



# **Optimización tecnológica para motores fuera de borda como dinamizador para el control de los ríos y el desarrollo de las operaciones fluviales**

Mayor de I.M. Alvarez Cely Fabian Enrique

Artículo para optar al título profesional:

Magister en Seguridad y Defensa Nacionales

Escuela Superior de Guerra "General Rafael Reyes Prieto"  
Bogotá D.C., Colombia  
2025

DATOS GENERALES	
<b>Nombre del estudiante</b>	: Mayor de I.M. Alvarez Cely Fabian Enrique
<b>Identificación</b>	: 80870887
<b>Programa académico</b>	: Maestría en Defensa y Seguridad Nacionales
<b>Tutor metodológico</b>	: DO. Jhonnatan Jiménez Reina
<b>Tutor temático</b>	: Coronel de I.M. (RA) Giovanni Parra Hernández
<b>Fecha de entrega</b>	: 26 de agosto de 2025
<b>Extensión</b>	: 7.820 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 representan 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.

# Armada Nacional: Nuevas Tecnologías para Operaciones Fluviales

## Colombian National Navy: New Technologies for Riverine Operations

Fabian Enrique Alvarez Cely\*

Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”

**Resumen:** Ante el alto costo de sostenimiento, la baja disponibilidad y el complejo mantenimiento de motores fuera de borda para el control fluvial, este artículo propone optimizar las operaciones de la Armada Nacional mediante nuevas tecnologías. Se realizó una investigación mixta para comparar, clasificar y priorizar alternativas tecnológicas, concluyendo que la implementación futura de motores de energía alternativa es crucial para el desarrollo de las operaciones fluviales. Este estudio es original al ser el primero en abordar tecnologías modernas de motores fuera de borda para el ámbito de las operaciones fluviales en los escenarios colombianos.

**Palabras clave:** Estado; fronteras; geopolítica; motores fuera de borda; nuevas tecnologías.

**Abstract:** Faced with the high sustainment costs, low availability, and complex maintenance of outboard motors for river control, this article proposes optimizing Colombian Navy operations through new technologies. A mixed-methods investigation was conducted to compare, classify, and prioritize technological alternatives, concluding that the future implementation of alternative energy motors is crucial for the development of riverine operations. This study is original as it is the first to address modern outboard motor technologies for riverine operations in Colombian scenarios.

**Keywords:** State; borders; geopolitics; outboard motors; new technologies.

---

\* Mayor de Infantería de Marina de la Armada Nacional. Candidato a magíster en estrategia y geopolítica, Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”, Colombia. Profesional en ingeniería de sistemas de la universidad El Bosque y especialización en política y estrategia marítima de la Escuela Naval Almirante Padilla. Colombia. <https://orcid.org/0000-0003-2004-7466> - Contacto: [fabian.avarez@esdeg.edu.co](mailto:fabian.avarez@esdeg.edu.co).

## **Introducción**

La Armada Nacional de Colombia juega un papel fundamental en la protección de la soberanía y la seguridad a lo largo de los extensos y estratégicos entornos fluviales del país. La efectividad de sus misiones depende críticamente de la fiabilidad de sus equipos, en particular de los motores que impulsan sus embarcaciones. Sin embargo, la institución se enfrenta a importantes desafíos relacionados con la durabilidad, sostenimiento y mantenimiento de estos motores, lo que afecta directamente su capacidad operativa, la disponibilidad de las unidades y el cumplimiento de sus objetivos estratégicos. Esta compleja problemática constituye el punto de partida de esta investigación, que busca ofrecer una solución integral y basada en datos.

El primer gran reto es la durabilidad. El entorno fluvial colombiano es implacable, caracterizado por una alta humedad, salinidad en zonas de estuario, variaciones de temperatura y largas jornadas de operación continua (Grau, 2014, p. 2). Estas condiciones extremas aceleran el desgaste de los componentes del motor, reduciendo su vida útil y aumentando la frecuencia de fallas inesperadas. Esta situación no solo interrumpe misiones críticas, sino que también impone una carga financiera significativa debido a la necesidad de reemplazos prematuros, un problema común en equipos navales desplegados en climas tropicales (Mardo, 2022, p. 56).

En segundo lugar, el sostenimiento de la flota representa un desafío logístico y económico considerable. La gestión de recursos, especialmente el combustible y los lubricantes, es un punto crítico. Muchos de los motores actualmente en uso tienen un

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

Bogotá D.C., Colombia

consumo de combustible elevado que, aunque pudo ser aceptable en el pasado, hoy resulta insostenible ante la volatilidad de los precios de los hidrocarburos (Army.mil, 2024, p. 1). Optimizar la eficiencia energética no solo reduciría los costos operativos, sino que también aumentaría la autonomía de las embarcaciones, un factor clave en operaciones remotas donde el reabastecimiento es complejo y arriesgado (SCMglobe, s.f., p. 3).

Finalmente, el mantenimiento de los motores existentes cierra este círculo de desafíos. Los costos asociados a repuestos, mano de obra y los complejos procedimientos de extracción de motores para reparaciones mayores son elevados (Hassan y El-Gohary, 2015, p. 4). La disponibilidad de piezas puede ser limitada o estar sujeta a largas demoras de importación, lo que extiende los períodos de inactividad de las embarcaciones. Además, las reparaciones a menudo requieren intervenciones en los cascos de las lanchas, lo que añade otra capa de complejidad y gasto al ciclo de vida del equipo. Estos desafíos configuran un escenario que exige una solución estratégica y de largo plazo.

Para abordar esta problemática de manera rigurosa, este estudio empleará un análisis de criterios multicriterio (Desjardins, 2012, p. 5). Este enfoque permite evaluar y comparar diversas alternativas de motores fuera de borda considerando simultáneamente múltiples factores técnicos, logísticos y económicos, superando así las limitaciones de una evaluación unidimensional.

La información fundamental para este análisis se recopilará a través de una encuesta dirigida al personal de Oficiales y Suboficiales de Infantería de Marina. Esta población, como usuaria directa de los equipos, posee un conocimiento invaluable sobre las verdaderas

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

Bogotá D.C., Colombia

necesidades operacionales y las deficiencias de los sistemas actuales. Para garantizar la validez estadística de los resultados, se ha diseñado una muestra representativa de 352 individuos sobre una población total de 6100, lo que asegura un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 4% (Sampieri, 2014, p. 176). Las respuestas obtenidas alimentarán las matrices de decisión, permitiendo ponderar la importancia relativa de cada criterio.

Con los criterios y ponderaciones establecidos, se realizará un análisis exhaustivo de las alternativas tecnológicas de motores disponibles en el mercado. Esta evaluación no se limitará a las especificaciones técnicas publicadas, sino que integrará aspectos logísticos cruciales como la solidez de la cadena de suministro, el soporte técnico postventa y la disponibilidad de capacitación. Cada motor será evaluado detalladamente en función de su consumo, potencia, peso, vida útil esperada, costos de adquisición y mantenimiento, entre otros.

El resultado final de esta investigación será la formulación de una propuesta concreta para la implementación de un prototipo o un plan de continuidad dependiendo de los resultados. Esta propuesta no solo identificará el motor fuera de borda más adecuado para las necesidades de la Armada, sino que también delineará una hoja de ruta práctica para su evaluación en un entorno operativo real. Dicho plan incluirá un cronograma detallado para la adquisición, instalación y fase de pruebas, así como el alcance del prototipo (número de unidades, zonas de operación) y los criterios de éxito para medir su rendimiento. El objetivo es transformar el análisis en una acción tangible que permita a la Armada Nacional modernizar su flota fluvial, mejorando su capacidad operativa, eficiencia económica y sostenibilidad a largo plazo.

## **1. Fundamentos Doctrinales para la Capacidad de Maniobra Fluvial**

La selección de un sistema de propulsión para las unidades de combate de la Infantería de Marina de Colombia (IM) trasciende una simple evaluación técnica; representa la materialización de la capacidad del Estado para ejercer soberanía y control en sus vastos y complejos espacios fluviales (Cáceres, 2017, p. 45). La doctrina de la Armada Nacional de Colombia (ARC) establece el marco imperativo que define los requerimientos operacionales, convirtiendo la adquisición de motores fuera de borda (F/B) en una decisión de carácter estratégico. Esta sección establece dicho marco doctrinal como la fuente principal de autoridad para la definición de los criterios de evaluación, demostrando que cada característica de un motor debe responder a un mandato táctico u operacional explícito.

### **1.1 El Concepto de Poder Fluvial en la Doctrina de la Armada Nacional**

La doctrina naval colombiana contemporánea ha consolidado el concepto de "Poder Fluvial" como un elemento central de su estrategia de defensa y seguridad. Este concepto se define como la capacidad integral del Estado para utilizar los ríos y sus áreas de influencia en beneficio de los intereses nacionales, lo que implica no solo la presencia militar, sino el control efectivo del entorno para garantizar la seguridad, el desarrollo económico y la cohesión social (Hernández y Vera, 2017, p. 88). Las operaciones fluviales, por tanto, no se conciben de forma aislada, sino como una extensión del poder naval hacia el interior del territorio. El Manual de Operaciones Fluviales reconoce la Operación Fluvial como una "operación Anfibia en menor escala", donde la cuenca fluvial se observa como una extensión

natural del mar a la que el poder naval debe proyectar sus capacidades (Armada Nacional, 2018, p. 15).

## **1.2 Lineamientos del Plan de Desarrollo Naval 2042 (PDN2042) para el Dominio Fluvial**

El carácter estratégico del dominio fluvial se ve reforzado en los documentos de planificación de alto nivel de la ARC. El Plan de Desarrollo Naval 2042 (PDN2042) y el Plan Estratégico Naval (PEN) 2024-2027 identifican explícitamente la modernización y el fortalecimiento de las capacidades fluviales como una prioridad institucional (Armada Nacional, 2016, p. 52). El objetivo general del proyecto de investigación del cual se deriva este análisis es "Proponer alternativas para la implementación de innovaciones y renovaciones tecnológicas en Motores Fuera de Borda potenciando las capacidades de la Infantería de Marina", en concordancia directa con la visión del PDN2042 (Armada Nacional, 2016, p. 78).

Estos planes no se limitan a la adquisición de equipos, sino que contemplan un enfoque holístico que incluye el desarrollo de una estructura de fuerza adecuada y el sostenimiento logístico necesario para garantizar la operatividad de las nuevas tecnologías a lo largo de su ciclo de vida (Armada Nacional, 2024, p. 31). Por lo tanto, la selección de un nuevo motor F/B debe considerar no solo su rendimiento inicial, sino también su impacto en la cadena de mantenimiento, la capacitación del personal y la infraestructura de apoyo existente y futura.

### **1.3 Análisis de los Manuales de Operaciones Fluviales (ARC OP3-8-2 y ARC-3-105) y su Influencia en los Requerimientos de Propulsión**

La doctrina fluvial de la ARC es un cuerpo vivo que ha evolucionado para adaptarse a las realidades cambiantes del conflicto y el entorno operacional. El Manual de Operaciones Fluviales ARC-3-105 de 2006, sentó las bases para la estandarización de las operaciones fluviales, pero fue su actualización en 2018 la que introdujo conceptos que impactan directamente en los requerimientos de propulsión (Armada Nacional, 2018, p. 8).

Un cambio doctrinal significativo fue la eliminación del "Grupo de Asalto Fluvial (GAF)" como una organización rígida para el combate, presentándolo ahora como una tarea táctica cuyo tamaño se ajusta a la misión. Esta nueva doctrina "flexibiliza el número de botes a (03) para ser empleados en las operaciones de acuerdo con los factores determinantes de evaluación" (Armada Nacional, 2018, p. 42). Esta flexibilidad organizacional exige una correspondiente Flexibilidad en los sistemas de propulsión, que deben ser adaptables a diferentes tipos y tamaños de embarcaciones.

Además, la doctrina amplía el espectro de las operaciones fluviales más allá del combate tradicional, incluyendo operaciones no relacionadas con la guerra, como la asistencia humanitaria y el control ambiental (Armada Nacional, 2018, p. 21). Esta diversificación de misiones requiere sistemas de propulsión versátiles.

### **1.4 Tácticas y Técnicas (ARC T3.4-1.1) que Definen las Exigencias de Rendimiento del Motor**

El Manual de Tácticas y Técnicas Fluviales (ARC T3.4-1.1) es el documento que traduce la estrategia doctrinal en procedimientos ejecutables, y es aquí donde los requerimientos de rendimiento del motor se definen con mayor claridad (Armada Nacional, 2021, p. 11).

**Infiltración y Reconocimiento:** Estas misiones dependen fundamentalmente del Sigilo. El ruido de un motor convencional puede alertar al enemigo a kilómetros de distancia (Simpson, 1969, p. 15).

**Asalto y Extracción:** Estas operaciones exigen máxima Potencia y Confiabilidad; una falla de motor durante una extracción bajo fuego es un escenario catastrófico (Armada Nacional, 2021, p. 55).

**Patrullaje y Control de Área:** Priorizan la Autonomía y la Economía de combustible para maximizar el tiempo en estación con una huella logística mínima.

La doctrina no puede, por tanto, prescribir una única tecnología de motor como la "mejor". Este conflicto inherente en los requerimientos significa que el proceso de selección debe buscar un sistema que ofrezca el mejor equilibrio de capacidades, ponderado según las prioridades estratégicas y tácticas de la Armada Nacional.

## **1.5 Análisis Comparativo con Experiencias Internacionales y Literatura Técnica**

Los hallazgos del estudio, que recomiendan la estandarización en motores de 4 tiempos, se fortalecen al contrastarlos con experiencias internacionales que revelan diferentes prioridades doctrinales. En Estados Unidos, la doctrina prevalece sobre la tecnología del mercado; la política de "combustible único de batalla" exige motores mult carburante no comerciales para simplificar la logística estratégica, mientras que las operaciones especiales priorizan los hidrochorros a diésel por su rendimiento táctico en misiones de alto riesgo, aceptando su mayor costo y complejidad. Por su parte, Brasil evidencia una convergencia regional al adoptar lanchas LPR-40 de diseño colombiano (COTECMAR) con propulsión por hidrochorros para la interdicción en el Amazonas, validando dicha tecnología para amenazas específicas compartidas y sugiriendo la pertinencia de una flota mixta.

La literatura técnica reciente respalda el escepticismo hacia una electrificación a mediano plazo. Un estudio de 2025 cuantifica que los sistemas híbridos-eléctricos imponen una severa penalización de peso y ofrecen una autonomía en modo sigiloso extremadamente limitada apenas un 7% de una misión de 200 millas náuticas a cambio de modestas ganancias en eficiencia. Estos datos confirman que las prioridades de la Infantería de Marina colombiana confiabilidad, mantenimiento y autonomía son incompatibles con las limitaciones actuales de las tecnologías emergentes. Por tanto, la estandarización en motores de 4 tiempos se visualiza como una decisión pragmática y estratégicamente sólida, alineada con la realidad operativa y el horizonte tecnológico.

## 2. Definición de Criterios Operacionales Basados en el Entorno de Combate Fluvial

Para que la selección sea efectiva, es imperativo traducir los mandatos doctrinales en criterios de evaluación concretos y medibles para el teatro de operaciones fluvial colombiano (Vásquez Barrera, 2022, p. 102).

### 2.1 Criterios de Desempeño Táctico: Potencia, Maniobrabilidad y Flexibilidad

**Potencia:** Capacidad del motor para impulsar la embarcación a altas velocidades con cargas pesadas. Es un requisito no negociable para misiones de interceptación y extracción rápida de tropas bajo fuego.

**Maniobrabilidad:** Agilidad para ejecutar giros precisos y evadir obstáculos. La navegación precisa en el complejo entorno fluvial colombiano es una ventaja táctica (Armada Nacional, 2018, p. 63).

**Flexibilidad:** Capacidad del motor para adaptarse a diferentes tipos de embarcaciones y misiones. La evolución doctrinal refuerza la necesidad de sistemas intercambiables.

### 2.2 Criterios de Sostenimiento de la Misión: Autonomía, Confiabilidad y Economía

**Autonomía:** Capacidad de operar por largos períodos sin reabastecer combustible, un factor crítico para el control de vastos territorios fluviales (Grau, 2014, p. 3).

**Confiabilidad:** Funcionamiento seguro en condiciones adversas. Una falla de motor en territorio hostil es una vulnerabilidad táctica que puede resultar en la pérdida de vidas.

**Economía:** Eficiencia en el consumo de combustible para disminuir la carga logística. En un entorno restringido, se traduce en mayor capacidad de combate.

### 2.3 Criterios de Supervivencia y Efectividad: Sigilo, Seguridad y Mantenimiento en Campaña

**Sigilo:** Capacidad de operar con una firma acústica reducida. Esencial para misiones de inteligencia, infiltración y ataques sorpresa.

**Seguridad:** Características de diseño que minimizan los riesgos para el personal, incluyendo protección contra incendios y seguridad eléctrica.

**Mantenimiento:** Facilidad para ser reparado en el área de operaciones con herramientas limitadas. Un motor que requiere diagnóstico por software es una vulnerabilidad logística en áreas remotas (Army.mil, 2024, p. 2).

## 3. Análisis de Criterios Técnicos y Tecnológicos de las Alternativas de Propulsión

Una vez establecidos los criterios operacionales, se realiza un análisis técnico riguroso de las alternativas de propulsión disponibles.

### 3.1 Motores de Combustión Interna (ICE) - 2 y 4 Tiempos

**Características Técnicas:** Los motores de 2T son más simples y ligeros; los de 4T son más complejos, pero más eficientes y limpios (UTI, 2023, p. 1).

**Fortalezas:** Alta densidad de potencia y tecnología probada. Los motores de 2T ofrecen una ventaja en el mantenimiento en campaña (Westshore Marine, 2023, p. 1).

**Debilidades:** Alta firma acústica, lo que los hace deficientes en Sigilo. Su economía de combustible es inferior a la de tecnologías más modernas (Boats.net, 2022, p. 2).

### 3.2 Sistemas de Propulsión Eléctrica

**Características Técnicas:** Consisten en un motor eléctrico, un banco de baterías, un controlador y un sistema de recarga (Raider Outboards, s.f.-b, p. 1).

**Fortalezas:** Sigilo casi total y excelente maniobrabilidad a baja velocidad. Su mantenimiento mecánico es prácticamente nulo.

**Debilidades:** La principal limitación es la Autonomía debido a la baja densidad energética de las baterías actuales (Flux Marine, 2025, p. 1). La recarga en un entorno remoto es un obstáculo casi insuperable. Sus sistemas digitalizados presentan una nueva vulnerabilidad a los ciberataques (DNV, s.f., p. 1).

### 3.3 Sistemas de Propulsión Híbrida (Diésel/Gasolina-Eléctrico)

**Características Técnicas:** Integran un motor de combustión, un motor/generador eléctrico, baterías y un sistema de gestión de potencia (Wärtsilä, s.f., p. 1).

**Fortalezas:** Ofrecen la máxima Flexibilidad operacional, combinando el modo de combustión para largas distancias y el modo eléctrico para aproximaciones sigilosas.

**Debilidades:** Alto costo en complejidad, peso y precio. Su Mantenimiento es el más exigente, requiriendo una doble cadena logística y personal con capacitación avanzada (Yap et al., 2022, p. 485).

### **3.4 Sistemas de Propulsión por Chorro de Agua (Waterjet)**

**Características Técnicas:** Utiliza un impulsor interno que expulsa agua a alta velocidad. No tiene una hélice externa expuesta.

**Fortalezas:** Capacidad de operar en aguas muy poco profundas y con vegetación. Aumenta drásticamente la seguridad para el personal en el agua.

**Debilidades:** Son altamente susceptibles al Daño por Objeto Extraño (FOD). La succión de rocas o sedimentos puede dañar gravemente el impulsor (Carlton, 2007, p. 112).

La evaluación de estas tecnologías revela un compromiso fundamental. La doctrina y la realidad operacional de la IMC se desarrollan en un entorno de baja densidad logística y alta exigencia de rusticidad. Un motor de última generación que requiere un técnico especializado con un equipo de diagnóstico computarizado representa una desventaja

estratégica en medio de la selva (Grau, 2014, p. 3). Este factor, la capacidad de sostenimiento autónomo en el campo, es un sub-criterio crítico que debe ser ponderado significativamente.

#### **4. Metodología de Convergencia: Un Marco de Evaluación Multicriterio para la Capacidad Fluvial**

La selección de tecnologías críticas para la defensa, como los sistemas de propulsión para las unidades de combate fluvial de la Infantería de Marina de la Armada Nacional de Colombia (ARC), representa un desafío de alta complejidad. Las operaciones fluviales imponen un conjunto de demandas multifacéticas y a menudo contrapuestas, donde un motor más potente puede reducir la autonomía o un sistema avanzado puede complicar el mantenimiento en campo. Esta interdependencia de factores exige un enfoque estructurado que permita ponderar y priorizar de manera objetiva las diversas necesidades operacionales.

Para abordar esta complejidad, se recurre a los métodos de Análisis de Decisión Multicriterio (MCDM), una disciplina diseñada para evaluar alternativas frente a múltiples criterios (Desjardins, 2012). La aplicación de MCDM en el ámbito militar es fundamental, ya que una toma de decisiones precisa puede reducir gastos, optimizar el ciclo de vida de los activos e incrementar la capacidad de defensa (Mardo, 2022). En contextos de alta incertidumbre, los métodos MCDM superan las limitaciones cognitivas humanas, evitando sesgos que podrían derivarse de procesos informales (Desjardins, 2012).

Este numeral detalla la aplicación de un marco de evaluación basado en el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) para determinar la importancia relativa de los criterios de desempeño de los motores fuera de borda. El objetivo es establecer un vector de prioridades cuantitativo, derivado de los juicios de expertos de la ARC, que sirva como base empírica para la selección de futuras tecnologías, en concordancia con el Plan de Desarrollo Naval 2042.

#### **4.1 Justificación y Estructura de la Metodología**

Se seleccionó el Proceso de Jerarquía Analítica (PJA / AHP), una de las herramientas MCDM más robustas y utilizadas, especialmente adecuada para problemas de decisión complejos (Saaty, 2008). Su idoneidad se fundamenta en su capacidad para: Descomponer jerárquicamente un problema complejo en elementos manejables: objetivo, criterios y alternativas. Incorporar juicios subjetivos de expertos a través de comparaciones pareadas, una tarea cognitivamente más simple que la asignación directa de pesos. Verificar la consistencia de los juicios mediante un Ratio de Consistencia (CR), lo que confiere validez matemática al proceso.

El uso de AHP proporciona un proceso de decisión transparente, repetible y defendible que mitiga los sesgos inherentes a los procesos informales (Desjardins, 2012).

#### **4.2 Recolección y Procesamiento de Datos**

Se diseñó una encuesta en línea con 36 preguntas de comparación pareada, cubriendo todas las combinaciones de los nueve criterios. Este formato obliga a los encuestados a

realizar juicios de compensación (*trade-offs*) uno a uno, revelando sus preferencias implícitas. Las respuestas cualitativas se tradujeron a la escala fundamental de 1 a 9 del AHP para su procesamiento matemático (Saaty, 2008).

Para determinar el número de personas a encuestar de una población de 3120 individuos, se utiliza la fórmula estadística para poblaciones finitas:

Formula Tamaño de la Muestra	Variable
$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot p \cdot q}{e^2 \cdot (N - 1) + Z^2 \cdot p \cdot q}$	n = Tamaño de la muestra que se va a calcular.
	N = Tamaño de la población total (3120)
	Z = Nivel de confianza. Se utiliza el valor estándar de 1.96, que corresponde a un nivel de confianza del 95%.
	p = Probabilidad de que ocurra el evento (variabilidad). Al no tener datos previos, se utiliza el valor más conservador de 0.5 para maximizar el tamaño de la muestra.
	q = Probabilidad de que no ocurra el evento (1 - p), que es 0.5.
	e = Margen de error. Se utiliza el valor estándar del 5% (0.05).

Aplicando la fórmula para determinar el tamaño de la muestra, se determina que se requiere un mínimo de 343 encuestados para tener datos óptimos con un nivel de confianza del 95%.

$$n = \frac{3120 \cdot 3.8416 \cdot 0.25}{0.0025 \cdot 3119 + 3.8416 \cdot 0.25}$$
$$n = \frac{2996.448}{7.7975 + 0.9604}$$
$$n = \frac{2996.448}{8.7579}$$
$$n \approx 342.12$$

La muestra total final fue de 350 encuestados distribuidos en tres grupos jerárquicos para analizar las prioridades según el rol:

**Grupo 1 de Oficiales de I.M. (OF):** Personal de planificación, mando y control.

**Grupo 2 de Suboficiales I.M. (SO):** Personal de mantenimiento, logística y supervisión técnica.

**Grupo 3 de Infantes de Marina Profesionales (IM):** Operadores finales y combatientes.

#### 4.3 Derivación de Prioridades por Grupo Jerárquico

Para cada grupo, se agregaron las matrices de comparación, se calculó el vector de prioridad y se verificó la consistencia de los juicios ( $CR < 0.10$ ), validando los resultados.

**Resultados para el Grupo de Oficiales (OF):** La perspectiva de mando prioriza la efectividad y sostenibilidad de la misión.

**Tabla 1: Vector de Prioridades para el Grupo de Oficiales (OF) – 41 Encuestados**

Criterio	Peso de Prioridad	Ranking
Confiabilidad	24.5%	1
Seguridad	18.2%	2
Autonomía	13.1%	3
Potencia	10.5%	4
Mantenimiento	9.8%	5
Economía	8.4%	6
Maniobrabilidad	6.2%	7
Flexibilidad	5.3%	8
Sigilo	4.0%	9
Ratio de Consistencia (CR)	0.089	Aceptable

Los Oficiales otorgan máxima prioridad a la Confiabilidad (24.5%) y Seguridad (18.2%), seguido de la Autonomía (13.1%), reflejando la importancia de la certeza, la protección del personal y el alcance operacional.

### **Resultados para el Grupo de Suboficiales (SO)**

La perspectiva del personal técnico está arraigada en la realidad del sostenimiento logístico.

**Tabla 2: Vector de Prioridades para el Grupo de Suboficiales (SO) – 147**

### **Encuestados**

Criterio	Peso de Prioridad	Ranking
Mantenimiento	28.1%	1
Confiabilidad	22.4%	2
Seguridad	15.5%	3
Economía	11.2%	4

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

Potencia	7.9%	5
Autonomía	6.0%	6
Flexibilidad	4.1%	7
Maniobrabilidad	3.1%	8
Sigilo	1.7%	9
Ratio de Consistencia (CR)	0.092	Aceptable

El Mantenimiento (28.1%) es el criterio más importante, indicando una fuerte preferencia por motores simples de reparar. La Confiabilidad (22.4%) le sigue, ya que un motor fiable reduce la carga de trabajo. Juntos, estos criterios superan el 50% del peso total.

**Resultados para el Grupo de Infantes de Marina Profesionales (IM)**

Los operadores finales evalúan los motores desde una perspectiva de eficacia en combate y supervivencia.

**Tabla 3: Vector de Prioridades para el Grupo de Infantes de Marina Profesionales (IM)**

– 152 encuestados.

Criterio	Peso de Prioridad	Ranking
Seguridad	26.8%	1
Potencia	20.1%	2
Confiabilidad	17.9%	3
Maniobrabilidad	12.3%	4
Autonomía	8.8%	5
Sigilo	5.5%	6
Flexibilidad	4.2%	7
Mantenimiento	2.7%	8
Economía	1.7%	9

Ratio de Consistencia (CR)	0.095	Acceptable
----------------------------	-------	------------

La Seguridad (26.8%) y la Potencia (20.1%) son las principales preocupaciones, atributos esenciales para la supervivencia y el éxito táctico. La Confiabilidad y la Maniobrabilidad también son altamente valoradas.

#### 4.4 Fusión de Convergencia: Hacia un Vector de Decisión Unificado

Para integrar las tres perspectivas Oficiales, Suboficiales e Infantes de Marina Profesionales, se fusionaron los vectores de prioridad mediante una media aritmética ponderada, asignando un peso igual de 1/3 a cada grupo. Este enfoque reconoce que las tres perspectivas son igualmente cruciales para el éxito global. El resultado es un vector de prioridad consolidado que representa el juicio institucional de la Infantería de Marina.

**Tabla 4: Vector de Prioridad Final y Ranking Consolidado**

Criterio	Peso Final Ponderado	Ranking Final
Confiabilidad	21.6%	1
Seguridad	20.2%	2
Mantenimiento	13.5%	3
Potencia	12.8%	4
Autonomía	9.3%	5
Economía	7.1%	6
Maniobrabilidad	7.2%	7
Flexibilidad	4.5%	8
Sigilo	3.7%	9

La Confiabilidad y la Seguridad emergen como los criterios preeminentes, constituyendo más del 40% del peso total. Les sigue un segundo nivel de importancia compuesto por el Mantenimiento y la Potencia.

#### **4.5 Análisis e Implicaciones Operacionales de las Prioridades**

Este vector de prioridades cuantitativo proporciona una guía estratégica con profundas implicaciones para la adquisición, el entrenamiento y la doctrina.

##### ***La Primacía de la Disponibilidad Operacional***

El hecho de que Confiabilidad (21.6%) y Seguridad (20.2%) ocupen las dos primeras posiciones envía un mensaje claro: la capacidad más importante de un motor es su disponibilidad garantizada. En el contexto de las operaciones fluviales, un fallo de motor es una vulnerabilidad catastrófica (Grau, 2014). Esta alta ponderación refleja que, antes que cualquier otra característica, el personal de la ARC valora la certeza. La proyección del poder naval en aguas interiores depende de esta fiabilidad fundamental (History.navy.mil, s.f.).

##### ***El Eje Logístico: Mantenimiento y Economía en Entornos Austeros***

La tercera prioridad, Mantenimiento (13.5%), y la sexta, Economía (7.1%), revelan una profunda conciencia de los desafíos logísticos. La logística es a menudo el punto de fricción en las operaciones ribereñas (Grau, 2014). La alta valoración del Mantenimiento es una demanda explícita por la simplicidad y la facilidad de reparación en el terreno. Esta preferencia se alinea con conceptos como el Costo Total de Propiedad (TOC), donde un

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

Bogotá D.C., Colombia

motor con un precio de compra bajo pero con altos costos de mantenimiento tendrá un TOC elevado (Hassan y El-Gohary, 2015; Mardo, 2022). Asimismo, la Economía de combustible es un factor logístico crítico, ya que un motor más eficiente reduce la vulnerabilidad de las líneas de suministro (SCMglobe, s.f.).

### ***El Balance Táctico: Potencia, Maniobrabilidad y Sigilo***

La Potencia (12.8%) se sitúa como el cuarto criterio más importante, confirmando su relevancia táctica. Sin embargo, su posición por debajo de Mantenimiento sugiere que la fuerza está dispuesta a aceptar un compromiso en la velocidad máxima a cambio de una mayor fiabilidad. El Sigilo (3.7%), clasificado en último lugar, indica que las operaciones de confrontación directa son más prevalentes que las misiones de infiltración. Este hallazgo tiene implicaciones para la adopción de tecnologías como motores eléctricos, cuya principal ventaja es el sigilo (Iqbal et al., 2023). La baja prioridad asignada podría dificultar la justificación de la inversión si implican compromisos en criterios de mayor rango.

### ***Una Consideración Futura: La Ciberseguridad como Componente de la Seguridad***

Es imperativo analizar los resultados con una visión de futuro. Los criterios de Seguridad y Confiabilidad fueron evaluados con base en sistemas predominantemente mecánicos. Sin embargo, las tecnologías emergentes dependen cada vez más de software y sistemas de control industrial (ICS), introduciendo el riesgo cibernético (DNV, s.f.). Un ataque podría deshabilitar un motor, degradar su rendimiento o proporcionar datos falsos al operador (Office of Naval Research, s.f.). La seguridad de un sistema moderno depende tanto de su robustez mecánica como de la resiliencia de su software (Gibbs & Cox, s.f.).

Por lo tanto, la alta prioridad asignada a la Seguridad y la Confiabilidad debe interpretarse para incluir la ciberseguridad como un subcomponente crítico. Para futuras adquisiciones, se recomienda que la ciberseguridad sea evaluada explícitamente, asegurando que cualquier nuevo sistema sea diseñado con seguridad desde su concepción para proteger las capacidades críticas en un entorno de amenazas en evolución (DNV, s.f.).

## **5. Selección de la Alternativa Tecnológica Óptima Basada en el Análisis**

La selección de la tecnología de propulsión más adecuada para la Infantería de Marina de Colombia (IMC) requiere un método que integre las prioridades operacionales, cuantificadas en el análisis multicriterio, con el principio de realidad del mercado y la dotación actual. El factor determinante es la necesidad de motores en el rango de alta potencia (175-250 HP) para la mayoría de las unidades para el desarrollo de las operaciones fluviales.

### **5.1 Revisión de la Evolución de la Eficiencia en Baterías (2010-2025) y su Prospectiva en el uso de motores F/B**

La "eficiencia" de un material para almacenar energía se mide mejor a través de su densidad energética gravimétrica, expresada en vatios-hora por kilogramo (Wh/kg). Esta métrica indica cuánta energía puede almacenar una batería en relación con su peso, un factor crítico para aplicaciones móviles como la propulsión marina.

La siguiente figura compara la evolución de esta métrica para las principales tecnologías de baterías desde 2010 hasta 2025 y proyección a 2035.

Figura 1: Evolución de la Eficiencia de las Baterías

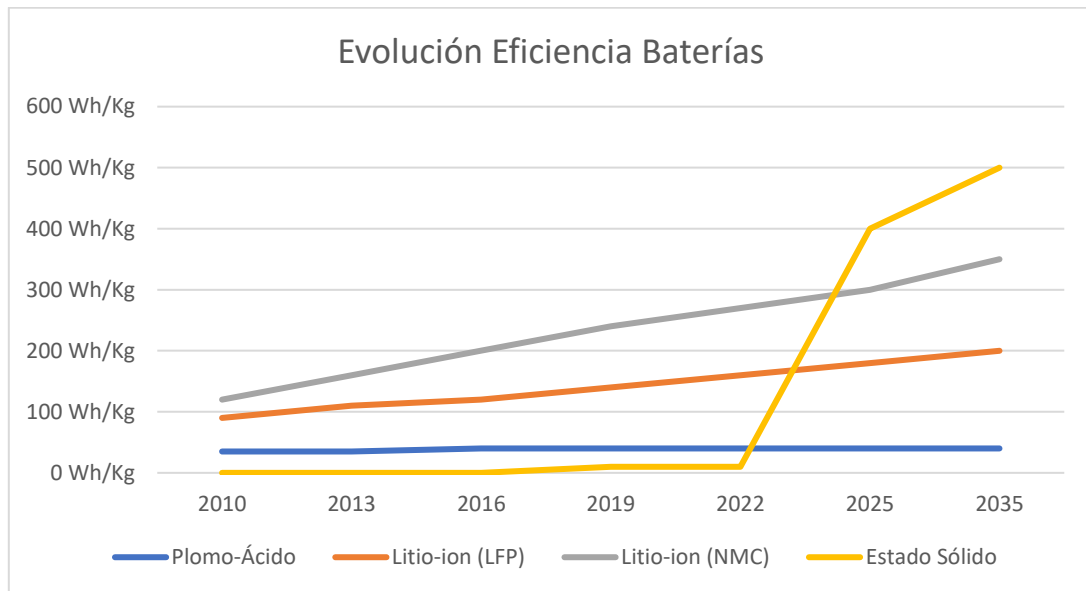


Figura: Elaboración propia con datos de la Evolución de la Densidad Energética Gravimétrica (Wh/kg). (International Energy Agency, 2024).

**Plomo-Ácido:** Son las más antiguas, muy contaminantes y con muy poca densidad energética (International Energy Agency, 2024).

**LFP (Fosfato de Hierro y Litio):** Conocidas por su seguridad, larga vida útil y menor costo, aunque con menor densidad energética (International Energy Agency, 2024).

**NMC (Níquel Manganeso Cobalto):** Ofrecen mayor densidad energética, siendo la opción preferida para vehículos eléctricos donde el peso y el alcance son críticos (International Energy Agency, 2024).

**Estado Sólido:** Tecnología emergente que reemplaza el electrolito líquido por uno sólido, prometiendo mayores densidades energéticas y seguridad mejorada. (International Energy Agency, 2024).

***Análisis Prospectivo: ¿Cuándo Podrán las Baterías Reemplazar a los Motores de Combustión?***

Para determinar cuándo las baterías podrían reemplazar en eficiencia a los motores de 4 tiempos, no basta con comparar directamente la densidad energética de una batería con la de la gasolina. Es necesario analizar la eficiencia del sistema completo, es decir, la capacidad de convertir la energía almacenada en trabajo útil (propulsión).

La gasolina posee una densidad energética extraordinariamente alta. Gasolina: ~12,700 Wh/kg (Reddit, s.f.). Versus la batería de Litio-ion (NMC) de última generación: ~270 Wh/kg (Reddit, s.f.). En términos de energía almacenada por kilogramo, la gasolina es aproximadamente 47 veces más densa que las mejores baterías de litio-ion comerciales actuales. Esta es la principal barrera tecnológica para la electrificación en aplicaciones que demandan alta potencia y largo alcance con un peso limitado.

***La Eficiencia del Sistema como Factor Clave Excluyente de la Energía Eléctrica***

La enorme ventaja de la gasolina se reduce drásticamente al considerar la eficiencia de conversión de los motores:

**Motor de Combustión Interna (ICE):** Es una máquina térmicamente ineficiente. Gran parte de la energía de la gasolina se pierde en forma de calor. La eficiencia de un motor de combustión para convertir la energía del combustible en trabajo mecánico útil es de solo un 20-30% (Endless Sphere & American Physical Society, 2012).

**Motor Eléctrico:** Es altamente eficiente, convirtiendo la energía eléctrica de la batería en trabajo mecánico con una eficiencia de aproximadamente el 90% (Endless Sphere, s.f.).

Calculando la densidad energética útil, el panorama cambia aunque la brecha sigue siendo grande, se ha reducido en los últimos años:

Sistema de Gasolina:  $12,700 \text{ Wh/kg} * 25\%$  (eficiencia promedio) =  $\sim 3,175 \text{ Wh/kg}$  útiles.

Sistema de Batería Li-ion (NMC):  $270 \text{ Wh/kg} * 90\%$  (eficiencia) =  $\sim 243 \text{ Wh/kg}$  útiles.

### **Proyección a Futuro y el Rol de las Baterías de Estado Sólido**

El reemplazo de los motores de combustión no requiere que las baterías alcancen los 12,700 Wh/kg. El objetivo es alcanzar una densidad energética útil que permita una autonomía y rendimiento comparables sin penalizaciones inaceptables de peso y volumen.

El próximo gran salto tecnológico son las baterías de estado sólido (SSB). Los prototipos actuales y las proyecciones a corto plazo apuntan a densidades energéticas de 400-500 Wh/kg a nivel de celda (Reddit, s.f.).

Sistema de Batería de Estado Sólido (proyectado):  $500 \text{ Wh/kg} * 90\%$  (eficiencia) =  
~450 Wh/kg útiles.

Con esta tecnología, la brecha de densidad energética útil se reduciría a aproximadamente 7:1. Aunque sigue siendo una diferencia considerable, empieza a ser manejable, especialmente si se considera que un sistema de propulsión eléctrico elimina el peso de un motor de combustión pesado, su sistema de refrigeración, escape y transmisión, lo que libera masa para más baterías (Endless Sphere, s.f.).

Comercialización a Escala de Baterías de Estado Sólido (2030-2035): Aunque las primeras SSB comerciales podrían aparecer antes de 2030, su producción a gran escala, la reducción de costos y su validación en entornos marinos exigentes tomará varios años (Puiu, 2025; Schmaltz et al., 2021). Avances en Químicas Post-Litio (Post-2035): Tecnologías como las baterías de Litio-Azufre (Li-S) o Litio-Aire (Li-Aire) prometen densidades energéticas teóricas mucho más altas, algunas comparables a la de la gasolina (Song et al., 2024). Sin embargo, enfrentan desafíos fundamentales de durabilidad y ciclo de vida que las sitúan en un horizonte de investigación a más largo plazo.

En conclusión, si bien la evolución de las baterías de litio-ion ha sido notable, su densidad energética sigue siendo el principal factor limitante para reemplazar directamente a los motores de combustión en aplicaciones de alta potencia y largo alcance. El verdadero cambio de paradigma llegará con la madurez y producción a escala de las baterías de estado sólido y, posteriormente, de químicas más avanzadas. Por lo tanto, una proyección realista

sitúa el punto de inflexión, donde la eficiencia del sistema eléctrico sea competitiva para un reemplazo generalizado, en el período 2035-2040.

## 5.2 Aplicación del Modelo de Puntuación Ponderada bajo el Principio de Realidad Operativa

El mercado de motores fuera de borda de alta potencia está dominado casi en su totalidad por la tecnología de 4 tiempos (UTI, 2023). La desaparición en 2020 de Evinrude, el último gran fabricante de motores de 2 tiempos de inyección directa de alta potencia, consolidó el dominio de los motores de 4 tiempos en este segmento (Boating Industry, 2020, p. 1). Este contexto de mercado obliga a reevaluar las alternativas, convirtiendo al motor de 4 tiempos en la tecnología de base para la comparación.

La Tabla 5 reevalúa las alternativas viables. El motor de 4 tiempos obtiene la calificación más alta debido a su alineación superior con los criterios más importantes para la I.M., sustentado en su madurez tecnológica, el respaldo de una industria global activa y su disponibilidad en el rango de potencia requerido, reflejado en la plena disposición para entrega oportuna de motores.

**Tabla 5: Matriz de Evaluación Ponderada**

Criterio (Peso)	Gasolina (4T)	Híbrido	Waterjet (4T)	Eléctrico (Proyección)
	Cal (Puntaje)	Cal (Puntaje)	Cal (Puntaje)	Cal (Puntaje)
Confiabilidad (21.6%)	9 (1.94)	5 (1.08)	6 (1.30)	6 (1.30)
Seguridad (20.2%)	8 (1.62)	7 (1.41)	10 (2.02)	8 (1.62)
Mantenimiento (13.5%)	8 (1.08)	4 (0.54)	6 (0.81)	8 (1.08)

Potencia (12.8%)	9 (1.15)	8 (1.02)	8 (1.02)	5 (0.64)
Autonomía (9.3%)	8 (0.74)	9 (0.84)	7 (0.65)	2 (0.19)
Economía (7.1%)	8 (0.57)	9 (0.64)	7 (0.50)	10 (0.71)
Maniobrabilidad (7.2%)	8 (0.58)	8 (0.58)	9 (0.65)	8 (0.58)
Flexibilidad (4.5%)	8 (0.36)	9 (0.41)	7 (0.32)	4 (0.18)
Sigilo (3.7%)	4 (0.15)	8 (0.30)	4 (0.15)	10 (0.37)
PUNTAJE TOTAL	8.19	07.02	7.37	6.77

Tabla 5: Elaboración propia con base en la encuesta realizada población OF - SO – IMP y valores técnicos del mercado. (Boats.net, 2022).

### **5.3 Justificación de la Calificación Superior del Motor de 4 Tiempos**

El motor de 4 tiempos se consolida como la opción estratégica por las siguientes razones:

**Confiabilidad y Sostenibilidad Estratégica:** La "Confiabilidad" en un contexto militar no solo se refiere a la robustez mecánica, sino a la garantía de sostenimiento a largo plazo. Al ser la tecnología estándar de la industria, los motores de 4 tiempos cuentan con el respaldo activo de fabricantes globales, un desarrollo continuo y una cadena de suministro de repuestos garantizada (Boats.net, 2022). Dependiendo de una tecnología de 2 tiempos de alta potencia, ya descontinuada, representaría una vulnerabilidad logística inaceptable (Mardo, 2022, p. 56).

**Mantenimiento y Soporte:** Aunque mecánicamente más complejos, los motores de 4 tiempos modernos tienen intervalos de servicio extendidos y una red de soporte técnico global. La disponibilidad de partes y personal certificado es un componente crítico del

"Mantenimiento" que supera la simplicidad de una tecnología sin respaldo industrial (Westshore Marine, 2023).

Potencia y Eficiencia Comprobadas: Los motores de 4 tiempos de última generación (V6/V8) han cerrado la brecha de rendimiento con los 2 tiempos, ofreciendo un par motor robusto, crucial para embarcaciones de combate pesadas, y una eficiencia de combustible superior que se traduce directamente en mayor autonomía operacional (Mercury Marine, s.f.).

Seguridad Integral (Ciberseguridad): Los motores modernos son sistemas ciberfísicos. Al elegir una tecnología activa, la IMC se beneficia de las actualizaciones de software y parches de seguridad del fabricante, mitigando riesgos cibernéticos. Una tecnología discontinuada presenta vulnerabilidades estáticas e incorregibles (Gibbs & Cox, 1998)

#### **5.4 Selección de la Alternativa Óptima**

La selección óptima para la modernización de la flota principal de la Infantería de Marina es la continuidad en la estandarización en torno a motores de Gasolina de 4 Tiempos de última generación. Esta decisión se fundamenta en su disponibilidad en el mercado de alta potencia, su alto rendimiento en los criterios clave de Confiabilidad y Mantenimiento, y el respaldo de una sólida industria global.

### **6. Metodología de Implementación y Desarrollo de Capacidades**

La continuidad en la implementación motores de 4 tiempos requiere un plan estructurado para asegurar que la inversión se traduzca en una capacidad operacional efectiva

y sostenible, esto teniendo como base el hecho de la continua mejora tecnológica que las empresas realizan. Así mismo, el presente estudio deberá llevarse nuevamente a cabo para el año 2032 con el fin de verificar la evolución de las baterías

### **6.1 Adquisición Selectiva y Pruebas de Campo Comparativas (T&E)**

El primer paso es una adquisición limitada de nuevos motores de 4 tiempos de alta potencia de diferentes fabricantes líderes para un programa de T&E comparativo. Las unidades deben ser probadas en los teatros fluviales de Colombia para evaluar su rendimiento real y seleccionar no solo una tecnología, sino un modelo y un fabricante específicos que ofrezcan el mejor Costo de Ciclo de Vida (LCC) para la ARC (Hassan y El-Gohary, 2015, p. 1).

### **6.2 Desarrollo de Capacidades Humanas y Logísticas**

La continuidad y modernización de motores de 4 tiempos moderna exige una actualización de las competencias del personal y de la cadena de suministro. El personal de mantenimiento debe recibir capacitación intensiva en el diagnóstico y reparación de motores con Inyección Electrónica de Combustible (EFI) y Unidades de Control del Motor (ECU), incluyendo el uso de software de diagnóstico (UTI, 2023). La estandarización en un solo modelo o familia de motores reduce la complejidad y el costo del inventario de repuestos. Sin embargo, es necesario mantener procesos investigativos sobre la evolución de los motores F/B híbridos y eléctricos, con el fin de planificar una posible transición hacia mejores tecnologías.

### **6.3 Integración, Sostenimiento y Soberanía Tecnológica (Rol de COTECMAR)**

COTECMAR es el pilar para la sostenibilidad a largo plazo. Debe convertirse en el centro de mantenimiento de tercer y cuarto escalón, con capacidad para realizar revisiones mayores (overhauls) y reparaciones complejas de los sistemas electrónicos. Adicionalmente, debe liderar el desarrollo de una doctrina y capacidad de ciberseguridad para proteger los sistemas de control de la propulsión contra posibles ataques (DNV, 2002, p. 1).

### **6.4 Indicadores de Desempeño y Medición de Efectividad**

Para evaluar la efectividad de la estandarización en motores de 4 tiempos, se establecerá un conjunto de Indicadores Clave de Desempeño (KPIs) cuantitativos. En el ámbito operacional, se medirá el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) para cuantificar el aumento en la confiabilidad, y la Tasa de Disponibilidad Operacional de las embarcaciones, esperando una mejora superior al 90%. Logísticamente, se monitoreará la reducción del Costo Total de Propiedad (TCO), incluyendo una disminución medible en el consumo de combustible por hora de operación y en los costos de mantenimiento por ciclo de vida. Adicionalmente, se evaluará la optimización de la cadena de suministro a través de la reducción en la variedad de repuestos en inventario y el tiempo promedio de reparación. Estos indicadores permitirán una evaluación objetiva del impacto estratégico, económico y táctico de la modernización, validando el retorno de la inversión y la mejora en la capacidad fluvial.

## 7. Resumen Ejecutivo y Hoja de Ruta para la Implementación

Esta investigación concluye con la recomendación de continuar con la estandarización de la flota de motores fuera de borda de alta potencia (175-250 HP) con tecnología de 4 tiempos, debido a su superioridad en confiabilidad, sostenimiento y respaldo industrial. Sin embargo, el cambio tecnológico será obligatorio en el futuro y su implementación se deberá ejecutar en tres fases estratégicas.

**Fase I - Planificación Estratégica (2025-2030):** El Comando de Infantería de Marina liderará la elaboración del plan detallado de renovación, estudio, seguimiento y cambio tecnológico. Esta fase definirá los requerimientos técnicos finales, establecerá el cronograma de adquisiciones y asegurará la asignación de recursos presupuestarios iniciales para el proyecto.

**Fase II - Adquisición y Evaluación (2030-2035):** Se procederá con la adquisición selectiva de prototipos para pruebas comparativas en teatros operacionales reales. El Batallón de Mantenimiento Anfibio iniciará el proceso formal de pruebas de campo en 2030, validando los nueve criterios descritos, así como el rendimiento, la mantenibilidad y el costo de ciclo de vida para seleccionar el modelo definitivo.

**Fase III - Implementación y Sostenimiento (Post-2035):** Basado en los resultados, se iniciará el despliegue masivo y la integración logística en toda la fuerza, desarrollando capacidades de mantenimiento avanzadas en conjunto con COTECMAR para garantizar la soberanía tecnológica y la disponibilidad operacional a largo plazo. (Armada Nacional, 2016)

## **7. Conclusiones**

El análisis confirma que, para el requerimiento de potencia de 175-250 HP, la tecnología de motores fuera de borda de 4 tiempos es categóricamente superior para las operaciones fluviales de la Infantería de Marina de Colombia. Esta superioridad se fundamenta en una evaluación integral que abarca criterios operacionales, económicos, logísticos y estratégicos. El factor más determinante es el riesgo estratégico: la consolidación de la industria marina global en torno a la tecnología de 4 tiempos hace que cualquier otra opción en este rango de potencia sea logísticamente insostenible. Finalmente, la creciente digitalización de estos sistemas introduce riesgos de ciberseguridad que deben ser gestionados de forma proactiva.

## **8. Recomendaciones**

Continuar con la implementación de la tecnología de motores fuera de borda de 4 tiempos como la plataforma estándar para la futura dotación y renovación de las embarcaciones de la Infantería de Marina que requieran potencias en el rango de 175-250 HP.

Mantener seguimiento y actualización de información, acerca de las nuevas tecnologías híbridas y eléctricas para la propulsión de motores fuera de borda, que permitan

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

Bogotá D.C., Colombia

un cambio tecnológico el cual será obligatorio en el futuro. Su implementación se deberá ejecutar en las tres fases estratégicas descritas anteriormente.

Institucionalizar el análisis de Costo Total de Propiedad (TOC) como la metodología estándar para todas las futuras adquisiciones de sistemas de propulsión, asegurando decisiones financieramente sostenibles a largo plazo (U.S. Department of Defense, 2001).

Contemplar el desarrollo de una doctrina de ciberseguridad para la Tecnología Operacional (OT) Marítima, comenzando con los nuevos sistemas de propulsión, para garantizar la resiliencia de las capacidades fluviales.

## Referencias Bibliográficas

- American Physical Society. (2012). *APS News*.  
<https://www.aps.org/publications/apsnews/2012/index.cfm>
- Armada Nacional de Colombia. (2006). *Manual de Operaciones Fluviales (ARC-3-105)*. Comando de la Armada Nacional.
- Armada Nacional de Colombia. (2014). *Doctrina de Material Naval Tomo III Mantenimiento (ARC OP7-1-3)*. Comando de la Armada Nacional.
- Armada Nacional de Colombia. (2016). *Plan de Desarrollo Naval 2042*. Comando de la Armada Nacional.
- Armada Nacional de Colombia. (2018). *Manual de Operaciones Fluviales (ARC OP3-8-2)*. Comando de la Armada Nacional.
- Armada Nacional de Colombia. (2021). *Manual de Tácticas y Técnicas Fluviales (ARC T3.4-1.1)*. Comando de la Armada Nacional.
- Armada Nacional de Colombia. (2024). *Doctrina de Mando y Control para la Armada Nacional (DOC. C2. ARC)*. Comando de la Armada Nacional.
- Armada Nacional de Colombia. (2024). *Libro Filosofía de Combate de la Armada Nacional*. Comando de la Armada Nacional.
- Armada Nacional de Colombia. (2024). *Plan Estratégico Naval PEN 2024-2027*. Comando de la Armada Nacional.
- Army University Press. (2024, 1 de marzo). *Agile, lethal, ready: Transforming sustainment for the future fight*. Army.mil.  
[https://www.army.mil/article/274299/agile\\_lethal\\_ready\\_transforming\\_sustainment\\_for\\_the\\_future\\_fight](https://www.army.mil/article/274299/agile_lethal_ready_transforming_sustainment_for_the_future_fight)

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

Bioenno Power. (2024, 20 de mayo). *The future of marine batteries: Innovations and trends*. <https://www.bioenno.com/blogs/news/the-future-of-marine-batteries-innovations-and-trends>

Boating Industry. (2020, 22 de enero). *Disappearance of the last big brand of 2-stroke outboard motors*. <https://boatingindustry.com/top-stories/2020/01/22/disappearance-of-the-last-big-brand-of-2-stroke-outboard-motors/>

Boats.net. (2022, 10 de mayo). *2-Stroke vs 4-Stroke Outboards: Pros and Cons*. <https://www.boats.net/blog/2-stroke-vs-4-stroke-outboards-pros-and-cons>

Caceres, S. (2017). *El Estado y el Mar: Relaciones con el Poder Marítimo, el poder Naval y el Desarrollo Nacional*. Escuela Superior de Guerra.

Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval, Marítima y Fluvial (COTECMAR). (2024). *Informe de Actividades de Ciencia, Tecnología e Innovación 2023*.

Defense Acquisition University. (n.d.). *Total Ownership Cost (TOC)*. Recuperado el 1 de agosto de 2025, de <https://www.dau.edu/acquikipedia/pages/articledetails.aspx?aid=277>

Desjardins, D. (2012). *Multi-criteria decision making methods for the Department of National Defence* [Proyecto de investigación de Maestría en Estudios de Defensa]. Canadian Forces College. [https://publications.gc.ca/collections/collection\\_2013/dn-nd/D4-10-10-2012-eng.pdf](https://publications.gc.ca/collections/collection_2013/dn-nd/D4-10-10-2012-eng.pdf)

DNV. (n.d.). *Maritime cyber security*. Recuperado el 1 de agosto de 2025, de <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/cyber-security/index.html>

Fibery. (2024, 18 de marzo). *Weighted Scoring Model: How to Prioritize with a Data-Driven Approach*. <https://fibery.io/blog/weighted-scoring-model>

Flux Marine. (2025). *From lead-acid to solid-state: The evolution of marine batteries*. Flux Marine.

Gibbs & Cox. (n.d.). *Cybersecurity*. Recuperado el 1 de agosto de 2025, de <https://www.gibbscox.com/cybersecurity/>

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

Bogotá D.C., Colombia

Grau, L. W. (2014). Riverine Operations. *Infantry Magazine*, 103(3), 29–32. <https://www.armyupress.army.mil/Portals/7/infantry-magazine/archives/2014/Jul-Sept/pdfs/JUL-SEPT2014.pdf>

Hassan, A., & El-Gohary, N. (2015). *Equipment life-cycle cost analysis with support for the equipment replacement decision* (Report No. MN/RC 2015-38). Minnesota Department of Transportation. <https://www.lrrb.org/pdf/201516.pdf>

Hernández, N., & Vera, J. (2017). *Análisis prospectivo y estratégico de la Infantería de Marina*. Universidad Externado de Colombia.

Iqbal, M. J., Ahmad, S., & Ali, M. (2023). A comparative study of conventional, electric, and hybrid ship propulsion systems. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*, (55), 23–33. <http://ijomam.com/wp-content/uploads/2023/12/023-033-Iqbal-et-al.pdf>

Liveforphysics. (2008, 20 de octubre). *Energy density of gasoline vs lipo batteries* [Publicación en foro en línea]. Endless Sphere Forums. <https://endless-sphere.com/sphere/threads/energy-density-of-gasoline-vs-lipo-batteries.5212/>

López Pulgarín, N. A. (2012). *Doctrina Operaciones Fluviales*. Repositorio Institucional ESDEG.

Mardo, M. (2022). The principles of life-cycle costing of the assets of the defence forces. *Sõjateadlane (Estonian Journal of Military Studies)*, 19, 139–173. <https://doi.org/10.69994/sjat.2022.19.05>

Mercury Marine. (n.d.). *Pro XS® 175-300hp Outboard Motor*. Recuperado el 1 de agosto de 2025, de <https://www.mercurymarine.com/en/us/engines/outboard/pro-xs/175-300-hp/>

Naval History and Heritage Command. (n.d.). *Riverine warfare: The U.S. Navy's operations on inland waters*. Recuperado el 1 de agosto de 2025, de <https://www.history.navy.mil/browse-by-topic/wars-conflicts-and-operations/riverine-warfare.html>

Raider Outboards. (n.d.-a). *About Raider Outboards*. Recuperado el 1 de agosto de 2025, de <https://raideroutboards.com/about-raider-outboards/>

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

Bogotá D.C., Colombia

Raider Outboards. (n.d.-b). *Multi-Fuel Submersible Electric Start Outboard Engines*. Recuperado el 1 de agosto de 2025, de <https://raideroutboards.com/raider-series/>

Ríos, J. C., & Ríos, S. A. (2017). *Modelo de Puntuación Ponderado para la Toma de Decisiones* [Ponencia]. XIII Congreso Español sobre Tecnologías y Lógica Fuzzy, Mérida, España. <https://www.researchgate.net/publication/320141675>

Sampieri, R. H. (2014). *Metodología de la Investigación* (6ª ed.). McGraw-Hill Education.

SCMglobe. (2020, 21 de agosto). *What is military supply chain management?*. <https://scmglobe.com/what-is-military-supply-chain-management/>

Simpson, T. (1969). *Fire Support in riverine operations*. U.S. Marine Corps.

Universal Technical Institute. (2023, 2 de mayo). *2-Stroke vs. 4-Stroke Outboard Motors*. <https://www.uti.edu/blog/marine/2-stroke-vs-4-stroke-outboard-motors>

Vásquez Barrera, R. (2022). La proyección de Colombia como potencia fluvial mundial en el siglo XXI. En S. Uribe-Cáceres (Ed.), *Colombia potencia fluvial: Una mirada a la riqueza del Tercer Mar*. Sello Editorial ESDEG.

Wärtsilä. (n.d.). *Hybrid solutions*. Recuperado el 1 de agosto de 2025, de <https://www.wartsila.com/marine/build-and-operate/hybrid-solutions>

Westshore Marine. (2023, 28 de junio). *2 Stroke vs 4 Stroke Outboard Motors Comparison*. <https://www.westshoremarine.ca/blog/2-stroke-vs-4-stroke-outboard-motors-comparison--33658>

Yap, W. K., D'Souza, M. J., & Lim, C. S. (2022). A review of propulsion systems for ships. *Encyclopedia*, 2(1), 357–372. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia2010023>