como de las modernizadas. Para ello, deberá ser parte integral de los programas correspondientes desde la definición de requisitos y el diseño, hasta la construcción, vida operativa y apoyo al ciclo de vida” (AJEMA, 2021).

El orden de las actividades debe seguir el flujo del proceso, que es una tarea difícil (Porter, 2015, pág. 126). La ilustración 21 muestra la cadena de valor de cliente (Porter, 2015, pág. 136) con las actividades de apoyo relacionadas con el desarrollo del GD en las diferentes fases del ciclo de vida del material, actividades que se asocian a PT que deberían ser actualizados o creados, matizando que la implementación del MP sería aplicable actualmente a los motores propulsores principales, generadores eléctricos y motores auxiliares.

Ilustración 21: Cadena de valor de Porter (cliente)



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se identifican las actividades relacionadas con el MP y GD:

- Fase conceptual (Obtención de Unidades y sistemas navales).
 - Desarrollo tecnológico: Identificar las necesidades del recurso de material (documento DNO).
 - Aprovisionamiento: Especificar los objetivos logísticos (documento OEM).
- Fase de definición (documento REM y alternativas de obtención DDV).
 - Gestión de recursos humanos: Puestos de personal cualificado.
 - Desarrollo tecnológico: Tratamiento de datos.

- Aprovechamiento: Requisitos de mantenimiento.
- Fase de ejecución.
 - Gestión de recursos humanos: Formación.
 - Desarrollo tecnológico: Definición de fallos y criticidad.
 - Aprovechamiento: Altas de nuevas Unidades.
- Fase de preparación.
 - Desarrollo tecnológico: Pruebas interfaz.
 - Aprovechamiento: Integración de plataformas digitales.
- Fase de servicio.
 - Desarrollo tecnológico: Mejora continua.
 - Aprovechamiento: Gestión del mantenimiento de Primer y Segundo Escalón, Plan de inmovilizaciones y Seguimiento técnico de tareas de mantenimiento.

Durante la fase de preparación y servicio se podría realizar la actividad (indirecta) de mercadotecnia en apoyo a la Industria 4.0 o Astillero 4.0.

Identificados los procesos implicados en el MP y su integración el futuro GD, a continuación se desarrollan los pasos de actualización en las diferentes fases en la cadena de valor.

4.2.1 Fase Conceptual

Actividad primaria de elaboración del documento DNO:

Para nuevas Unidades o de Programas Especiales de Modernización (PEM), especificar en la memoria justificativa el alcance de la implementación del MP y en su caso, el nivel de integración con el GD en base a los Objetivos de Recurso de Material (ORM) de la (Instrucción 2/2011 SEDEF, 2011), la Instrucción 2/2011, del SEDEF, por la que se regula el proceso de planeamiento de los Recursos Financieros y Materiales, de la Instrucción 67/2011, de 15 de septiembre, del SEDEF, por la que se regula el Proceso de Obtención de Recursos Materiales. Para la adquisición de material en la modernización de Unidades, dentro del Objetivo de Capacidades Militares (OCM) del ciclo en curso del JEMAD y en base a Instrucción 72/2012, de 2 de octubre, del SEDEF, por la que se regula el proceso de obtención del armamento y material y la gestión de sus programas.

Actividad primaria de elaboración del documento OEM:

Partiendo del DNO (Instrucción 67/2011 SEDEF, 2011), se realizará un estudio de mercado de las soluciones posibles con la tecnología más viable para la implementación del MP y en su caso el GD con un nivel de TRL adecuado a la fecha prevista de entrega del material (AN INA Lamas, 2022).

Actividad de apoyo de desarrollo tecnológico:

Identificar necesidad de material: Identificar los proyectos de desarrollo tecnológico que mejoren las capacidades de los sistemas actuales, en relación con su uso por la Defensa (CESTIC, 2021, pág. 124) incluyendo prioritariamente las capacidades de la BTI (CESTIC, 2021, pág. 13).

Actividad de apoyo de aprovisionamiento:

Estudio de soluciones logísticas viables: Estudiar las soluciones operativas más viables considerando el aspecto de material en los factores MIRADO24 (Material, Infraestructura, Recursos humanos, Adiestramiento, Doctrina y Organización) para satisfacer las necesidades militares recogidas en el OCM o las necesidades sobrevenidas de carácter urgente (Instrucción 67/2011 SEDEF, 2011).

*4.2.2 Fase de Definición y Decisión***Actividad primaria de elaboración del documento REM:**

También denominado Documento de Requisitos (DDR), las actividades relacionadas con el mantenimiento programado/planeado y MP y su integración con el GD (Instrucción 67/2011 SEDEF, 2011) son:

- Descripción de la solución operativa. Descripción inicial del concepto de sostenimiento para la solución operativa, abarcando la orgánica y las

²⁴ Toda capacidad militar se compone de material (M), infraestructura (I), recursos humanos (R), adiestramiento (A), doctrina (D), organización (O) e interoperabilidad (I) (MIRADO-I)

responsabilidades en su gestión sobre el concepto de apoyo logístico 4.0 (GB INA Martínez & CN INA González, 2018).

- Requisitos de la solución operativa. Identificar los requisitos para los sistemas con apoyo con mantenimiento preventivo/planeado, con MP mediante la metodología FMCA-IA (Arias & Minguela, 2018) y los sistemas con apoyo de análisis de fluidos mediante el SMBC (AN INA Lamas, 2021).
- Dimensionamiento de la solución operativa. Requisitos de sostenimiento de la solución operativa, teniendo en cuenta la descripción inicial del concepto de sostenimiento realizada, requisitos de formación, requisitos de interoperabilidad de la solución, requisitos operativos y características técnicas que se hayan comprobado viables según el análisis estratégico DAFO/CAME y FCE del apartado 6.1.

Actividad primaria de elaboración del documento DDV:

A las actividades relacionadas con el mantenimiento programado/planeado y MP, su integración con el GD (Instrucción 67/2011 SEDEF, 2011) son:

- Consideraciones tecnológicas. Posibles desarrollos de I+D con especial atención a las áreas tecnológicas de carácter estratégico o posibilidad de aplicar resultados de investigación provenientes de desarrollos previos de las universidades colaboradoras (Dirección General de Armamento y Material, 2020).
- Consideraciones logísticas. Aspectos que inciden en el sostenimiento de la solución a lo largo de su ciclo de vida (Carriazo, 2018).

Actividad de apoyo de gestión de recursos humanos:

Puestos de personal cualificado en los diferentes escalones de mantenimiento (CONLOG AJEMA, 2017).

Actividad de apoyo de desarrollo tecnológico:

Tratamiento de datos procedentes del SICP y sensores que deberán estar integrados en la maqueta digital del buque (GB INA Martínez & CN INA González, 2018) y del SMBC (AN INA Lamas, 2021) con el aprovechamiento del empuje tecnológico civil (BTI) con técnicas de IA de análisis automático e inteligente de grandes volúmenes de datos de sensores y

tecnologías para el MP de análisis inteligente de múltiples fuentes de información para apoyo a la decisión (CESTIC, 2021, pág. 39).

Actividad de apoyo de aprovisionamiento:

Requisitos de mantenimiento: Partiendo del apartado logístico de las consideraciones logísticas del DDV, elaborar un proceso teniendo en cuenta los “aspectos que inciden en el sostenimiento de la solución a lo largo de su ciclo de vida atendiendo a los criterios básicos descritos en la Instrucción 5/2008, de 15 de enero, de la Secretaría de Estado de Defensa, por la que se regula el sostenimiento del armamento y material, así como cualquier otra de aplicación al resto de recursos” (Instrucción 67/2011 SEDEF, 2011).

4.2.3 Fase de Ejecución

Actividad primaria de diseño y producción:

- Elaborar las Especificaciones de Diseño (EDD) y decidir la estrategia de contratación (Instrucción 67/2011 SEDEF, 2011).
- Elaborar los pliegos de prescripciones técnicas a partir de los requisitos funcionales, operativos y técnicos aprobados en el REM o DDR y de las consideraciones establecidas en el DDV (Instrucción 72/2021 SEDEF, 2012).

Actividad de apoyo de recursos humanos:

Formación: Identificar las necesidades de formación en materia de la transformación digital relacionada con el MP y GD con el correspondiente perfil de los usuarios de las dotaciones de quilla y de mantenimiento de los arsenales para garantizar el principio básico del “conocimiento” disponiendo de “equipos de coordinadores y especialistas estables durante el proyecto y posterior uso de los sistemas. La gestión del conocimiento que se genere es un aspecto fundamental a tener en cuenta para garantizar su eficiencia” (CONLOG AJEMA, 2017; CN González-Aller & AN INA Lamas, 2018).

Actividad de apoyo de desarrollo tecnológico:

Definición de fallos y criticidad:

- “Desarrollo de algoritmos basados en IA para el análisis automático de grandes volúmenes de datos obtenidos de la sensorización y labores de mantenimiento de las plataformas, de forma que sean capaces de predecir con exactitud y fiabilidad la vida útil restante de cada componente o sistema” (CESTIC, 2021, pág. 68).
- Desarrollo de los FMCA para los elementos, equipos y sistemas según su criticidad (IEC 60812, 2018; AN INA Lamas, 2022).
- Desarrollo de los sistemas de ciberdefensa y “mecanismos que permitan operar en diferentes niveles de seguridad, impidiendo la transferencia de información confidencial o clasificada a otros niveles no autorizados o menos restrictivos” (CESTIC, 2021, pág. 101) mediante las guías del CCN para la conexión de entornos virtuales y de interconexión de sistemas que manejan información clasificada (AN INA García & Santos, 2023).

Actividad de apoyo de aprovisionamiento:

Alta de la Unidad: Iniciar el procedimiento de alta de la Unidad con la particularidad de la creación de GD de la plataforma de NAVANTIA, de la plataforma Armada y de la plataforma Buque (GB INA Martínez & CN INA González, 2018).

4.2.4 Fase de Preparación

Actividad primaria de pruebas:

Especificar las pruebas de evaluación operativa o funcional acordes a los REM aplicables al MP y la integración en el GD (Instrucción 72/2021 SEDEF, 2012).

Actividad de apoyo de recursos humanos:

Formación: Incluir o crear en los currículos de los cursos de Formación, Especialización y Altos Estudios Militares los contenidos necesarios para adquirir las competencias requeridas con la transformación digital. “En consecuencia, según las apreciaciones de la industria, es

preciso y urgente que la formación se adapte y se aumente el nivel de la base laboral mediante la formación en el trabajo” (Recamán, 2018).

Actividad de apoyo de desarrollo tecnológico:

- Pruebas de interfaces gráficos. Definir las interfaces del GD con las aplicaciones logísticas de la Armada y el visualizador de tres dimensiones para tareas de sostenimiento, captación y preprocesamiento de datos de los equipos monitorizados por el SICP y SMBC (CN RES Díaz del Río, 2020).
- Márquetin: Encontrar en el ámbito de la Defensa nuevos nichos de mercado y de exportación como estrategia nacional que resulta de especial interés para la BTI (CESTIC, 2021, pág. 22).

Actividad de apoyo de aprovisionamiento:

Integración de plataformas tecnológicas: Integrar las plataformas ATAVIA-SIL con el GD (CN Fernández, 2023; CN RES Díaz del Río, 2020).

4.2.5 *Fase de Servicio*

Actividad primaria de elaboración del documento DNS:

- “Si durante la vida operativa del sistema o equipo es necesario abordar su modernización, se iniciará un nuevo proceso de obtención, desde su fase Conceptual, que dará lugar a un programa de modernización” (Instrucción 72/2021 SEDEF, 2012).
- La DGAM, sobre la documentación generada en el proceso de obtención de los nuevos sistemas o equipos, elaborará o actualizará los ORM, etc. que serán incluidos en la programación de recursos financieros y materiales (Instrucción 2/2011 SEDEF, 2011; Instrucción 72/2021 SEDEF, 2012).
- Se enumerarán “los sistemas y equipos a sostener y concretará los recursos financieros necesarios para desarrollar las actividades de mantenimiento, suministro y gestión de repuestos y materiales e ingeniería del ciclo de vida que garantizan la disponibilidad operativa de esos sistemas o equipos” (Instrucción 72/2021 SEDEF, 2012).

Actividad de apoyo de recursos humanos:

Formación: Llevar a cabo la planificación y ejecución de los cursos definidos en el documento de REM para la formación del personal usuario/mantenedor del CESADAR central y periféricos y buques con MP y/o GD (Carriazo, 2018), fomentar la “investigación, formación y de colaboración con el mundo universitario” (CN RES Díaz del Río, 2020), involucrar a todas las Unidades de la Armada para mejorar las funcionalidades y adaptar la experiencia de los usuarios a las necesidades de la Armada (ver ilustración 17).

Actividad de apoyo de desarrollo tecnológico:

- Mejora continua: Analizar los resultados e implantación de las mejoras detectadas por medio de un ciclo de mejora continua en las fases de planeamiento, ejecución, verificación y optimización y medirlos por medio de un sistema de medición por indicadores, proporcionando al Mando datos que sirvan para controlar la actividad de la Armada y el grado de cumplimiento de los OCM (CF CGA Escrigas, 2011), y paralelamente buscar la excelencia de los procesos asociados a la transformación digital de Defensa para que actúen como catalizadores del avance tecnológico en las Fuerzas Armadas y del desarrollo tecnológico de la BTI de la Defensa (CESTIC, 2021, pág. 33)
- Mercadotecnia: En línea con la fase de preparación, encontrar en el ámbito de la Defensa nuevos nichos de mercado y de exportación como estrategia nacional que resulta de especial interés para la BTI (CESTIC, 2021, pág. 22) para aprovechar la oportunidad exportable del sistema (ver ilustración 17).

Actividad de apoyo de aprovisionamiento:

Gestión del mantenimiento e inmovilizaciones: Actualizar los procesos actuales de mantenimiento de Primer y Segundo Escalón de mantenimiento y el plan de inmovilizaciones incluyendo el mantenimiento programado/planeado, el SMBC e ICMP actuales con el MP para la futura integración con el GD (barrera organizativa del MP del anexo I).

5 PROPUESTA

Con los datos obtenidos en el análisis estratégico de la implementación del MP, en la Armada se debería concentrar el esfuerzo utilizando una estrategia ofensiva que aprovecharía las fortalezas actuales para obtener las oportunidades futuras, intentando maximizar la situación favorable del entorno con las siguientes líneas de acción:

- Agilizar la implementar el MP a todos los buques de la Armada, incluyendo en las futuras adquisiciones el requisito hacia el fabricante de la elaboración de los FMECA de aquellos sistemas que se especifiquen. Esta acción mejora en gran medida las oportunidades de escalabilidad para la futura integración de los procesos de mantenimiento con el GD de las futuras fragatas F-110, generar riqueza a BTI nacional al ser escalable al exterior u otros Ejércitos y fomenta la colaboración/investigación con universidades/administraciones.
- Iniciar la licitación contractual de un proyecto para la integración del mantenimiento programado/planeado con el predictivo y el SMBC en el sistema ATAVIA para la mejora de toma de decisiones en el momento que el sistema MAPRE y los dispositivos IoT hayan alcanzado un TRL de nivel 9 y el sistema MASTIA se encuentre integrados en explotación. Esta acción mejora en gran medida la oportunidad de aprovechar la versatilidad y transversalidad del sistema para su explotación en otros ámbitos, de generar riqueza a la industria nacional al ser escalable al exterior u otros Ejércitos y facilita la automatización de procesos.
- Mantener la elección de sistemas informáticos de amplia utilización, apoyados y de demostrada funcionalidad para favorecer las oportunidades de exportación junto con actividades de apoyo de mercadotecnia en beneficio de la BTI nacional.

Demostrado que la GpP proporciona valor para que la Armada sea más competitiva, por estar considerado el MP de “carácter estratégico” y para aprovechar el elemento catalizador de la implementación del GD en las futuras F-110, se debería:

- Solicitar la acreditación del sistema para el manejo de información clasificada nacional para contar con garantías de aplicación de las guías CCN-STIC-220 (Arquitecturas Virtuales) y CCN-STIC-302 (Interconexión de sistemas TIC que

manejan información clasificada) para proteger con mecanismos de seguridad adecuados la divulgación o filtración no autorizada de información y la pérdida, alteración o sustracción de ésta por parte de terceros no autorizados asegurando la confidencialidad, integridad y disponibilidad del sistema para reforzar el carácter estratégico del sistema.

- Centrar el esfuerzo en aprovechar la oportunidad en automatizar los procesos y fomentar los usos transversales del sistema. Es vital el aprovechamiento de la plataforma de Armonización para la Gestión de la Organización para incluir la GpP de las actividades relacionadas con el MP del Proceso Fundamental de obtención de material (PF-7) en la fase Conceptual de la necesidad (elaboración de los documentos DNO y OEM), en la fase de Definición y Decisión (elaboración de los documentos REM y DDV), en la fase de Ejecución (elaboración del documento EDR) y de la obtención del material (proceso de altas de nuevas Unidades en la Armada), y último, el período de actividad y baja de las Unidades (procesos de la necesidad de mantenimiento en el Primer y Segundo Escalón y del plan de inmovilizaciones).
- Corregir el grado de compromiso de todas las Unidades para maximizar las funcionalidades del sistema mediante la regulación de directivas de los mandos orgánicos de actividades sobre concienciación y divulgación de la importancia del MP y de ejercicios individuales/colaborativos utilizando las capacidades de simulación y adiestramiento del GD.
- Incluir en los currículos de los diferentes cursos de Formación, Especialización y Altos Estudios Militares en los procesos de recurso de personal (PF-6), aquellas capacidades generales y específicas del personal usuario en materias del MP y de las plataformas asociadas para garantizar su manejo eficiente.
- Adecuar los indicadores de rendimiento de los diferentes procesos relacionados con las nuevas necesidades de obtención de material, su sostenimiento inteligente y la formación de personal para asegurar la mejora continua.
- Asegurar la propiedad industrial para aumentar la garantía de explotación de forma confiable en otros Ejércitos y fomentar el carácter estratégico del sistema mediante los mecanismos de protección de patentes disponibles y una defensa en profundidad para la seguridad de la información, en línea con las guías de seguridad del CCN (la

clasificación de seguridad de la información sensible en poder de las Unidades y empresas, clasificación de locales, acreditación de seguridad del personal, etc).

La viabilidad de la propuesta a nivel económico se reflejará en la memoria justificativa del alcance de la implementación del MP y en su caso, el nivel de integración con el GD, en base a los ORM del documento DNO mediante una estimación preliminar del coste total de la solución atendiendo al ciclo de vida; en dicha estimación se concretará posteriormente en el DDV la valoración de costes, de impacto económico y de posibilidades de financiación para concluir finalmente que la necesidad es favorable o desfavorable. Con el DDV favorable, la propuesta de viabilidad a nivel organizativo se reflejará en la descripción de la solución operativa del documento de REM abarcando la orgánica y las responsabilidades en la gestión sobre el concepto de apoyo logístico 4.0 de los PF-6, PF-7 y PF-8 del planeamiento de la administración del recurso de personal, de material y financiero respectivamente.

6 CONCLUSIONES

La carrera por la implementación del MP en los buques de la Armada iniciada por el Centro de Supervisión y Análisis de Datos de la Armada (CESADAR) desde el año 2010 se ha desarrollado mediante saltos incrementales tecnológicos y con la formalización de números contratos encadenados conforme lo permitían el recurso financiero, los avances de la industria y los grados de madurez tecnológicos. Con la reciente adquisición de las futuras fragatas F-110 y su GD se ha producido un cambio de rumbo respaldado por el Plan de Transformación Digital de las Administraciones Públicas y en concreto del Ministerio de Defensa donde se contempla el carácter estratégico del MP, su implementación en las nuevas fragatas e integración en el GD.

En este escenario, el objetivo se centra en determinar la estrategia principal a seguir por la Armada en la implementación del MP e identificar aquellos PT de la GpP que deberían modificarse o crearse para aumentar la competitividad de la organización. En la metodología de análisis de los puntos fuertes y débiles en los factores externos e internos (DAFO) de la Armada en la implementación del MP se determina el resultado de concentrar la energía hacia una estrategia ofensiva y como principal FCE de las oportunidades disponibles es la automatización de procesos. Del análisis de los factores internos (variables controlables), se

desprende que, si se superan las debilidades, la oportunidad que más se beneficiaría sería la “automatización de procesos”, oportunidad que precisa del análisis de la GpP, y que en este trabajo se ha llevado a cabo mediante las cadenas de valor de Porter dando como resultado la identificación de los PT involucrados en la implementación del MP desde la concepción, adquisición y resto del ciclo de vida de material.

La implementación del MP, además de las oportunidades que nos brindan (Escalabilidad, Versatilidad/transversalidad, Producto exportable, Adaptación a otros Ejércitos, Carácter estratégico, Automatización de procesos y la Colaboración/investigación con universidades/administraciones), también tendría las siguientes implicaciones significativas:

- Reducción de costos: Al detectar y abordar problemas antes de que se conviertan en averías graves, el MP puede ayudar a evitar reparaciones costosas y prolongadas. Además, al implementar un enfoque basado en IA, se pueden optimizar los programas de mantenimiento, evitando intervenciones innecesarias y reduciendo los costos asociados.
- Mayor disponibilidad operativa: El MP permite identificar posibles fallos o averías antes de que ocurran. Esto significa que los buques pueden ser reparados o mantenidos de manera proactiva, reduciendo el tiempo de inactividad y aumenta su disponibilidad operativa.
- Mejora de la seguridad: La detección temprana de problemas técnicos o de rendimiento en los sistemas puede contribuir a prevenir situaciones de riesgo o accidentes.
- Optimización de la vida útil de los equipos: Al monitorear continuamente el estado de los equipos y sistemas, el MP puede ayudar a identificar los factores que pueden acortar su vida útil. Al abordar estos factores a tiempo, se pueden tomar medidas preventivas para prolongar la vida útil de los activos y optimizar su rendimiento.

Es importante destacar que la implementación del MP requerirá la infraestructura adecuada, incluida la adquisición y el análisis de datos, la formación del personal y la integración de tecnologías avanzadas de monitorización.

Las limitaciones organizativas más importantes del MP son la falta de involucración del personal de los buques para complementar las funcionalidades y la potencial falta de interés en dar usos transversales que ofrece esta tecnología, probablemente por falta de formación y capacitación, que es otro factor limitante. Asimismo, las limitaciones técnicas, comparando las dos grandes herramientas que se utilizan en IA de nuestro MP, serían:

- Automatización basada en reglas expertas, predicción en base a histórico de averías (ATAVIA).
 - Se necesitan los registros históricos previos a cada modo de fallo que se pretenda predecir.
 - La gran mayoría de modos de fallo FMCA no van a ocurrir.
- Aprendizaje automático con MAPRE/SOPRENE (ML), mediante el cálculo de la probabilidad en función de modelo de normalidad.
 - Se necesitan datos de comportamiento normal de cada equipo con condiciones de su entorno.
 - Los resultados dependen altamente del detalle de la documentación de adquisición de equipos.

Las perspectivas de la implementación del MP, integrado en el futuro GD va a requerir la necesidad de mejora continua, de desarrollos iterativos y adaptativos, del esfuerzo de la organización para gestionar el conocimiento y la implicación, no solo del Apoyo Logístico, sino de la Flota.

Los proyectos pendientes de finalizar, se centrarán en el corto plazo en obtener el TRL (Technology Readiness Level) máximo de valor 9 para los dispositivos IoT (sensores inteligentes) que complementarán al MP y la implementación del sistema de Automatización del Sosténimiento Inteligente de la Armada (MASTIA) para automatizar la preparación y alistamiento logístico de un buque previo a una misión o despliegue, la integración de las aplicaciones logísticas en el Sistema de Información Logística (SIL) y el despliegue del sistema de la Plataforma de Armonización para la Gestión de la Organización (ARGO).

Dentro de las futuras líneas de investigación, cabe destacar la implementación del Arsenal Inteligente donde se introducen los conceptos de la gestión de obsolescencias y el

mantenimiento prescriptivo, que significa pasar del mantenimiento preventivo planificado a la planificación de mantenimiento proactivo e inteligente particularizado a un determinado sistema o equipo (similar a la prescripción médica) y propone la “completa automatización de las acciones de mantenimiento con las de aprovisionamiento.

BIBLIOGRAFÍA

- AJAL. (26 de enero de 2023). <https://armada.defensa.gob.es/>. Recuperado el 27 de abril de 2023, de <https://armada.defensa.gob.es/framework/skins/estaticos/imagenes/revistas/VISIONDELAJALDELARSENALINTELIGENTE.pdf>
- AJEMA. (2021). Visión de la Armada del Gemelo Digital.
- ALTE. Urcelay, J. (3 de abril de 2019). La transformación digital y el sostenimiento 4.0 en la Armada. *Infodefensa.com*. Recuperado el 29 de abril de 2023, de <https://www.infodefensa.com/texto-diario/mostrar/3118233/transformacion-digital-sostenimiento-40-armada>
- AN INA García, A., & Santos, Á. (marzo de 2023). *La ciberdefensa del gemelo digital en los buques de la Armada*. Madrid: Revista General de Marina.
- AN INA Lamas, F. (2021). *Embarque de sistemas de automatización de vigilancia de activos. Proyecto MEVIMAN*. Madrid: Revista General de Marina.
- AN INA Lamas, F. (2022). *Sensores inteligentes y módulo de mantenimiento predictivo embarcado (MAPRE)*. Madrid: Revista General de Marina.
- AN INA Lamas, F. (2023). 2º Congreso Armada-UGR "Logística inteligente para la Defensa". Universidad de Granada. Recuperado el 19 de abril de 2023, de <https://congresougr.cesadar.es/>
- Arias, D., & Minguela, B. (2018). *Dirección de la producción y operaciones. Decisiones estratégicas*. Madrid: Pirámide.
- Armada. (11 de febrero de 2020). Jornadas de transformación digital y gestión por procesos en la Escuela de Guerra Naval. Recuperado el 13 de abril de 2023, de <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/conocenosn>

- oticias/prefLang-es/00noticias--2020--02--NT-017-JORN-DIGIT-
es?_selectedNodeID=4267086&_pageAction=selectItem
- Blanco, M. (2012). *Algunas consideraciones sobre el mantenimiento en la Armada*. Madrid: Revista General de Marina.
- Carnero, M. (2013). Predictive maintenance situation on small and medium enterprises. *DINA*, 88(6), 618-619. <https://doi.org/https://doi.org/10.6036/5846>
- Carrasco, B. (2017). La Armada estudia implantar el big data en sus procesos de sostenimiento. *Infodefensa.com*. Recuperado el 25 de enero de 2023, de <https://www.infodefensa.com/texto-diario/mostrar/3078043/armada-estudia-implantar-big-data-procesos-sostenimiento>
- Carrasco, B. (9 de diciembre de 2020). El primer barco en el mundo contratado con gemelo digital es la F-110. *infodefensa.com*. Recuperado el 25 de abril de 2023, de <https://www.infodefensa.com/texto-diario/mostrar/3125553/d-martinez-navantia-primer-barco-mundo-contratado-gemelo-digital-f-110-y2>
- Carriazo, D. (2018). *Sistema integrado de sostenimiento*. Madrid: Revista General de Marina.
- Centro Conjunto de Desarrollo de Conceptos. (2022). *Entorno operativo 2035 Primera Revisión*. Madrid: Ministerio de Defensa, Secretaría Técnica.
- CESTIC. (2021). <https://contrataciondelestado.es/>. Recuperado el 30 de abril de 2023, de <https://contrataciondelestado.es/wps/wcm/connect/4355c903-472f-483c-b67e-9fa5f0421e50/DOC2021090713375108+PPT+CESTIC.pdf?MOD=AJPERES>
- CESTIC. (18 de octubre de 2021). Transformación Digital del Ministerio de Defensa. *Ministerio de Defensa*. Recuperado el 13 de abril de 2023, de <https://www.defensa.gob.es/cectic/noticias/2021/listado/noticia7.html>

- CF CGA Escrigas, J. (30 de agosto de 2011). *La implantación de la gestión por procesos en la Armada. La eficiencia en la organización*. Recuperado el 7 de marzo de 2023, de IEEE: <https://www.ieee.es/publicaciones-new/documentos-de-opinion/2011/DIEEEO60-2011GestionProcesosArmada.html>
- CN Fernández, R. (2023). *Visión del Arsenal Inteligente (HI3E)*. Madrid: Revista General de Marina.
- CN González-Aller, J., & AN INA Lamas, F. (agosto-septiembre de 2018). *Evolución del CESADAR*. Madrid: Revista General de Marina.
- CN RES Díaz del Río. (2020). *Futuro Gemelo Digital (GD) de la F-110*. Madrid: Revista General de Marina.
- CN RES Díaz del Río, J. (noviembre de 2021). *Mantenimiento inteligente en la Armada: en vanguardia y trazando el futuro*. Madrid: Revista General de Marina.
- CONLOG AJEMA. (2017). *Concepto del Apoyo Logístico*. Madrid.
- Díaz, A., & Matamoros, I. (2011). El análisis DAFO y los objetivos estratégicos. *Contribuciones a la Economía*. Recuperado el 11 de abril de 2023, de Servicios Académicos Intercontinentales SL: <https://ideas.repec.org/s/erv/contri.html>
- Dirección General de Armamento y Material. (2020). DGAM. *Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa*. Madrid: Ministerio de Defensa, Secretaría de Estado de Defensa.
- Ferreño, S. (2022). *Aproximación metodológica a la implantación del gemelo digital en buques [Tesis doctoral; UDC Universidad de A Coruña]*. Recuperado el 13 de marzo de 2023, de <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/30974>
- Fu, T. (2017). *Navy Platform Digital Twin*. Recuperado el 14 de marzo de 2023, de <https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/mb/2017Spring/fu.pdf>

- GB INA Martínez, M., & CN INA González, A. (Agosto-Septiembre de 2018). *Concepto del Apoyo Logístico de la F-110*. Madrid: Revista General de Marina.
- Gillespie, A. (2015). Condition Based Maintenance: Theory, Methodology, & Application. *Reliability and Maintainability Symposium*. Tarpon Springs, FL. Recuperado el 26 de abril de 2023, de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/43541164/RAMS2015_CBM_Tutorial_paper_Gillespie_vFINAL-libre.pdf?1457525788=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DCondition_Based_Maintenance_Theory_Metho.pdf&Expires=1682538182&Signature=A87-M1d~xYSJsVk-1
- Grieves, M., & Vickers, J. (2017). *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7>
- Ibáñez de Aldecoa, J. (2014). Niveles de madurez de la tecnología. *Economía industrial*(393), 165-171. Recuperado el 9 de marzo de 2023, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/extart?codigo=4860497>
- IEC 60812. (2018). *Failure modes and effects analysis (FMEA and FMCA)*.
- Instrucción 2/2011 SEDEF. (2011). Instrucción 2/2011, del Secretario de Estado, por la que se regula el proceso de planeamiento de los Recursos Financieros y Materiales. *BOD*, 26, de 8 de febrero de 2011.
- Instrucción 67/2011 SEDEF. (2011). Instrucción 67/2011, de 15 de septiembre, del Secretario de Estado de Defensa, por la que se regula el Proceso de Obtención de Recursos Materiales. *BOD*, 189, de 27 de septiembre de 2011.
- Instrucción 72/2021 SEDEF. (2012). Instrucción 72/2012, de 2 de octubre, del Secretario de Estado de Defensa, por la que se regula el proceso de obtención del armamento y material y la gestión de sus programas. *BOD*, 202, de 16 de octubre de 2012.

- ISDEFE. (2021). *Informe anual 2021*. Madrid. Recuperado el 18 de abril de 2023, de https://www.isdefe.es/sites/default/files/ISDEFE_InformeAnual21_0.pdf
- Jabaloyes, J., Carot, J., & Carrión, A. (2020). *Introducción a la gestión de la calidad*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Johnson, G., Scholes, K., & Whittington, R. (2006). *Dirección estratégica*. Prentice hall.
- Kurt, M., Nemeth, T., Kovacs, K., & Glawar, R. (2017). A procedural approach for realizing prescriptive maintenance planning in manufacturing industries. *ELSEVIER*, 66(1), 461-464. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.007>
- Ley 9/2017 LCSP. (2017). Ley 9/2017, de 8 de noviembre, de Contratos del Sector Público. *BOE*, 272, de 09 de noviembre de 2017.
- MDEF. (2020). *Plan de acción del MDEF para la TD*. Secretaría General Técnica MDEF.
- Miranda, F., Rubio, S., Chamorro, A., & Bañegil, T. (2004). *Manual de dirección de operaciones*. Thomson.
- Mokashi, A., Wang, J., & Verma, A. (2002). A study of reliability-centred maintenance in maritime operations. *ELSEVIER*, 26(5), 325-335. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0308-597X\(02\)00014-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0308-597X(02)00014-3)
- Moubray, J. (2004). Reliability-Centered maintenance (RCM). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad - RCM II*. (S. Ellmann, Trad.) Lutterworth: Aladon Ltd.
- NAVANTIA. (19 de abril de 2022). <https://contrataciondelestado.es/>. Obtenido de PPT Astillero 4.0: <https://contrataciondelestado.es/wps/wcm/connect/8731a2fe-3826-41e5-9a6c-d56ce061395d/DOC20220504132534DOC+1+PPT.pdf?MOD=AJPERES>
- Niu, G., Yang, B.-S., & Pecht, M. (2010). Development of an optimized condition-based maintenance system by data. *Reliability Engineering and System Safety*.

- Pagán, J. (2017). *Sistema de diagnóstico de motor diesel marino basado en modelo termodinámico y de inteligencia artificial [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena]*. Cartagena. Obtenido de <http://repositorio.bib.upct.es/dspace/>
- Pastor, J. (2016). *Procedimiento de estimación del coste del ciclo de vida de un sistema de armas en España [Tesis doctoral; UNED Instituto Universitario General Gutiérrez Melleado]*. Madrid. Obtenido de <http://e-spacio.uned.es/fez/view/tesisuned:IUGM-Jpastor>
- Pérez, F. (2021). *Conceptos generales en la gestión del mantenimiento industrial*. Bucaramanga, Universidad Santo Tomás. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/33276>
- Pery, E. (2011). *El mantenimiento en la armada*. Revista General de Marina.
- Polo, G. (2012). On maritime transport costs, evolution, and forecast. *Ciencia Y tecnología De Buques*, 5(10), 19-31. <https://doi.org/https://doi.org/10.25043/19098642.57>
- Porter, M. (2015). *La ventaja competitiva*. Patria.
- Quintero, J., & Sánchez, J. (2006). La cadena de valor: Una herramienta del pensamiento estratégico. *Telos*, 8(3), 377-389. Recuperado el 20 de abril de 2023, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=99318788001>
- Recamán, Á. (2018). *Industria 4.0. Una perspectiva desde la construcción naval militar*. Madrid: Revista General de Marina.
- Rozo-García, F. (2020). Revisión de las tecnologías presentes en la industria 4.0. *Revista UIS Ingenierías*, 19(2), 177-192. <https://doi.org/https://doi.org/10.18273/revuin.v19n2-2020019>
- Sánchez, D. (2020). *Análisis FODA o DAFO*. Bubok Publishing S.L.
- Sanz, D., Eiras, C., Fontela, Ó., Lamas, F., & Novoa, D. (2020). Recuperado el 13 de marzo de 2023, de <https://www.indracompany.com/>

https://www.indracompany.com/sites/default/files/deseid_2020_mantenimiento_predictivo_de_motores_de_buques_mediante_aprendizaje_automatico_soprene_1.pdf

Universidad de Cantabria. (2014). *Definición de alternativas estratégicas*.

VA CGA Bueno, G. (agosto-septiembre de 2018). *Implantación del concepto 4.0 en el apoyo logístico*. Madrid: Revista General de Marina.

VanDerHorn, e., & Mahadevan, S. (2021). Digital Twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision support systems*(145), 113524. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524>

Wang, N., Ren, S., Liu, Y., Yang, M., Wan, J., & Huisingh, D. (2020). An active preventive maintenance approach of complex equipment based on a novel product-service system operation mode. *Journal of Cleaner Production*(277), 11. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123365>

ANEXO I: Entrevista al CF Jefe del CESADAR



GUIÓN DE ENTREVISTA AL JEFE DEL CENTRO DE SUPERVISIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS DE LA ARMADA (CESADAR)

Objeto:

Complementar las fuentes de documentación del Trabajo de Fin de Máster de “Logística y Gestión Económica de la Defensa” sobre “La implementación del mantenimiento predictivo en la Armada” mediante una entrevista a personal con perfil estratégico destinado en el CESADAR.

Entrevistado:

Capitán de Fragata, Jefe del CESADAR D. Alejandro Cervantes Roca.

Entrevistador (alumno):

Capitán de Corbeta D. Alberto Font Franco.

Centro Universitario:

Universidad Complutense de Madrid.

Lugar y Fecha de la Entrevista:

En Cartagena a 20 de febrero de 2023.

1- ¿Qué barreras considera que pueden impedir o limitar el desarrollo y explotación del sistema de forma eficaz?

Principalmente de tres tipos: organizativo, de formación y presupuestario.

- Organizativo: es necesario incorporar el mantenimiento predictivo a los procedimientos ya existentes del sostenimiento en la Armada, desarrollar nuevos procesos de trabajo automatizados para aprovechar el potencial de los nuevos sistemas y definir el grado de clasificación y criterios de desclasificación oportunos para permitir su tratamiento en los sistemas que se definan.
- Formación: se deben incorporar los conceptos básicos relativos al mantenimiento predictivo, técnicas RCM y herramientas disponibles en la Armada en la enseñanza de formación y complementaria a todos los niveles, adaptando los planes de lección en lo necesario y dotando a las escuelas (ENM, Escaño) de acceso a los sistemas con fines formativos.
- Presupuestario: se necesita valorar el coste económico anual a consignar en el capítulo 6 de los presupuestos de la Armada y mantenerlo en el tiempo como un componente más del ACV de los sistemas asociados al mantenimiento predictivo, tanto en tierra como embarcados.

2- ¿Tiene conocimiento de la implantación del mantenimiento predictivo con técnicas de ML o similar en plataformas navales de terceros países?

Hasta dónde conozco, en el ámbito militar europeo somos pioneros en la implantación de estas técnicas.

3- ¿Qué factores positivos y favorables considera que pueden ser aprovechados para mejorar la ventaja tecnológica o competitiva?

Favorecer el trabajo de manera coordinada con universidades e industria en el desarrollo de nuevos modelos de IA y tecnologías habilitantes para la transformación digital. A esto, se podría añadir la colaboración con centros de investigación de otras administraciones.

ANEXO II: FMECA motor generador F-100

| FMECA MOTOR GEN. 1A F-100 | Id | 1 |
|--|--|--|
| DENOMINACIÓN (Bloque A) | Sistema | Motor generador |
| | Subsistema | Sistema de arranque |
| | Item | Aire comprimido |
| | Equipo | N/A |
| FUNCIÓN | Id. | |
| | Descripción | Aire de arranque del motor |
| FALLO FUNCIONAL (Bloque B) | Id. | |
| | Descripción | El cigüeñal no gira cuando se conecta el conmutador |
| | Repuestos asociados | N/A |
| | Visible/Oculto/Total/Parcial | |
| MODO DE FALLO – CAUSA (Bloque D) | Id. | |
| | Descripción | Baja presión de aire |
| EFECTO DE LOS FALLOS (Bloque C) | Descripción de efecto inmediato | El motor no arranca |
| | Descripción de consecuencias del efecto | Sistema eléctrico fuera de servicio |
| ESTADO MOTOR | Estado motor | Apagado/en Arranque |
| CONSECUENCIAS | Medio_Ambiente/Operacional/Coste/Seguridad | |
| DETECCIÓN (Bloque E) | Alarma-F100 | DG1A.start.air.pressure.al.lo |
| | Descripción de alarmas | Alarma de la Baja Presión de Aire de Arranque en DG1A |
| | Variable F100-10X | med[18][25] |
| | Variable F100 | DG1A.start.air.pressure |
| | Descripción de variables | Presión de aire de arranque en DG1A |
| | Variables directas/indirectas | Directa |
| | Valor nominal | 7 |
| | Valor tope rango | 6 |
| UDS | bar | |
| ÍNDICE DE PRIORIDAD DEL RIESGO ACTUAL | S | 15 |
| | O | 6 |
| | D | 3 |
| | NPR (Bloque F= SxOxD) | 270 |
| ACCIÓN (Bloque G) | Descripción | Revisar el sistema para comprobar si hay fugas. Revisar el funcionamiento del compresor de aire. Limpieza filtro aire. |

Fuente: CESADAR