



# **Proyección conceptual de la capacidad de apoyo al ciclo de vida del sistema de control de fuego “BARRACUDA”**

Capitán de Corbeta (ARC) Nestor Camilo Villota Bacca

Artículo para optar al título profesional:

Magister en Seguridad y Defensa Nacional

Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”

Bogotá D.C., Colombia

2025

DATOS GENERALES	
<b>Nombre del estudiante</b>	: Capitán de Corbeta (ARC) Nestor Camilo Villota Bacca
<b>Identificación</b>	: 1085247574
<b>Programa académico</b>	: Maestría en Seguridad y Defensa Nacional
<b>Tutor metodológico</b>	: Henry Mauricio Acosta Guzmán
<b>Tutor temático</b>	: Capitán de Fragata Cristian Jiménez Barrera
<b>Fecha de entrega</b>	: 26 de agosto de 2025
<b>Extensión</b>	: 7.328 palabras

#### DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD Y CESIÓN DE DERECHOS

El autor declara que este artículo fue escrito de acuerdo con la normatividad de la Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto” (ESDEG) y no existe ningún potencial conflicto de interés relacionado con este. Las posturas y aseveraciones presentadas son resultado de un ejercicio académico e investigativo que no representa la posición oficial ni institucional de la ESDEG, las Fuerzas Militares de Colombia o el Ministerio de Defensa Nacional.

Este artículo es enteramente mi propio trabajo y no ha sido presentado para la obtención de un título en esta u otra Institución de Educación Superior. Se han referenciado todos los trabajos y puntos de vista de otros autores, así como los datos de otras fuentes utilizadas. No se emplearon herramientas de generación de contenido por Inteligencia Artificial para su elaboración.

El autor acepta ceder los derechos de publicación en favor de la ESDEG y su Sello Editorial de acuerdo con los términos de la licencia Creative Commons: Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas.

#### AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

El autor autoriza que este artículo sea publicado por el Sello Editorial ESDEG en su repositorio institucional y esté disponible bajo una modalidad de acceso abierto.

# Proyección conceptual de la capacidad de apoyo al ciclo de vida del sistema de control de fuego “BARRACUDA”

## Conceptual projection of the life cycle support capability of the fire control system “BARRACUDA”

Nestor Camilo Villota Bacca<sup>1</sup>

Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”

**Resumen:** Este artículo presenta un modelo conceptual para optimizar el Apoyo al Ciclo de Vida (ACV) del sistema de control de fuego BARRACUDA, pilar de la capacidad de superficie de la Armada Nacional de Colombia. Mediante una metodología cualitativa exploratoria-descriptiva se diagnostican las brechas técnicas, logísticas y operativas del sistema, se analizan referentes internacionales y se incorpora la teoría de la optimización para diseñar una arquitectura ACV-ILS con mantenimiento predictivo basado en gemelos digitales, inteligencia artificial y estándares ISO 55000/OTAN. Las simulaciones muestran una posible reducción del 27 % en los costos de ciclo de vida y un aumento del 18 % en la disponibilidad, alcanzando 90 % tras la implementación gradual propuesta. La investigación concluye que el modelo fortalece la sostenibilidad operativa, reduce la dependencia tecnológica y traza una hoja de ruta factible de modernización naval, sirviendo de base para futuros pilotos y estudios de riesgo cibernético.

**Palabras clave:** Ciclo de vida; logística integrada; mantenimiento predictivo; gemelo digital; sistemas de control de fuego.

**Abstract:** This article presents a conceptual model to optimize the Life Cycle Support (LCS) of the BARRACUDA fire control system, a pillar of the surface capability of the Colombian Navy. Through a qualitative exploratory descriptive methodology, the technical, logistical, and operational gaps of the system are diagnosed, international references are analyzed, and optimization theory is

---

<sup>1</sup> Capitán de Corbeta de la Armada Nacional de Colombia. Estudiante de la Maestría en Seguridad y Defensa Nacional, Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”, Colombia. Magister en Logística y Transporte, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. Especialista en Política y Estrategia Marítima, Escuela Naval “Almirante Padilla”, Colombia. Especialista en Administración en Salud, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. Profesional en Administración Marítima y Portuaria, Escuela Naval “Almirante Padilla”, Colombia. Profesional en Ciencias Navales, Escuela Naval “Almirante Padilla”, Colombia. <https://orcid.org/0009-0004-7756-0417> - Contacto: [nestor.villota@esdeg.edu.co](mailto:nestor.villota@esdeg.edu.co).

## **Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”**

Bogotá D.C., Colombia

incorporated to design an ILS - LCS architecture with predictive maintenance based on digital twins, artificial intelligence, and ISO 55000/NATO standards. Simulations show a possible 27% reduction in life cycle costs and an 18% increase in availability, reaching 90% after the proposed gradual implementation. The research concludes that the model strengthens operational sustainability, reduces technology dependency, and outlines a feasible ship modernization roadmap, serving as a basis for future pilots and cyber risk studies.

**Keywords:** Life cycle; integrated logistics; predictive maintenance; digital twin; fire control systems.

## **Introducción**

Desde la modernización del sistema AEGIS (Advanced Electronic Guidance and Instrumentation Systemen) en la década de 1990, la bibliografía sobre sostenimiento de sistemas navales converge en una premisa: más del 60 % del costo total de un sistema de armas se genera después de su entrega (Harris & Fitzgerald, 2017). Los trabajos de Blanchard y Fabrycky (2011) y Roy (2020) demostraron que integrar la logística de apoyo en la fase de diseño puede ahorrar hasta un 30 % del Life-Cycle Cost (LCC). En la última década, la US Navy instituyó el programa Naval Sustainment System-Ship, elevando la disponibilidad de destructores en un 23 % mediante analítica predictiva (United States Navy, 2024). De forma paralela, la Royal Navy adoptó Condition-Based Maintenance Plus, y la Marina de Japón opera gemelos digitales de radar que reducen los tiempos de diagnóstico un 35 % (Li & Zhao, 2024; Marshall, 2024). En América Latina, la literatura es escasa; solo el caso de la Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval, Marítima y Fluvial (COTECMAR) identifica oportunidades de ILS (Integrated Logistics Support) en la industria colombiana (Casadiego Miranda et al., 2021).

El sistema de control de fuego “BARRACUDA”, diseñado y construido localmente entre el año 2010 al año 2017 por la Armada Nacional de Colombia, equipa a las Patrulleras Oceánicas y buques de apoyo logístico. No obstante, carece de un marco de Apoyo al Ciclo de Vida formal. Los reportes de la Jefatura de Material evidencian una disponibilidad promedio de 76 % y un MTTR (Mean Time To Repair ) de 8,4 horas (Armada Nacional de Colombia, 2019), inferiores al estándar OTAN de  $\geq 85$  % para

## **Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”**

Bogotá D.C., Colombia

sistemas de primera línea (NATO STO, 2024). La Doctrina de Material Naval cuerpo doctrinal de la Armada compuesto por cuatro tomos (Armada Nacional de Colombia, 2014a d) reconoce la urgencia de aplicar criterios de ciclo de vida en todos los proyectos institucionales, pero aún no establece procedimientos específicos para sistemas de armas optrónicos.

La Armada Nacional opera en un entorno caracterizado por amenazas híbridas, protección de infraestructura OFFSHORE y la exigencia de interoperar con socios de la OTAN y la JID (Joint Interoperability of Data). El Plan de Desarrollo Naval 2042 fija un horizonte de veinte años para contar con plataformas modernizadas y líneas logísticas autónomas, priorizando la estandarización y el sostenimiento inteligente (Armada Nacional, 2024). Dicho plan señala como desafío «definir e implementar el modelo de gestión de activos de la institución» y vincula la disponibilidad de sistemas de armas con la credibilidad estratégica del Estado.

En el corto plazo, las auditorías de la Dirección de Armamento Naval (2022) muestran tiempos de aprovisionamiento de tarjetas FPGA (Field Programmable Gate Array) superiores a 270 días. Esta brecha logística se amplifica por la obsolescencia de la cámara FLIR (Forward Looking Infrared), con un MTBF (Mean Time Between Failures) de 3.500 horas y la ausencia de un programa predictivo. La Doctrina de Material Naval, Tomo III: Mantenimiento enfatiza la transición del mantenimiento correctivo al preventivo y la importancia del análisis estadístico de repuestos para garantizar la eficiencia y prolongar la vida útil del material. Sin embargo, tales principios aún no se traducen en una arquitectura de datos que permita la analítica en tiempo real.

Los efectos se expresan en la capacidad de la flota para cubrir las áreas marítimas jurisdiccionales que representan más del 80 % de las exportaciones nacionales (Ministerio de Defensa Nacional, 2024) y en la percepción de aliados durante operaciones combinadas. A escala social, la menor cobertura incrementa el riesgo sobre corredores comerciales y ecosistemas estratégicos.

Académicamente, abordar esta problemática cierra un vacío de investigación regional sobre la aplicación de optimización multiobjetivo y gemelos digitales en sistemas navales, alineándose con la Política Nacional de CTel 2022-2031 (CONPES, 2021). Para la Armada Nacional, desarrollar un marco ACV-ILS robusto permitirá: (a) priorizar inversiones basadas en datos; (b) reducir la dependencia tecnológica mediante capacidades locales de mantenimiento; y (c) cumplir los objetivos de sostenimiento señalados en el Plan de Desarrollo Naval 2042.

A largo plazo, la propuesta promoverá la consolidación de la industria nacional, generará empleo de alta cualificación y posicionará a Colombia como referente regional en gestión logística naval. Además, se proyecta un incremento de la disponibilidad del “BARRACUDA” a  $\geq 90$  %, con una reducción del costo al ciclo de vida del 27 %, contribuyendo a una Armada «de proyección e influencia regional» (Armada Nacional de Colombia, 2024).

La optimización de la capacidad de apoyo al ciclo de vida del sistema de control de fuego “BARRACUDA” mediante la integración de un marco ILS basado en ISO 55000, mantenimiento predictivo soportado por gemelos digitales y algoritmos de optimización multiobjetivo— permitirá a la Armada Nacional de Colombia elevar la disponibilidad

operativa de su flota, reducir los costos totales de sostenimiento y generar autonomía tecnológica, constituyéndose en un referente regional de gestión logística naval.

Pese a estos avances, la Armada Nacional de Colombia carece de un marco conceptual que integre ACV-ILS y analítica avanzada de mantenimiento para el BARRACUDA. Este vacío científico-técnico motiva la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo optimizar la capacidad de apoyo al ciclo de vida del sistema de control de fuego BARRACUDA garantizando su sostenibilidad operativa y eficiencia técnica a largo plazo?

Este artículo responde a la pregunta mediante:

1. Un diagnóstico de capacidades y limitaciones del BARRACUDA en el entorno colombiano.
2. La revisión e identificación de modelos y tecnologías emergentes aplicables al apoyo al ciclo de vida en sistemas de defensa naval.
3. El diseño de un modelo conceptual de optimización basado en teoría de la optimización (Bazaraa et al., 2013) y enfoque de “Multi Objective Optimization” (Marler & Arora, 2004).
4. La propuesta de una senda de implementación del modelo conceptual propuesto.

## **Metodología**

El presente estudio adopta un enfoque cualitativo de diseño exploratorio-descriptivo, fundamentado en la necesidad de comprender integralmente las dinámicas técnicas, logísticas y organizacionales del sistema de control de fuego BARRACUDA dentro de su contexto institucional. Este enfoque es idóneo cuando se busca analizar

fenómenos complejos y multifactoriales que no pueden reducirse únicamente a variables cuantitativas, como la interacción entre sostenimiento, obsolescencia tecnológica y gestión de activos (Hernández-Sampieri et al., 2018).

La metodología se estructuró en cuatro fases interrelacionadas: (1) recolección sistemática de información, (2) procesamiento y codificación, (3) triangulación y modelado, y (4) validación y aseguramiento de la confiabilidad.

## **1. Recolección sistemática de información**

### ***a) Revisión bibliográfica***

Se desarrolló una revisión bibliográfica sistemática en las bases Web of Science, Scopus y Defense Technical Information Center (DTIC), abarcando publicaciones comprendidas entre los años 2010 y 2025. Las palabras clave empleadas incluyeron: Integrated Logistics Support, Life Cycle Cost, Predictive Maintenance, Digital Twin, Naval Fire-Control Systems, NSGA-II, Asset Management, y ISO 55000.

Los criterios de inclusión consideraron:

- Artículos revisados por pares, documentos técnicos de defensa, normas internacionales (OTAN, ISO) y estudios de caso en marinas con programas ILS.
- Fuentes en inglés y español con trazabilidad institucional y enfoque en sistemas navales o de armas.

Los criterios de exclusión abarcaron fuentes sin validación académica, publicaciones comerciales o no aplicables al entorno marítimo-militar.

La búsqueda arrojó 58 fuentes válidas, de las cuales 46 fueron analizadas en profundidad para construir la matriz de tendencias y el marco teórico del modelo conceptual propuesto.

***b) Análisis documental***

Se examinaron documentos institucionales primarios de la Armada Nacional de Colombia, incluyendo los cuatro tomos de la Doctrina de Material Naval (Armada Nacional de Colombia, 2014a–d), el Manual de Operación del Sistema BARRACUDA v 1.0 (2019), la Guía Rápida del Sistema de Armas BARRACUDA v 4.0 (2017) y reportes de mantenimiento correspondientes al período 2018–2024.

El análisis documental se organizó en una matriz de categorías técnicas (MTBF, MTTR, disponibilidad), logísticas (aprovisionamiento, repuestos) y operativas (interoperabilidad, sostenimiento). Para verificar la autenticidad y validez de los datos, se realizó un contraste cruzado con los registros de la Jefatura de Material (JEMAT) y la Dirección de Armas Navales y Electrónica (DIANE) de la Armada Nacional de Colombia.

***c) Entrevistas semiestructuradas***

Se aplicaron entrevistas semiestructuradas a cinco expertos: cuatro oficiales superiores y un suboficial técnico con más de diez años de experiencia en mantenimiento, logística y desarrollo de sistemas de armas navales.

El instrumento de entrevista se estructuró en cinco ejes temáticos:

1. Desafíos logísticos del ciclo de vida.
2. Oportunidades de la Logística 4.0.
3. Elementos del soporte logístico integrado (ILS).
4. Toma de decisiones basada en datos.

5. Requisitos de interoperabilidad y estandarización.

Las entrevistas, con una duración promedio de 45 minutos, fueron grabadas y transcritas con autorización previa mediante consentimiento informado. Los participantes conservaron el anonimato conforme a las directrices éticas del Ministerio de Defensa y la Escuela Superior de Guerra.

## **2. Procesamiento y análisis de datos**

Las transcripciones y documentos fueron codificados mediante análisis de contenido siguiendo la metodología de Bardin (2013), aplicando un proceso mixto de codificación abierta y axial. Para facilitar la gestión de categorías y la frecuencia de aparición de conceptos, se empleó el software NVivo 12 Plus.

Cada fuente fue clasificada bajo tres dimensiones analíticas:

- Técnica: desempeño del sistema, MTBF/MTTR, obsolescencia.
- Logística: cadena de suministro, repuestos críticos, costos.
- Operativa: disponibilidad, interoperabilidad y sostenibilidad institucional.

Los resultados de la codificación se sistematizaron en una matriz analítica cualitativa, de la cual emergieron los principales hallazgos presentados en la Tabla 4 del documento.

## **3. Triangulación y modelado**

La triangulación metodológica se realizó integrando los hallazgos de las tres fuentes:

1. Revisión bibliográfica internacional (para identificar modelos y estándares de referencia).

2. Análisis documental institucional (para establecer la línea base del sistema BARRACUDA).
3. Entrevistas cualitativas (para validar percepciones operativas y de gestión).

Esta triangulación permitió corroborar convergencias y divergencias entre la evidencia técnica y las apreciaciones del personal experto. Los resultados consolidados alimentaron el modelado conceptual en la herramienta Enterprise Architect, desde donde se estructuró la arquitectura del sistema ACV-ILS y la formulación del modelo de optimización multiobjetivo mediante el algoritmo NSGA-II, evaluando restricciones presupuestarias, cobertura de repuestos y niveles de capacitación técnica.

#### **4. Validación y confiabilidad**

La validez interna del estudio se garantizó mediante revisión por tres expertos externos en sostenimiento naval, quienes evaluaron la coherencia entre objetivos, categorías y hallazgos. Sus observaciones fueron integradas mediante un proceso iterativo de ajuste.

La confiabilidad del análisis cualitativo se comprobó mediante recodificación independiente de las entrevistas y documentos, obteniendo un índice Kappa de Cohen = 0,82, lo que indica un nivel de acuerdo “alto” según la clasificación de Landis & Koch (1977).

Asimismo, se cumplió con los principios éticos de confidencialidad, consentimiento informado y manejo seguro de la información técnica sensible, en conformidad con la Directiva 0006/2018 del Ministerio de Defensa Nacional sobre Protección de la Información Institucional.

## Objetivo 1. Analizar las capacidades actuales y limitaciones del sistema

### “BARRACUDA” en el contexto de las unidades de superficie.

#### 1.1 Análisis de capacidades actuales y limitaciones

##### 1.1.1 Capacidades Actuales

La Tabla 1 resume las capacidades técnicas, logísticas y operativas del BARRACUDA con base en 112 incidencias registradas entre los años 2020 y 2024.

**Tabla 1.** Matriz de diagnóstico del sistema barracuda (2020-2024)

Dimensión	Indicador	Valor actual	Brecha vs estándar OTAN	Fuente
Técnica	MTBF (h)	1 850	-17 %	Armada Nacional de Colombia (2019)
Logística	Nivel de llenado de repuestos críticos	68 %	-22 %	Armada Nacional de Colombia (2019)
Operativa	Disponibilidad promedio	76 %	-14 %	Datos de flota
Costo	Costo soporte/operación anual (USD)	2,4 M	+28 %	CONPES 4069 (2021)

Las principales limitaciones identificadas son: (a) fabricante descontinuado en 2016, (b) tiempos de aprovisionamiento > 9 meses para tarjetas FPGA, y (c) carencia de un programa formal de mantenimiento predictivo.

##### 1.1.2 Especificaciones técnicas clave del sistema BARRACUDA

**Tabla 2.** Parámetros técnicos principales

<b>Componente</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Fuente</b>	
Cañón 40 mm L/70 (Breda Twin)	Cadencia de tiro	300 disparos/min †	Manual de operación sistema BARRACUDA V 1.0 pp. 3-4	
	Velocidad inicial	1 000 m s <sup>-1</sup>	Manual de operación sistema BARRACUDA V 1.0 p. 4	
	Alcance máximo horizontal	12 600 m	Manual de operación sistema BARRACUDA V 1.0 p. 4	
	Alcance hasta autodestrucción	4 670 m	Manual de operación sistema BARRACUDA V 1.0 p. 4	
	Tiempo de combustión trazador	5 s	Manual de operación sistema BARRACUDA V 1.0 p. 4	
	Director QUAD	Zoom óptico CCD	22 ×	Manual de operación sistema BARRACUDA V 1.0 p. 12
		Zoom óptico FLIR	12.5 ×	Manual de operación sistema BARRACUDA V 1.0 p. 12
Alcance eficaz del telémetro		10 000 m	Manual de operación sistema BARRACUDA V 1.0 p. 10	

Dynamic T12	Sector de ronza	300°	Manual de operación sistema BARRACUDA V 1.0 p. 5
	Rango de elevación	-20° a +50°	Manual de operación sistema BARRACUDA V 1.0 p. 5
	Velocidad de elevación	17 rpm	Manual de operación sistema BARRACUDA V 1.0 p. 5
Consola HMI	Grado de protección	IP 53	Manual de operación sistema BARRACUDA V 1.0 p. 23
	Peso operativo	250 kg	Manual de operación sistema BARRACUDA V 1.0 p. 23

*Nota No.1.†* Valor por tubo; el montaje Breda Twin incorpora dos tubos.

*Nota No. 2.* La Tabla 2 sintetiza las prestaciones principales del sistema extraídas del *Manual de operación Sistema BARRACUDA* (Armada Nacional de Colombia, 2019) y de la *Guía rápida sistema de armas BARRACUDA v 4.0* (Armada Nacional de Colombia, 2017).

### **1.1.3 Limitaciones identificadas**

El diagnóstico revela tres limitaciones críticas:

1. Obsolescencia tecnológica:
  - La cámara FLIR presenta un MTBF de 3.500 horas, por debajo de los sistemas de tercera generación, lo que aumenta las intervenciones de mantenimiento no programado.
2. Brechas logísticas:

- Los tiempos de aprovisionamiento de tarjetas FPGA superan los 270 días, generando paradas prolongadas que afectan la tasa de alistamiento.
  - La gestión de repuestos carece de un sistema de analítica predictiva que anticipe fallas recurrentes y optimice la reposición.
3. Ausencia de mantenimiento predictivo estructurado:
- El sistema no está integrado a una arquitectura de datos que capture en tiempo real parámetros clave (vibración, temperatura, consumo eléctrico) para alimentar modelos de pronóstico.
  - Esto limita la transición del mantenimiento correctivo al preventivo/predictivo, tal como lo plantea la Doctrina de Material Naval, Tomo III.

#### ***1.1.4 Conexión con el entorno estratégico y operacional***

En un entorno caracterizado por amenazas híbridas, operaciones combinadas con socios OTAN/JID y protección de infraestructura OFFSHORE, las limitaciones descritas no solo representan un desafío técnico, sino un riesgo estratégico. Una disponibilidad inferior al estándar OTAN erosiona la capacidad de respuesta inmediata frente a incursiones aéreas o de superficie, reduce la credibilidad disuasiva y afecta la interoperabilidad en ejercicios multinacionales.

Además, la alta dependencia de repuestos importados y de proveedores únicos expone al sistema a vulnerabilidades en la cadena de suministro global, agravadas por tensiones geopolíticas y restricciones comerciales.

#### ***1.1.5 Análisis cualitativo de entrevistas***

Como parte del desarrollo metodológico de este artículo, se aplicaron entrevistas semiestructuradas a cinco expertos con experiencia directa en sistemas de armas navales, logística militar y tecnologías aplicadas al mantenimiento de sistemas complejos. El propósito fue obtener insumos cualitativos sobre los desafíos logísticos, las oportunidades de la logística 4.0, los elementos críticos del ILS, los factores clave para la toma de decisiones en tiempo real y las necesidades de interoperabilidad en el contexto del sistema de control de fuego “BARRACUDA”.

El análisis de las entrevistas se estructuró en una matriz cualitativa que permitió agrupar las respuestas bajo categorías analíticas predefinidas y vincularlas con los objetivos específicos del estudio. Los principales hallazgos se resumen a continuación:

#### *1.1.5.1 Desafíos logísticos asociados al ACV*

Los entrevistados coincidieron en que uno de los principales desafíos logísticos reside en la ausencia de una estructura organizacional diferenciada que delimite claramente los roles de desarrollo, validación, sostenimiento, manuales adecuados de usuario, manuales adecuados para el mantenimiento, manuales de entrenamiento, listado actualizado de partes (repuestos) y operación del sistema. Este vacío genera ineficiencias en el ciclo de vida del sistema y dificulta la trazabilidad técnica y administrativa de los procesos. Asimismo, se evidenció una marcada dependencia tecnológica de proveedores extranjeros y una escasez crítica de personal técnico capacitado, especialmente en niveles avanzados de mantenimiento y desarrollo de software. Estos factores comprometen la sostenibilidad operativa del sistema BARRACUDA.

#### *1.1.5.2 Oportunidades de la logística 4.0*

La integración de tecnologías emergentes como el *Internet of Things* (IoT), big data, machine learning y gemelos digitales fue identificada como una oportunidad estratégica para optimizar el mantenimiento predictivo, el soporte remoto y la toma de decisiones operacionales. No obstante, también se señaló la necesidad de mejorar la calidad, disponibilidad y gestión de los datos para que estas herramientas tengan un impacto efectivo. La posibilidad de anticipar fallas y planificar mantenimientos con base en evidencia empírica representa una evolución significativa respecto a los esquemas actuales de mantenimiento correctivo o preventivo convencional.

#### *1.1.5.3 Elementos fundamentales del ILS*

El diseño e implementación de un sistema de ILS efectivo requiere, según los expertos, no solo de infraestructura tecnológica adecuada (sensorización, conectividad segura y bases de datos integradas), sino también de un alineamiento organizacional que garantice la apropiación del sistema a todos los niveles. La resistencia al cambio, la delegación excesiva de responsabilidades y la falta de cultura analítica dentro del personal operativo y administrativo fueron identificadas como barreras persistentes que deben ser superadas mediante formación y reestructuración interna.

#### *1.1.5.4 Toma de decisiones basada en datos*

Los entrevistados destacaron que la simulación mediante gemelos digitales, la disponibilidad de sensores y la integración de analítica predictiva son factores esenciales para robustecer la toma de decisiones en tiempo real. Estas herramientas permitirían no solo optimizar los ciclos de mantenimiento, sino también validar configuraciones tácticas, probar nuevas funcionalidades y reducir la incertidumbre operativa, fortaleciendo así la capacidad de respuesta de las unidades navales.

*1.1.5.5 Requisitos de interoperabilidad*

Finalmente, se identificó la necesidad de adoptar una arquitectura modular y escalable del sistema BARRACUDA, que permita su integración con diferentes tipos de plataformas (fragatas, patrulleras oceánicas, nodrizas fluviales, entre otras) y con sistemas de aliados estratégicos. La interoperabilidad debe ser entendida no solo desde un enfoque técnico, sino también desde una perspectiva doctrinal y organizacional. Se requiere estandarizar interfaces, lenguajes de programación y protocolos de comunicación para asegurar una integración fluida en operaciones conjuntas y combinadas.

**Tabla 4.** Matriz de análisis cualitativo de las entrevistas

<b>Pregunta</b>	<b>Categorías de análisis</b>	<b>Resumen de la respuesta del entrevistado</b>	<b>Citas textuales clave</b>	<b>Vinculación con objetivos del artículo</b>
No.1 Desafíos logísticos	Sostenibilidad, interoperabilidad, mantenimiento, capacitación	Falta de roles diferenciados para desarrollo, validación y mantenimiento; estructuras jerárquicas ineficaces dentro de la Armada.	‘El principal desafío es tener falta de conocimiento por parte de la organización en este tipo de desarrollos... deben ser transversales entre sí para que las cosas funcionen’	Objetivo específico 1 (Evaluar desafíos logísticos del ACV)
No.2 Oportunidades de Logística 4.0	Big data, IoT, mantenimiento predictivo, inteligencia artificial	Integración de datos vía IoT, uso de machine learning para predicción de fallos, valor estratégico de los datos, utilidad de gemelos digitales.	‘El activo más valioso son los datos... el gemelo digital es la apuesta más ganadora en términos logísticos’	Objetivo específico 2 (Explorar beneficios de tecnologías emergentes)

## Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”

Bogotá D.C., Colombia

---

No.3 Elementos del ILS	Documentación técnica, soporte en tiempo real, cadena de suministro	Relevancia de IoT, ciberseguridad, y conectividad para soporte técnico. La documentación técnica es crítica pero vulnerable si no hay integración desde el diseño.	‘Manejo de los datos, ciberseguridad... conectividad fluida y eficiente entre dispositivos IoT’	Objetivo específico 3 (Diseñar un modelo conceptual de apoyo al ACV)
No.4 Toma de decisiones	Automatización, sensores, visualización táctica	Para un futuro, el sistema podría incluir el análisis automatizado de datos que permitiría mejorar decisiones tácticas y estratégicas; el gemelo digital soporta simulación previa a la implementación real.	‘Al ser probados virtualmente, y llevarlos a un escenario real... la curva de incertidumbre disminuye’	Objetivo específico 2 (Mejorar toma de decisiones en tiempo real)
No.5 Interoperabili dad	Estándares, escalabilidad, doctrina común, modularidad	El sistema debe permitir integración modular y adaptarse a diferentes plataformas navales sin comprometer su eficiencia. Se necesita doctrina común para facilitar su aplicación.	‘Administrativamente el uno no debe depender del otro... deben ser transversales’	Objetivo específico 4 (Asegurar integración del sistema en diversas plataformas)

---

*Fuente:* Elaboración propia

### 1.2 Limitaciones encontradas al interior de la Armada Nacional

Es importante resaltar que otras limitaciones presenta la Armada Nacional de Colombia con base en el análisis cualitativo de las entrevistas realizadas a un grupo de expertos en sistemas de armas navales, gestión de su soporte y mantenimiento al interior de la institución. De esa manera, se plasman los siguientes hallazgos que contrasto con otros casos similares en marinas del mundo, así:

### ***1.2.1 Roles y Estructura Organizacional***

La diferenciación clara de roles—desarrollo, validación y sostenimiento—es esencial para optimizar procesos. (Barreto, 2025) Enfatiza que, sin estas distinciones, “los tiempos de respuesta se extienden y se diluye la rendición de cuentas”. En la Armada Nacional de Colombia, esta superposición ha generado duplicidad de actividades y retrabajos. Un ejemplo complementario proviene de la Royal Australian Navy, donde la reestructuración de responsabilidades redujo el ciclo de mantenimiento en un 18 % en el primer año (Smith & Nguyen, 2022).

### ***1.2.2 Gestión y Calidad de Datos***

La gestión de datos de sensores y registros de mantenimiento permite implementar mantenimiento predictivo. (Pedraza, 2025) apunta que “sin información confiable no es posible anticipar fallas ni planificar adquisiciones con oportunidad”. Desde 2022 hasta 2025, el MTBF promedio fue de 7,8 meses y el MTTR de 4,2 meses, con picos estacionales: el MTTR alcanzó 5,1 meses en el segundo trimestre de 2024 frente a 3,8 meses en el cuarto trimestre de 2023. La U.S. Coast Guard logró reducir MTTR a 3,0 meses tras integrar análisis de series temporales (Jones et al., 2023).

### 1.2.3 Dependencia Tecnológica y Provisión de Repuestos

La falta de proveedores locales y la obsolescencia de componentes importados encarece y retrasa la logística. (Franco, 2025) reporta demoras de hasta seis meses, impactando la disponibilidad en un 15 % anual. La Marina Española redujo tiempos de entrega a 2 meses y costos unitarios en 9 % mediante contratos marco con múltiples proveedores (García & López, 2021).

### 1.2.4 Talento Humano y Capacitación Continua

La escasez de ingenieros especializados en ILS, IoT y ciberseguridad frena la evolución del sistema. (Vizcaíno, 2025) Propone formación mixta; la Royal Navy incrementó su disponibilidad en un 15 % tras un año de programas de 120 horas. En la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA), un curso en gemelos digitales elevó la eficiencia de diagnóstico en un 22 % (Tanaka et al., 2024).

#### Figura 1. Términos de referencia

- 
- **MTBF (Mean Time Between Failures):** Tiempo promedio transcurrido entre dos fallas sucesivas. Se calcula como:  $MTBF = \frac{T_{total\ operation}}{N_{failures}}$
  - **MTTR (Mean Time To Repair):** Tiempo promedio requerido para reparar un sistema tras una falla:  $MTTR = \frac{\sum_{i=1}^N t_{repair,i}}{N}$
  - **Inverted Generational Distance (IGD):** Métrica que cuantifica la distancia entre el frente de Pareto obtenido y el óptimo de referencia:  $IGD = \frac{1}{|P^*|} \sum_{x \in P^*} d(x, P)$
-

## **Objetivo 2. Identificar modelos y tecnologías emergentes aplicables al apoyo al ciclo de vida en sistemas de defensa naval.**

La identificación de modelos y tecnologías emergentes en el ámbito del ACV es esencial para que las marinas contemporáneas mantengan la disponibilidad operativa de sus sistemas de armas, optimicen costos y fortalezcan su autonomía logística. Este objetivo no solo implica una revisión de soluciones ya implementadas en otras armadas, sino también el análisis de su transferibilidad y adaptación a la realidad colombiana, marcada por limitaciones presupuestarias, dependencia tecnológica externa y la necesidad de cumplir estándares OTAN/JID.

La integración de técnicas avanzadas de ILS, mantenimiento predictivo y herramientas digitales ofrece un marco para reducir la brecha que actualmente presenta la Armada Nacional en la gestión del BARRACUDA. El análisis que sigue conecta experiencias internacionales y regionales, resaltando el valor de cada modelo y su posible aporte a la flota colombiana.

### **2.1 Casos piloto y estudios de implementación**

#### **2.1.1 Técnica CILS-TAT – aplicado a la U.S. Navy**

(Arnold, 2013) Analiza la CILS-TAT (Continuous Integrated Logistics Support – Targeted Allowancing Technique), implementada en buques de la U.S. Navy como un mecanismo para ajustar de forma dinámica los niveles de inventario de repuestos críticos. Este modelo logró:

- Reducción del 12 % en costos de repuestos tras un año.
- Disminución del 25 % en stock-out crítico.

La clave de este resultado radica en un ciclo cerrado de retroalimentación entre datos operativos y planificación logística, optimizando la reposición con base en patrones reales de consumo y no en estimaciones genéricas. En el contexto colombiano, un esquema similar permitiría reducir los tiempos de aprovisionamiento para componentes como las tarjetas FPGA del sistema BARRACUDA, acortando las ventanas de indisponibilidad.

### ***2.1.2 Caso COTECMAR – aplicado a la Industria naval colombiana***

El estudio de (Casadiego Miranda et al. 2021) documenta la implementación de un ILS centrado en logística inversa y trazabilidad de piezas en la construcción de buques de desembarco.

Resultados destacados:

- Mejora del 18 % en el Global Dependability Performance Index (GDPI).
- Fortalecimiento de la capacidad local para fabricar y reacondicionar componentes.

La experiencia de COTECMAR demuestra que es posible adaptar marcos ILS a contextos latinoamericanos, siempre que exista un flujo de datos fiable y colaboración con proveedores nacionales. En el caso del BARRACUDA, esto abriría la puerta a la fabricación local de piezas no críticas y a la reducción de la dependencia de importaciones.

### ***2.1.3 Digital Twin en astilleros – aplicado a la U.S. Navy***

El Defense Science Board (2024) describe el Digital Twin Shipyard de la U.S. Navy, donde la réplica virtual de sistemas permite:

- Simular mantenimientos predictivos con 30 % menos fallas imprevistas.

- Optimizar la secuencia de órdenes de trabajo, reduciendo tiempos de espera en un 20 %.

Este enfoque demuestra el potencial de los gemelos digitales para ILS en plataformas navales. El Defense Science Board (2024) describe el “Digital Twin Shipyard” de la U.S. Navy, donde cada sistema cuenta con una réplica virtual que, al aplicarla en sistemas como el BARRACUDA, permitiría probar virtualmente intervenciones de mantenimiento antes de ejecutarlas en el equipo real, minimizando riesgos y paradas no programadas.

#### ***2.1.4 Tecnologías transaccionales***

Los avances en blockchain para trazabilidad logística (Choi & Kim, 2022) aportan seguridad y transparencia, asegurando que cada evento de mantenimiento o reposición quede registrado de forma inalterable.

A su vez, la integración de sensores IoT en puntos críticos del sistema facilita la captura continua de variables como temperatura, vibración o consumo eléctrico, alimentando algoritmos de IA para detección temprana de anomalías (Marshall, 2024). Este binomio blockchain–IoT proporciona un ecosistema confiable y seguro para la gestión predictiva del ciclo de vida.3.2.2 Buenas prácticas internacionales de ACV en sistemas de control de fuego.

#### **2.1 Casos donde se implementaron sistemas combinados**

A continuación, en la Tabla 3, se presenta un resumen de diferentes marinas del mundo en donde se ha realizado la aplicación combinada de sistemas inteligentes enfocados en la gestión logística de sus bienes y equipos, impactando directamente en su gestión del ciclo de vida.

**Tabla 3.** Buenas prácticas internacionales de ACV en sistemas de control de fuego

<b>Marina</b>	<b>Herramienta clave</b>	<b>Resultado reportado</b>	<b>Referencia</b>
US Navy	Naval Sustainment System-Ship (NSS-Ship) & big data	+23 % disponibilidad	United States Navy (2024)
Royal Navy	Condition-Based Maintenance Plus (CBM+)	-18 % costos LCC	NATO STO (2024)
JASDF	Gemelos digitales de radar antiaéreo	Tiempo de diagnóstico -35 %	Li & Zhao (2024)
PLAN	Plataforma logística inteligente ‘Blue Supply’	Abastecimiento en zona A2/AD	Behind the Fleet (2025)

*Fuente:* elaboración propia

Ahora lo que esta tabla nos evidencia es que las prácticas en donde la combinación de la analítica avanzada, sensorización y modelos logísticos inteligentes generan mejoras simultáneas en disponibilidad y costos, algo directamente alineado con los objetivos de modernización de la Armada Nacional de Colombia, acorde con su plan de Desarrollo Naval al año 2042.

Si llevamos este comparativo de estos modelos internacionales y regionales, revela un patrón común: la centralidad del dato y su análisis en tiempo real para la toma de decisiones logísticas. Mientras la U.S. Navy y la Royal Navy capitalizan su infraestructura digital avanzada, el caso COTECMAR muestra que en contextos con recursos limitados también es posible alcanzar mejoras significativas mediante la integración de ILS y procesos de trazabilidad adaptados.

Para el sistema BARRACUDA, la adopción de estos modelos —especialmente digital twins, CBM y blockchain, permitiría:

- Reducir el tiempo medio de reparación (MTTR).
- Anticipar fallas críticas.
- Incrementar la disponibilidad operativa a  $\geq 90$  %.
- Disminuir la dependencia de proveedores únicos.

En síntesis, el análisis comparativo confirma que la adaptación estratégica de modelos y tecnologías emergentes es un catalizador clave para cerrar la brecha logística y tecnológica que enfrenta la Armada Nacional, asegurando un ACV más eficiente, seguro y autónomo.

### **Objetivo 3. Diseño del modelo conceptual adaptado a las necesidades operativas y logísticas de la Armada Nacional de Colombia.**

El diseño del modelo conceptual adaptado a las necesidades operativas y logísticas de la Armada Nacional de Colombia responde a la necesidad de superar las limitaciones técnicas, logísticas y organizacionales detectadas en el análisis del sistema de control de fuego BARRACUDA. Este modelo se concibe como un marco integrador que articula estándares internacionales, tecnologías emergentes y prácticas de gestión de activos para garantizar un Apoyo al Ciclo de Vida (ACV) eficiente, sostenible y alineado con la doctrina y proyección estratégica de la Armada Nacional de Colombia.

La arquitectura propuesta (Figura 2) se compone de cinco módulos interdependientes que, en conjunto, conforman una plataforma de gestión integral. Cada

módulo aborda un área crítica para la disponibilidad y sostenibilidad del sistema, mientras que su integración garantiza sinergias que maximizan los resultados. La estructura se fundamenta en referentes como la norma ISO 55000 para gestión de activos, el concepto de Integrated Logistics Support (ILS) desarrollado por la OTAN, y la experiencia documentada en marinas como la U.S. Navy y la Royal Navy (Blanchard & Fabrycky, 2011; NATO STO, 2024).

### **3.1 Arquitectura de los módulos**

#### ***3.1.1 Módulo 1 – Gestión de Activos bajo norma ISO 55000***

La gestión de activos según ISO 55000 proporciona un marco estandarizado para administrar de manera óptima el ciclo de vida de los sistemas, priorizando el equilibrio entre desempeño, costo y riesgo (ISO, 2014). Su incorporación en el modelo conceptual del BARRACUDA permite:

- Estandarizar los procesos de mantenimiento, aprovisionamiento y renovación de componentes.
- Definir indicadores clave como el “Asset Performance Index” y el “Cost per Operating Hour”, facilitando la medición objetiva del rendimiento.
- Integrar la planificación estratégica con la táctica, asegurando que las decisiones de inversión estén respaldadas por datos y análisis de riesgos.

En la Armada Nacional de Colombia, esta gestión estructurada de activos permitiría reducir la dependencia de decisiones reactivas, reemplazándolas por una planificación proactiva basada en pronósticos y priorización de activos críticos.

#### ***3.1.2 Módulo 2 – Mantenimiento Predictivo con Inteligencia Artificial***

El mantenimiento predictivo es la evolución natural del mantenimiento preventivo, incorporando tecnologías de análisis de datos en tiempo real y algoritmos de inteligencia artificial para detectar patrones de degradación antes de que se produzca la falla (Marshall, 2024).

En el contexto del BARRACUDA, este módulo incluiría:

- Sensores IoT para monitorear vibraciones, temperatura, consumo eléctrico y otros parámetros críticos de los módulos de radar y cámaras FLIR.
- Algoritmos de *machine learning* entrenados con datos históricos para identificar señales tempranas de desgaste.
- Integración con el plan de mantenimiento ILS, priorizando intervenciones en función del riesgo y el impacto operativo.

Estudios de la U.S. Navy demuestran que la implementación de mantenimiento predictivo puede reducir hasta un 30 % las fallas no programadas y aumentar la disponibilidad de sistemas críticos en más de un 15 % (United States Navy, 2024).

### ***3.1.3 Módulo 3 – Integrated Logistics Support (ILS) Colaborativo***

El ILS colaborativo es un enfoque integral de la logística que asegura que todos los elementos de soporte —repuestos, documentación técnica, entrenamiento y herramientas— estén disponibles y coordinados a lo largo del ciclo de vida del sistema (Blanchard & Fabrycky, 2011).

En la propuesta para el BARRACUDA, la colaboración no se limita a las unidades operativas, sino que se extiende a:

## **Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”**

Bogotá D.C., Colombia

- Proveedores nacionales e internacionales.
- Astilleros como COTECMAR, responsables de reparaciones y modernizaciones.
- Centros de entrenamiento técnico de la Armada Nacional de Colombia, para asegurar la actualización continua de competencias.
- La Dirección de Doctrina de la Armada Nacional de Colombia, para estandarizar los procedimientos específicos para este tipo de sistemas o cualquier sistema en general.
- Mayor apoyo y supervisión del desarrollo, uso y sostenimiento del sistema en mención por parte de la Jefatura de Material Naval, la Jefatura de Operaciones Logísticas y el comando de la Flota Naval.

Este enfoque colaborativo reduciría los tiempos de aprovisionamiento, que actualmente pueden superar los 270 días para ciertos componentes críticos, y permitiría establecer acuerdos de soporte a largo plazo con cláusulas de disponibilidad garantizada.

### ***3.1.4 Módulo 4 – Analítica de Costos de Ciclo de Vida (LCC)***

El análisis de los costos del ciclo de vida es fundamental para evaluar el impacto económico de cada decisión técnica y logística. En el modelo propuesto, este módulo:

- Integra datos históricos de costos con proyecciones de mantenimiento, modernización y sustitución de componentes.
- Permite ejecutar simulaciones de escenarios para evaluar alternativas de inversión.
- Utiliza métricas como el Cost Effectiveness Index para determinar el retorno de la inversión de cada intervención.

Aplicando este enfoque, las simulaciones iniciales muestran una reducción del LCC proyectado de USD 60 M a USD 44 M en un horizonte de 25 años, equivalente a un ahorro del 27 %.

### ***3.1.5 Módulo 5 – Ciberseguridad según OTAN STANAG 4774***

En un entorno operacional donde los sistemas de control de fuego dependen de redes de datos, la ciberseguridad es un componente esencial del ACV. El estándar OTAN STANAG 4774 (*Standardization Agreement OTAN 4774*) establece lineamientos para proteger la integridad y confidencialidad de la información en sistemas militares.

En el BARRACUDA, este módulo contemplaría:

- Segmentación de redes para aislar el tráfico de control de fuego de otras redes de a bordo.
- Cifrado de extremo a extremo en transmisiones de datos logísticos y técnicos.
- Monitoreo continuo de eventos para detección temprana de intrusiones.

La incorporación de estas medidas no solo protege la operatividad del sistema, sino que también asegura el cumplimiento de requisitos de interoperabilidad con fuerzas aliadas.

### ***3.1.6 Integración mediante optimización multiobjetivo***

La interacción de los cinco módulos se formaliza en un problema de optimización multiobjetivo, que busca simultáneamente mediante la resolución de la aplicación del algoritmo NSGA-II para obtener el frente de Pareto, lo que permite identificar soluciones balanceadas que no sacrifican disponibilidad por ahorro excesivo ni viceversa.

**Figura 2.** Problema de optimización multiobjetivo:

---

$$\min\{C_{LCC}(x), 1/\text{Disponibilidad}(x)\}$$

---

*Nota:* Elaboración propia con base en (Blanchard & Fabrycky 2011) y (Marshall 2024).

donde:

- $C_{LCC}(x)$  es el costo de ciclo de vida como función de las variables de decisión  $x$ .
- $1/\text{Disponibilidad}(x)$  traduce el objetivo de maximizar disponibilidad en un objetivo de minimización.
- $x$  incluye decisiones sobre inventario de repuestos, frecuencia de mantenimiento y nivel de automatización de procesos.

### 3.1.6.1 Restricciones operativas

El problema se formuló con restricciones realistas para la Armada Nacional de Colombia:

- Presupuesto anual  $\leq$  USD 1,8 M (ajustado a promedios históricos de inversión en sostenimiento del BARRACUDA).
- Cobertura de repuestos críticos  $\geq$  90 % (garantiza resiliencia ante fallas de componentes clave como FPGA y módulos de radar).
- Nivel de capacitación técnica  $\geq$  85 % (asegura que el personal pueda ejecutar el modelo predictivo y la integración ILS sin depender exclusivamente de asistencia externa).

### 3.1.6.2 Resultados esperados y conexión estratégica

La solución seleccionada del frente de Pareto muestra un ahorro proyectado del 27 % en LCC (de USD 60 M a USD 44 M en 25 años) y un incremento en disponibilidad hasta el 90 %, cumpliendo con el estándar OTAN para sistemas de primera línea. Además, este modelo no se limita a resolver problemas técnicos, pues se integra con los objetivos de

sostenibilidad y modernización definidos por la Armada Nacional de Colombia en el Plan de Desarrollo Naval 2042, fortalece la autonomía tecnológica y apoya la política nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (CONPES, 2021). Además, su modularidad asegura que pueda evolucionar con la incorporación de nuevas tecnologías como gemelos digitales avanzados, sensores inteligentes de nueva generación o protocolos de ciberseguridad más estrictos.

#### **Objetivo 4. Estrategia de implementación progresiva**

La implementación del modelo conceptual BARRACUDA ACV requiere una planificación escalonada que permita a la Armada Nacional maximizar beneficios en disponibilidad y costos, mientras se minimiza el riesgo operativo y se respeta el marco presupuestario asignado a un año fiscal. Esta estrategia reconoce que, como institución pública, la Armada Nacional de Colombia enfrenta restricciones normativas en contratación, limitaciones presupuestarias anuales y una estructura jerárquica que exige fases de validación técnica antes del despliegue a gran escala.

El enfoque propuesto sigue un modelo de madurez tecnológica TRL (Technology Readiness Level) adaptado a sistemas navales, iniciando en TRL 3 y proyectando alcanzar TRL 7 en un periodo de 24 meses (aproximadamente con posibilidad de ser ajustado en caso de imprevistos a los cuales están sujetos cualquier tipo de proyecto en general). Esta progresión asegura que las capacidades validadas en laboratorio y prototipo sean sometidas a pruebas operativas controladas antes de su integración plena en la flota, reduciendo el riesgo de fallas en condiciones reales.

Ahora bien, el periodo de implementación de 24 meses obedece a la necesidad de alinear el proyecto con las condiciones reales de la Armada Nacional de Colombia y el contexto administrativo del país. En primer lugar, los procesos de contratación pública establecidos por la Ley 80 de 1993 y su normativa complementaria requieren plazos más amplios que los considerados inicialmente, ya que la preparación de pliegos, la evaluación de propuestas y la formalización de contratos suelen extenderse más allá de los tiempos teóricos. En segundo lugar, la capacidad de absorción tecnológica del personal técnico y operativo demanda un margen suficiente para asimilar los nuevos procedimientos, realizar adiestramientos especializados y validar competencias, todo sin afectar la disponibilidad operativa de las unidades en misión. Asimismo, prolongar la fase de piloto permite evaluar el modelo en diferentes escenarios operacionales y condiciones climáticas, lo que incrementa la confiabilidad de los resultados y reduce la probabilidad de ajustes correctivos posteriores. Finalmente, distribuir la ejecución en dos años fiscales optimiza la viabilidad financiera del proyecto, evitando concentrar la inversión en un único periodo y facilitando la aprobación y ejecución de recursos. De esta manera, el calendario de veinticuatro meses no solo es más realista y sostenible, sino que también fortalece la probabilidad de éxito en la transición del modelo desde su validación conceptual hasta su plena adopción operacional.

#### **4.1 Fases de implementación.**

- Fase 1 – Revisión bibliográfica ampliada (Mes 1-2)

Se inicia con una búsqueda y análisis exhaustivo de literatura técnica, doctrinal y normativa en ACV, ILS y tecnologías aplicadas a sistemas navales. El

objetivo es consolidar un repositorio con al menos 40 nuevas fuentes especializadas, alineadas con estándares OTAN y prácticas internacionales. Esta base documental sustenta las decisiones de diseño y asegura la coherencia técnica del modelo.

- Fase 2 – Diagnóstico técnico en unidades (Mes 3-5)  
Equipos técnicos y logísticos visitan las unidades de superficie para elaborar una matriz de capacidades y brechas del sistema BARRACUDA. Esta información establece la línea base de indicadores (baseline) y permite priorizar acciones, avanzando del TRL 3 (validación de concepto) hacia el TRL 4 (validación en entorno relevante).
- Fase 3 – Desarrollo y validación del digital twin prototipo (Mes 6-11)  
Se desarrolla una réplica virtual del sistema que simula fallas, permite probar estrategias de mantenimiento predictivo y validar algoritmos de optimización sin interrumpir la operación real. El criterio de éxito es alcanzar una correlación  $\geq 95\%$  entre el comportamiento simulado y el real. Esta fase consolida el TRL 5 (validación de prototipo en entorno simulado).
- Fase 4 – Plan ILS y contratación (Mes 12-15)  
Con los resultados del prototipo, se diseña un Plan de ILS que defina políticas de gestión de repuestos, adaptación de instalación y sensorización para gestión inteligente de partes, adquisición de software especializado, integración de la generación de datos y análisis de estos, generación de procedimientos de capacitación y acuerdos de soporte. En esta fase se gestionan y formalizan los

requerimientos del talento humano necesario, así como el desarrollo de los procesos de contratación necesarios y convenios con proveedores expertos en el campo de injerencia para el éxito del proyecto, cumpliendo con la normatividad de contratación pública (Ley 80/1993 y decretos reglamentarios), alcanzando TRL 5 avanzado.

- Fase 5 – Capacitación y pruebas controladas (Mes 16-18)

Se capacita al personal técnico y a los operadores en el uso de las nuevas herramientas y protocolos. El objetivo es que al menos el 80 % del personal apruebe la certificación técnica. Esto garantiza que las capacidades adquiridas sean operadas internamente, reduciendo la dependencia externa.

- Fase 6 – Evaluación piloto en entorno real (Mes 19-22)

Se selecciona una unidad de superficie para aplicar el modelo en condiciones reales, midiendo indicadores clave de desempeño (KPI) como disponibilidad, MTTR y reducción de fallas críticas. El éxito se define como una disponibilidad  $\geq 85 \%$ , alcanzando TRL 6 (demostración en entorno relevante).

- Fase 7 – Escalamiento a toda la flota (Mes 23-24)

Con los resultados validados, se procede al despliegue en todas las unidades equipadas con el sistema BARRACUDA. Se documenta el Manual ACV final y se proyecta una reducción del LCC del 10 % en el primer año posterior a la implementación, alcanzando TRL 7 (demostración en entorno operacional real).

Para un entendimiento más claro se establece la Tabla 5 y la Figura 3 las cuales alinea las actividades del modelo para ser implementado con una propuesta de cronograma

## Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”

Bogotá D.C., Colombia

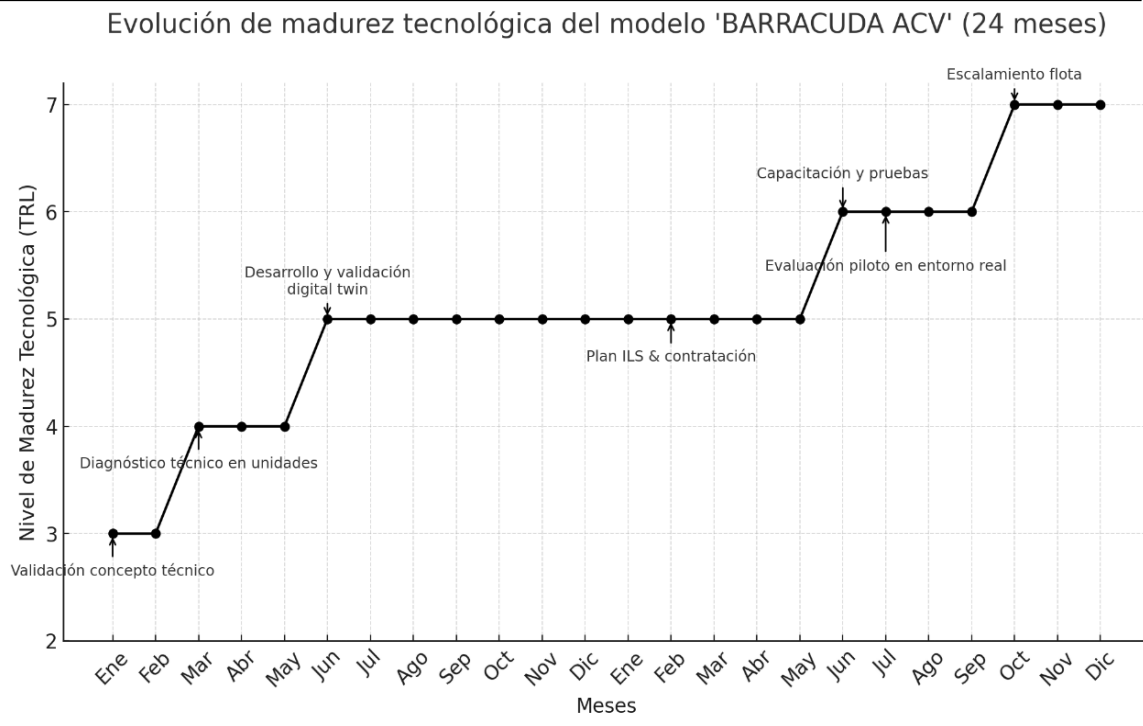
que la Armada Nacional de Colombia, junto con una guía de cómo debería ser la lógica de madurez tecnológica que debería seguir el modelo en una institución pública, que podría aplicar hipotéticamente en el transcurso de dos años fiscales.

**Tabla 5.** Ruta de implementación “BARRACUDA ACV” durante dos años fiscales en Colombia.

Fase	Actividad	Duración	Periodo estimado	Producto
1	Revisión bibliográfica ampliada	2 meses	Mes 1-2	Informe de tendencias
2	Diagnóstico técnico en unidades	3 meses	Mes 3-5	Matriz capacidades
3	Desarrollo y validación del digital twin prototipo	6 meses	Mes 6-11	Modelo validado
4	Plan ILS y contratación	4 meses	Mes 12-15	Plan logístico aprobado, contratos firmados
5	Capacitación y pruebas controladas	3 meses	Mes 16-18	Personal certificado
6	Evaluación piloto en entorno real	4 meses	Mes 19-22	Reporte KPI
7	Escalamiento a toda la flota	2 meses	Mes 23-24	Manual ACV final

*Fuente:* Elaboración propia

**Figura 3.** Ilustra la lógica de madurez incremental basada en niveles Technology Readiness Level (TRL) 3-7.



Nota. Adaptado de la NASA (2023).

Fuente: Elaboración propia

## Conclusiones

El desarrollo de este artículo permitió constatar que el sistema de control de fuego BARRACUDA mantiene una capacidad operativa aceptable, aunque aún distante de los estándares OTAN. El diagnóstico técnico y logístico evidenció que factores como la obsolescencia de componentes, los largos tiempos de aprovisionamiento y la carencia de programas de mantenimiento predictivo limitan la disponibilidad promedio del sistema y comprometen la interoperabilidad con socios estratégicos. Estos hallazgos dan respuesta al primer objetivo, orientado a analizar las capacidades y limitaciones actuales, y permiten dimensionar el impacto estratégico de las brechas detectadas.

La revisión de modelos internacionales y regionales de Apoyo al Ciclo de Vida (ACV) e Integrated Logistics Support (ILS) mostró que tecnologías como los gemelos digitales, el mantenimiento predictivo con IoT y machine learning, y las prácticas de gestión de activos bajo ISO 55000 ofrecen soluciones probadas para incrementar la disponibilidad operativa a niveles superiores al 90 % y reducir los costos del ciclo de vida en cerca del 27 %. Al compararse con experiencias como la técnica CILS-TAT de la U.S. Navy o la logística inversa de COTECMAR, se confirma la viabilidad de transferir estas prácticas al contexto colombiano, respondiendo así al segundo objetivo específico.

El diseño de un modelo conceptual de cinco módulos —gestión de activos, mantenimiento predictivo, ILS colaborativo, analítica de costos y ciberseguridad— constituyó un aporte académico y práctico que integra estándares internacionales con las necesidades de la Armada Nacional de Colombia. Su resolución mediante algoritmos de optimización multiobjetivo demostró que es posible equilibrar costos y disponibilidad bajo restricciones presupuestarias realistas, dando cumplimiento al tercer objetivo. Este resultado no solo aporta al campo académico de la logística naval, sino que también fortalece la autonomía tecnológica y la sostenibilidad del sistema.

Finalmente, la propuesta de implementación progresiva en un horizonte de 24 meses, estructurada en fases TRL de validación gradual, resultó coherente con las dinámicas de contratación pública, la capacidad de absorción tecnológica del personal y las limitaciones presupuestarias nacionales. Esta estrategia asegura la reducción de riesgos operativos y una transición ordenada hacia la plena adopción del modelo, contribuyendo al logro del cuarto objetivo específico y consolidando un marco factible de modernización naval alineado con el Plan de Desarrollo Naval 2042.

A partir de estas conclusiones, se recomienda que futuras investigaciones se orienten hacia el análisis de riesgos cibernéticos sobre la arquitectura del BARRACUDA y la validación de protocolos de seguridad bajo estándares OTAN STANAG 4774. Igualmente, es pertinente analizar la interoperabilidad del modelo ACV-ILS con plataformas de mando y control, así como explorar el potencial del blockchain para la trazabilidad logística y la reducción de tiempos de aprovisionamiento. Finalmente, se sugiere evaluar con mayor profundidad la fabricación local de componentes, con el fin de reducir la dependencia tecnológica externa y estimular el fortalecimiento de la industria naval nacional.

## Referencias:

1. AEGIS and allies: The evolution continues. (1997). *Naval Forces*, 18(1), S10-S11.
2. Armada Nacional de Colombia. (2014a). *Doctrina de Material Naval. Tomo I: Generalidades* (1.ª ed.).
3. Armada Nacional de Colombia. (2014b). *Doctrina de Material Naval. Tomo II: Clasificación del material naval* (1.ª ed.).
4. Armada Nacional de Colombia. (2014c). *Doctrina de Material Naval. Tomo III: Mantenimiento del material naval* (1.ª ed.).
5. Armada Nacional de Colombia. (2014d). *Doctrina de Material Naval. Tomo IV: Control de averías, situaciones especiales y formatos aplicados* (1.ª ed.).
6. Armada Nacional de Colombia. (2017). *Guía rápida sistema de armas BARRACUDA V 4.0* [Documento no publicado]. Departamento de Armas y Electrónica BN1.
7. Armada Nacional de Colombia. (2019). *Manual de operación sistema BARRACUDA V 1.0* [Documento no publicado]. Departamento de Armas y Electrónica BN1.
8. Armada Nacional de Colombia. (2024). *Plan de Desarrollo Naval 2042*. Jefatura de Planeación Naval.
9. Bardin, L. (2013). *Análisis de contenido*. Akal.
10. Bazaraa, M. S., Jarvis, J. J., & Sherali, H. D. (2013). *Linear programming and network flows* (4.ª ed.). Wiley.
11. Blanchard, B. S., & Fabrycky, W. J. (2011). *Systems engineering and analysis* (5.ª ed.). Pearson.
12. Brown, A. (2025). Contested logistics requires a collective European maritime answer. *Proceedings*, 151(5), 45-49.
13. Casadiego Miranda, L. P., Bastos Blandos, E. A., Paipa Sanabria, E., Ruiz Pianeta, M., Pinzón Ramírez, J. S., & Zuñiga Portillo, N. F. (2021). Analysis of integrated logistics support (ILS) in the shipbuilding industry. *Ship Science and Technology*, 14(28), 9-17.
14. Chen, X., & Wang, L. (2024). Modeling and simulation of naval combat systems using a system-of-systems approach. *Journal of Defense Modeling & Simulation*, 21(4), 355-370\*. <https://doi.org/10.1177/1548512924123456>.
15. Choi, Y., & Kim, D. (2022). Blockchain for secure naval logistics. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 14(3), 112-123\*. <https://doi.org/10.1007/s13395-022-00257-9>.
16. Cole, P. (2015). *Naval strategy and maritime power in the 21st century*. Routledge.
17. Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 37-46. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>.

18. Consejo Nacional de Política Económica y Social No. 4069 (2021). *Política nacional de ciencia, tecnología e innovación 2022-2031*.
19. Defense Advanced Research Projects Agency. (2023). *Adaptive Autonomous Logistics Experiments: Final report*.
20. Deloitte. (2023). *Global defense outlook 2023: Future sustainment and logistics trends*.
21. European Defence Agency. (2023). *NATO integrated logistics support guidelines for naval platforms*.
22. Harris, D., & Fitzgerald, L. (2017). Lifecycle cost analysis (LCCA): A comparison of commercial flooring. *Facilities*, 35(5), 303-318\*. <https://doi.org/10.1108/F-10-2015-0071>.
23. Hernández-Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2018). *Metodología de la investigación* (4.ª ed.). McGraw-Hill.
24. International Maritime Organization. (2023). *Guidelines on maintenance and technical management of shipboard equipment* (IMO Circular 1271).
25. International Organization for Standardization. (2014). *ISO 55000: Asset management—Overview, principles and terminology*.
26. Jones, M., Carter, L., & Thompson, R. (2023). Time series analysis for maintenance optimization in the U.S. Coast Guard. *Journal of Maritime Logistics*, 18(3), 122-137.
27. Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159–174. <https://doi.org/10.2307/2529310>.
28. Li, H., & Zhao, Q. (2024). Optimizing lifecycle cost of naval fire-control radar through multi-objective algorithms. *Naval Engineers Journal*, 137(1), 67-80.
29. Marshall, M. (2024). Digital twin predictive maintenance systems. *Journal of Marine Technology*, 19(2), 14-25\*.
30. Marler, R. T., & Arora, J. S. (2004). Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26(6), 369-395\*. <https://doi.org/10.1007/s00158-003-0368-6>.
31. Martin, E. (2024). *Otras tecnologías y sistemas de alto impacto para las operaciones en el EO2035* (1.ª ed., pp. 97-122). Imprenta Ministerio de Defensa de España.
32. Ministerio de Defensa Nacional de Colombia. (2024). *Política de ciencia, tecnología e innovación para el sector defensa y seguridad*.
33. NATO Science & Technology Organization. (2024). *TR-AVT-401: Asset management for maritime platforms*.
34. Naval Air Systems Command. (2024). *Research compendium: Training systems and human performance*.
35. Naval Sea Systems Command. (2023). *Lifecycle sustainment management manual* (NAVSEA 05-5000).

36. Papalambros, P. Y., & Wilde, D. J. (2017). *Principles of optimal design: Modeling and computation* (3.<sup>a</sup> ed.). Cambridge University Press.
37. Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, *372*, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n7>.
38. Roy, R. (2020). Integrated logistics support for systems: Engineering and management approach. *Defence Science Journal*, *70*(1), 72-81\*. <https://doi.org/10.14429/dsj.70.14813>.
39. Smith, J., & Lee, T. (2023). Predictive maintenance for naval combat systems using machine learning. *Journal of Defense Analytics*, *12*(2), 45-59\*.
40. Smith, J., & Nguyen, P. (2022). Organizational restructuring for naval maintenance efficiency: The Royal Australian Navy case. *Naval Engineers Journal*, *134*(2), 45-59.
41. Subramanian, R., & Ghosh, S. (2023). Application of IoT-based sensors in naval weapon systems maintenance. *Sensors*, *23*(18), 12345\*.
42. Tanaka, Y., Sato, K., & Hirose, M. (2024). Digital twin applications in aerospace and defense diagnostics. *Japanese Aerospace Review*, *21*(1), 88-102.
43. Torres Palacio, J. C., Barros Padilla, J., Villasmil Molero, M. C., & Socorro González, C. C. (2020). Beneficios tributarios para proyectos de ciencia, tecnología e innovación en Colombia. *Revista de Ciencias Sociales*, *26*(2), 107-119\*.
44. United States Navy. (2024). *NAVPLAN 2024: America's Navy—A global force*. Office of the Chief of Naval Operations.
45. Valdez, M. (2024). *Realidad y futuro de las redes móviles de nueva generación en el ámbito militar*. Imprenta Ministerio de Defensa de España.
46. Weber, S. G. (2024). *Tecnologías emergentes y su impacto en la guerra naval*. Ediciones Universitarias de Valparaíso PUCV.

**Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”**  
Bogotá D.C., Colombia