



# Sistema Autónomo de Monitoreo de Cascos de Buques mediante Drones Submarinos e IA

## 1. Resumen Ejecutivo

### 1. Resumen Ejecutivo

La industria marítima global enfrenta desafíos críticos en el monitoreo de la integridad de los cascos de buques, con métodos de inspección tradicionales que son costosos, ineficientes y generadores de tiempos de inactividad significativos. Esto resulta en impactos económicos considerables por corrosión y biofouling no detectados. Nuestro proyecto, "Sistema Autónomo de Monitoreo de Cascos de Buques mediante Drones Submarinos e IA", propone una solución transformadora: un sistema autónomo e integrado que optimizará la seguridad operacional, la eficiencia energética y la vida útil de los activos marítimos, superando las limitaciones actuales mediante tecnologías de vanguardia.

Para lograr esta visión, el proyecto se centrará en un estudio de vigilancia tecnológica exhaustivo para identificar las IA más prometedoras para detección de corrosión y biofouling, los AUVs adecuados y las normativas navales pertinentes. La metodología adoptada es el Modelo en V de Ingeniería de Sistemas, garantizando un desarrollo riguroso y una verificación y validación exhaustiva de la integración de hardware y software, asegurando la fiabilidad y eficiencia del sistema propuesto.

Los resultados clave incluyen un informe detallado de vigilancia tecnológica y requisitos normativos, que sentará las bases para el diseño. Los impactos esperados son significativos: un avance técnico y científico en el monitoreo predictivo marítimo, una reducción sustancial de costos operativos para las navieras, y mejoras en la seguridad laboral y la sostenibilidad ambiental al reducir emisiones. Este sistema representa una propuesta de valor inigualable para la industria.

Este proyecto es una iniciativa estratégica y oportuna que posicionará a las organizaciones involucradas a la vanguardia de la tecnología de mantenimiento naval, estableciendo un nuevo estándar para la gestión proactiva de la integridad de los buques a nivel global.

## 2. Generalidades del Proyecto

- Descripción:** El proyecto se centra en un estudio de vigilancia tecnológica sobre el uso de vehículos submarinos autónomos (AUV) equipados con visión por computadora para la inspección automatizada de cascos de buques militares y comerciales. Busca identificar tecnologías de detección de corrosión y biofouling mediante IA, fabricantes de drones submarinos y normativas navales de mantenimiento predictivo. El objetivo final es justificar la implementación de esta tecnología para reducir los tiempos de dique seco y optimizar la eficiencia operativa de la flota.
- Palabras Clave:** Vigilancia Tecnológica, Drones Submarinos, Inteligencia Artificial, Inspección Naval, Mantenimiento Predictivo

## 3. Planteamiento del Problema y Justificación

La industria marítima global, que abarca tanto flotas militares como comerciales, enfrenta una presión creciente para garantizar la seguridad operacional, optimizar la eficiencia energética y prolongar la vida útil de sus activos. En este contexto, el monitoreo de la integridad estructural de los cascos de los buques es una tarea fundamental. Sin embargo, los métodos de inspección tradicionales, que dependen en gran medida de la intervención humana y a menudo requieren costosos y prolongados

períodos en dique seco, resultan ineficientes, disruptivos y generan tiempos de inactividad significativos, con un impacto económico considerable debido a la corrosión y el biofouling no detectados a tiempo.

A pesar de la criticidad de estas inspecciones, las soluciones actuales presentan limitaciones intrínsecas que impiden un monitoreo verdaderamente proactivo y continuo. Como se desprende del "Marco Teórico y Estado del Arte", si bien los Vehículos Submarinos Autónomos (AUV) y los avances en Inteligencia Artificial (IA) han demostrado un potencial transformador (Bobkov et al., 2023; Imran et al., 2023, 2024), aún persisten brechas significativas. Específicamente, existe una escasez crítica de grandes y diversos conjuntos de datos etiquetados, esenciales para entrenar modelos de IA robustos en entornos submarinos variables. Además, la robustez de los sistemas de visión por computadora se ve comprometida por condiciones submarinas adversas como la turbidez del agua y la iluminación fluctuante, un desafío que las cámaras de eventos (Dadson y Barbalata, 2025) buscan mitigar pero que aún requiere soluciones integradas. Esta situación crea una "brecha tecnológica" evidente: la falta de un sistema autónomo e integrado que pueda realizar inspecciones de casco de manera consistente, precisa y confiable en condiciones operativas reales, superando las limitaciones de los datos y la percepción ambiental.

Este proyecto, "Sistema Autónomo de Monitoreo de Cascos de Buques mediante Drones Submarinos e IA", emerge como la respuesta directa y necesaria para cerrar esta brecha. Al centrarse en un estudio de vigilancia tecnológica, el proyecto abordará de forma estratégica la identificación de tecnologías de detección de corrosión y biofouling basadas en IA, así como los fabricantes de AUVs más adecuados y las normativas navales pertinentes. La integración de AUVs equipados con visión por computadora avanzada y algoritmos de IA de última generación permitirá superar las limitaciones actuales, facilitando la adquisición de datos de alta calidad y su análisis inteligente para la detección temprana de anomalías, incluso en entornos desafiantes. Este enfoque no solo optimizará la recolección de datos, sino que sentará las bases para sistemas de mantenimiento predictivo verdaderamente efectivos, transformando la inspección de cascos de una tarea reactiva a una proactiva.

La implementación de esta tecnología representa un paso estratégico y oportuno para la industria naval. Al reducir drásticamente los tiempos en dique seco y optimizar la eficiencia operativa de la flota, el proyecto no solo generará ahorros económicos sustanciales, sino que también mejorará significativamente la seguridad y la sostenibilidad de las operaciones marítimas. Este sistema innovador posicionaría a las organizaciones involucradas a la vanguardia de la tecnología de mantenimiento naval, fomentando la adopción de prácticas de la Industria 4.0 y estableciendo un nuevo estándar para la gestión de la integridad de los buques en la región y a nivel global. Su éxito es crítico para la evolución hacia un paradigma de mantenimiento predictivo y proactivo, esencial en el dinámico panorama marítimo actual.

## **4. Marco Teórico y Estado del Arte**

### **4. Marco Teórico y Estado del Arte**

#### **4.1. Introducción al Dominio**

El monitoreo de la integridad estructural de los cascos de buques, tanto militares como comerciales, es una tarea crítica para garantizar la seguridad operacional, la eficiencia energética y la longevidad de la

flota. Tradicionalmente, estas inspecciones han dependido en gran medida de la intervención humana, a menudo requiriendo el costoso y lento proceso de dique para garantizar la seguridad operacional, la eficiencia energética y la longevidad de la flota. Tradicionalmente, estas inspecciones han dependido en gran medida de la intervención humana, a menudo requiriendo el costoso y lento proceso de dique seco o el despliegue de buzos. Sin embargo, la emergencia de los Vehículos Submarinos Autónomos (AUV, por sus siglas en inglés) y los avances exponenciales en la Inteligencia Artificial (IA), particularmente en visión por computadora, están revolucionando este dominio. Estos sistemas autónomos ofrecen la promesa de inspecciones más frecuentes, seguras, precisas y eficientes, permitiendo la detección temprana de anomalías como la corrosión y el biofouling.

La integración de AUVs con capacidades avanzadas de IA para la inspección naval representa un cambio de paradigma hacia un mantenimiento predictivo y proactivo. Este enfoque busca no solo identificar el daño existente, sino también predecir su progresión y optimizar los calendarios de mantenimiento, minimizando así los tiempos de inactividad y los costos operativos. La capacidad de los AUVs para operar en entornos submarinos complejos, combinada con la potencia analítica de la IA para procesar grandes volúmenes de datos visuales, sienta las bases para un sistema de monitoreo autónomo altamente efectivo.

#### 4.2. Revisión de la Literatura (Literature Review)

La investigación en la inspección de cascos de buques mediante AUVs y IA ha experimentado un crecimiento significativo en la última década. Un trabajo fundamental en este ámbito es el de **Bobkov et al. (2023)**, quienes proponen un método para la inspección automatizada de cascos de buques utilizando un AUV equipado con una cámara estéreo. Su enfoque incluye la navegación visual (odometría visual) para el cálculo de la trayectoria del AUV y la construcción de un modelo 3D de la superficie del casco a partir de nubes de puntos. Este método permite un análisis visual detallado del estado del casco, demostrando la viabilidad de la reconstrucción 3D para la detección de anomalías.

En el contexto de la detección de corrosión, **Imran et al. (2023)** realizaron una revisión exhaustiva de las aplicaciones de la inteligencia artificial en la predicción y detección de la corrosión marina. Destacan cómo los algoritmos de IA, en particular las técnicas de visión por computadora y procesamiento de imágenes, han surgido como herramientas populares para superar las limitaciones de los enfoques tradicionales, que a menudo son lentos y difíciles de ejecutar en áreas inaccesibles. Su trabajo subraya la importancia de los modelos predictivos basados en IA para evitar fallos inesperados y optimizar el mantenimiento. Complementariamente, **Imran et al. (2024)** ampliaron esta revisión al analizar los enfoques de mantenimiento predictivo para la detección y el mantenimiento de la corrosión en estructuras marinas, enfatizando la transición de un mantenimiento reactivo a uno proactivo.

La detección de biofouling, otro desafío crítico en la inspección de cascos, también ha sido abordada con soluciones basadas en IA. **O'Byrne et al. (2020)** exploraron el uso de datos virtuales para entrenar métodos de visión por computadora basados en aprendizaje profundo para detectar incrustaciones de percebes en cascos de buques. Demostraron que los modelos entrenados con datos sintéticos pueden aplicarse con resultados prometedores para detectar biofouling en el mundo real, lo que abre una vía para superar la escasez de grandes conjuntos de datos anotados en entornos submarinos.

Más recientemente, **Dadson y Barbalata (2025)** introdujeron el concepto de "Marine Event Vision", aprovechando las cámaras de eventos para una detección robusta de objetos en escenarios marinos.

Aunque no se centran exclusivamente en el biofouling, su investigación aborda los desafíos únicos de los entornos marinos, como la turbidez del agua, la iluminación variable y los movimientos dinámicos de los objetos, factores que son directamente relevantes para la detección precisa del biofouling y otras anomalías. Su trabajo sugiere nuevas vías para sistemas de visión más resilientes en condiciones submarinas adversas.

Estos estudios demuestran la creciente sofisticación de los sistemas de inspección autónomos y la indispensable contribución de la IA para el análisis de datos complejos en entornos submarinos.

#### 4.3. Tecnologías y Enfoques Actuales (State of the Art)

El estado del arte en el monitoreo de cascos de buques mediante drones submarinos e IA se caracteriza por la convergencia de varias tecnologías avanzadas. Los **AUVs** modernos están equipados con sistemas de navegación sofisticados que incluyen sonares, DVLs (Doppler Velocity Logs) y, crucialmente, cámaras estéreo y de alta resolución. La capacidad de estos vehículos para mantener trayectorias precisas a una distancia constante del casco es fundamental para la adquisición de datos de calidad, como lo destaca el trabajo de Bobkov et al. (2023) sobre la odometría visual y el control de movimiento.

En el ámbito de la **Inteligencia Artificial**, los enfoques de aprendizaje profundo (Deep Learning) dominan la detección y clasificación de anomalías. Las Redes Neuronales Convolucionales (CNNs) son ampliamente utilizadas para la detección de corrosión y biofouling a partir de imágenes y videos submarinos. Estos modelos pueden ser entrenados para identificar patrones visuales asociados con diferentes tipos de corrosión (ej. picaduras, corrosión generalizada) y especies de biofouling. La creación de modelos 3D del casco a partir de datos de cámaras estéreo o técnicas de fotogrametría permite un análisis espacial detallado, proporcionando contexto a las detecciones de IA. La investigación de O'Byrne et al. (2020) sobre el uso de datos virtuales para entrenar modelos de aprendizaje profundo para la detección de biofouling es un ejemplo clave de cómo se abordan los desafíos de los conjuntos de datos en este campo.

La integración de estos sistemas se extiende al **mantenimiento predictivo (PdM)**. Los datos recopilados por los AUVs, procesados por algoritmos de IA, alimentan plataformas de PdM que monitorean la salud del casco en tiempo real, predicen la progresión del daño y optimizan los programas de mantenimiento. Como se menciona en la revisión de Imran et al. (2024), el PdM busca predecir el momento de las fallas del sistema y determinar las actividades de mantenimiento requeridas, basándose en el análisis de datos históricos y en tiempo real. Los sistemas actuales están explorando el uso de sensores multimodales para obtener una evaluación más completa del estado del casco, combinando información visual con datos de otros sensores para una detección más robusta.

#### 4.4. Brechas de Conocimiento y Oportunidades (Knowledge Gaps & Opportunities)

A pesar de los avances significativos, existen varias brechas de conocimiento y oportunidades para futuras investigaciones en el monitoreo autónomo de cascos de buques. Una limitación persistente es la **necesidad de grandes y diversos conjuntos de datos etiquetados** para entrenar modelos de IA robustos. Los entornos submarinos son inherentemente variables en términos de iluminación, turbidez del agua y la diversidad de tipos de corrosión y biofouling, lo que dificulta la generalización de los modelos. La generación de datos sintéticos, como se exploró en el trabajo de O'Byrne et al. (2020), ofrece una vía prometedora para mitigar esta escasez, pero requiere una mayor sofisticación para

replicar la complejidad del mundo real.

Otra brecha importante reside en la **robustez de los sistemas de visión por computadora en condiciones submarinas adversas**. La variabilidad de la iluminación, la dispersión de la luz y la presencia de partículas en el agua pueden degradar significativamente la calidad de la imagen y, por ende, el rendimiento de los algoritmos de IA. La investigación sobre cámaras de eventos (Dadson y Barbalata, 2025) y otras tecnologías de sensores emergentes presenta una oportunidad para desarrollar sistemas de percepción más resilientes.

Además, la **integración de datos multimodales** procedentes de diversos sensores (ópticos, acústicos, magnéticos) en un marco de IA cohesivo aún presenta desafíos. Un enfoque holístico que combine estas fuentes de datos podría mejorar significativamente la precisión y la fiabilidad de la detección de defectos. Finalmente, el desarrollo de **IA explicable (XAI)** es crucial para la adopción de estas tecnologías en la inspección naval. La capacidad de los operadores humanos para comprender y confiar en las decisiones de los sistemas de IA es fundamental, especialmente en aplicaciones de seguridad crítica, como se sugiere en el contexto más amplio del mantenimiento predictivo (Upasane et al., 2024). Abordar estas brechas no solo mejorará la eficacia de los sistemas de monitoreo, sino que también acelerará su implementación y aceptación en la industria naval.

## 5. Objetivos

Establecer un sistema autónomo e integrado de monitoreo de cascos de buques mediante drones submarinos y técnicas avanzadas de Inteligencia Artificial para optimizar la seguridad operacional, la eficiencia energética y la vida útil de los activos marítimos, superando las limitaciones de los métodos de inspección tradicionales.

1. **Objetivo:** Realizar un estudio de vigilancia tecnológica exhaustivo para identificar y evaluar tecnologías clave y requisitos normativos.

- **Específico (S):** Identificar las tecnologías de detección de corrosión y biofouling basadas en IA más prometedoras, los fabricantes de Vehículos Submarinos Autónomos (AUVs) con capacidades adecuadas y las normativas navales internacionales pertinentes para el monitoreo de cascos de buques.
- **Medible (M):** Se producirá un informe detallado que documente al menos 5 tecnologías de IA relevantes, 3 fabricantes de AUVs evaluados y un compendio de las principales normativas navales aplicables, con la definición de los requisitos técnicos preliminares para el sistema.
- **Alcanzable (A):** Este objetivo es realista y se puede lograr mediante investigación bibliográfica, consulta con expertos de la industria y análisis de mercado dentro del plazo establecido.
- **Relevante (R):** Este estudio es fundamental para sentar las bases tecnológicas y regulatorias del proyecto, asegurando que el sistema propuesto sea viable, conforme a la normativa y competitivo, abordando directamente la

## 6. Metodología Propuesta

### 6. Metodología Propuesta

**Framework Seleccionado:** Modelo en V de Ingeniería de Sistemas

El Modelo en V se selecciona como el framework metodológico principal debido a la naturaleza intrínseca del proyecto, que implica la integración de componentes de hardware (drones submarinos) y software (Inteligencia Artificial) en un sistema autónomo. Este modelo asegura una rigurosa verificación y validación en cada etapa del ciclo de vida del desarrollo, lo cual es crítico para garantizar la fiabilidad, seguridad operacional y eficiencia del sistema propuesto, abordando directamente el objetivo general de establecer un sistema de monitoreo integrado y superando las limitaciones de los métodos tradicionales mediante pruebas exhaustivas y control de calidad.

#### Fases Principales de la Metodología:

- **Fase 1: Análisis y Definición de Requisitos:** Se establecerán los requisitos funcionales y no funcionales del sistema, incluyendo el estudio de vigilancia tecnológica, la identificación de normativas y la definición de requisitos técnicos preliminares.
- **Fase 2: Diseño Arquitectónico y de Subsistemas:** Se definirá la arquitectura global del sistema, incluyendo la selección de la plataforma AUV, la estructura del módulo de IA, los sistemas de sensórica y los protocolos de comunicación.
- **Fase 3: Desarrollo e Implementación de Componentes:** Se procederá con la ingeniería, adaptación y codificación de los módulos de hardware (plataforma AUV, integración de sensores) y software (algoritmos de IA para detección, control y gestión de datos).
- **Fase 4: Integración y Pruebas de Subsistemas:** Se realizará la integración de los componentes desarrollados y se efectuarán pruebas exhaustivas para asegurar su correcta interacción y funcionamiento conjunto.
- **Fase 5: Verificación y Validación del Sistema Integral:** Se validará el sistema completo contra los requisitos iniciales en entornos controlados y semi-reales para confirmar su rendimiento, seguridad y cumplimiento de los objetivos del proyecto.
- **Fase 6: Despliegue Piloto y Optimización:** Se implementará el sistema en un entorno operativo real para una fase piloto, recopilando datos para su optimización continua y refinamiento final antes de la operación a gran escala.

## 7. Plan de Ejecución y Gestión

### 7.1. Cronograma de Actividades

Fase	Actividad / Hito Clave	Entregable Principal	Duración Estimada (Semanas)
<b>Fase 1: Análisis y Definición de Requisitos</b>	<i>Establecimiento de requisitos funcionales y no funcionales, vigilancia tecnológica y normativas.</i>	<b>10</b>	
1.1. Investigación y Análisis de Tecnologías de IA para Detección	Informe de Vigilancia Tecnológica (Tecnologías IA)	3	
1.2. Evaluación de Fabricantes de AUVs y Plataformas Submarinas	Informe de Evaluación de Plataformas AUV	2	

Fase	Actividad / Hito Clave	Entregable Principal	Duración Estimada (Semanas)
1.3. Identificación y Análisis de Normativas Navales Aplicables	Compendio de Normativas Navales	2	
1.4. Definición de Requisitos Técnicos y Operacionales Preliminares	Documento de Requisitos Preliminares del Sistema	3	
<b>Fase 2: Diseño Arquitectónico y de Subsistemas</b>	<i>Definición de la arquitectura global del sistema, incluyendo AUV, IA, sensórica y comunicaciones.</i>	<b>13</b>	
2.1. Diseño de la Arquitectura Global del Sistema	Documento de Arquitectura del Sistema	4	
2.2. Selección y Especificación de Plataforma AUV y Sensores	Especificaciones Técnicas de Hardware	3	
2.3. Diseño Detallado del Módulo de IA y Algoritmos	Diseño Detallado del Módulo IA	4	
2.4. Definición de Protocolos de Comunicación y Seguridad	Documento de Protocolos de Comunicación	2	
<b>Fase 3: Desarrollo e Implementación de Componentes</b>	<i>Ingeniería, adaptación y codificación de módulos de hardware y software.</i>	<b>29</b>	
3.1. Adquisición y Adaptación de la Plataforma AUV	Plataforma AUV Adaptada	8	
3.2. Desarrollo e Integración de Sistemas de Sensórica	Subsistema de Sensores Integrado	6	
3.3. Implementación de Algoritmos de IA para Detección y Navegación	Módulo de IA Desarrollado (v1.0)	10	
3.4. Desarrollo de Interfaz de Usuario y Sistema de Gestión de Datos	Prototipo de Interfaz de Usuario y Gestor de Datos	5	
<b>Fase 4: Integración y Pruebas de Subsistemas</b>	<i>Integración de componentes y pruebas exhaustivas para asegurar su interacción y funcionamiento.</i>	<b>12</b>	
4.1. Integración Hardware-Software de Componentes	Sistema AUV con Módulos Integrados	4	

Fase	Actividad / Hito Clave	Entregable Principal	Duración Estimada (Semanas)
4.2. Pruebas Unitarias y de Integración de Módulos de IA	Informes de Pruebas de Módulos IA	3	
4.3. Pruebas de Comunicación y Control del AUV	Informes de Pruebas de Comunicación y Control	3	
4.4. Refinamiento y Optimización Preliminar de Subsistemas	Subsistemas Optimizados	2	
<b>Fase 5: Verificación y Validación del Sistema Integral</b>	<i>Validación del sistema completo en entornos controlados y semi-reales contra requisitos iniciales.</i>	<b>17</b>	
5.1. Planificación y Diseño de Escenarios de Prueba	Plan de Pruebas del Sistema Integral	3	
5.2. Pruebas en Entorno Controlado (Laboratorio/Piscina)	Informe de Verificación en Entorno Controlado	5	
5.3. Pruebas en Entorno Semi-Real (Aguas Confinadas)	Informe de Validación en Entorno Semi-Real	6	
5.4. Análisis de Resultados y Ajustes Finales del Sistema	Informe Final de Verificación y Validación	3	
<b>Fase 6: Despliegue Piloto y Optimización</b>	<i>Implementación en entorno operativo real, recopilación de datos y optimización continua.</i>	<b>22</b>	
6.1. Preparación para Despliegue Piloto y Capacitación	Plan de Despliegue Piloto y Material de Capacitación	4	
6.2. Implementación del Sistema en Entorno Operativo Real	Sistema Operativo en Fase Piloto	8	
6.3. Monitoreo, Recopilación de Datos y Evaluación de Rendimiento	Informes de Monitoreo y Rendimiento Piloto	6	
6.4. Optimización Continua y Refinamiento del Sistema	Sistema Optimizado para Operación	4	

## 7.2. Matriz de Riesgos

#	Riesgo Potencial	Probabilidad	Impacto	Estrategia de Mitigación
1	<b>Precisión y Robustez de los Algoritmos de IA para Detección y Navegación</b> <i>Relacionado con: Fase 3.3, Fase 4.2, Fase 5.3, Fase 6.3</i>	Media	Alto	Implementar un enfoque de desarrollo iterativo para los algoritmos de IA, utilizando conjuntos de datos de entrenamiento amplios y diversos. Realizar pruebas de rendimiento continuas en entornos simulados y controlados (Fase 4.2, 5.2). Establecer métricas de rendimiento claras y tener planes de contingencia para algoritmos alternativos o enfoques híbridos en caso de no alcanzar la precisión requerida.
2	<b>Desafíos de Integración Hardware-Software y Rendimiento del AUV en Condiciones Submarinas Variables</b> <i>Relacionado con: Fase 2.2, Fase 3.1, Fase 3.2, Fase 4.1, Fase 5.3</i>	Alta	Alto	Adoptar un diseño modular para la plataforma AUV y los sensores, facilitando la integración y el reemplazo. Realizar pruebas exhaustivas de subsistemas (Fase 4) en condiciones de laboratorio antes de las pruebas en agua. Colaborar estrechamente con los fabricantes de AUV y sensores para asegurar la compatibilidad y el soporte técnico.

#	Riesgo Potencial	Probabilidad	Impacto	Estrategia de Mitigación
3	<b>Retrasos significativos en la adquisición de la plataforma AUV o componentes críticos</b> <i>Relacionado con: Fase 2.2, Fase 3.1</i>	Media	Medio	Iniciar el proceso de adquisición con suficiente antelación. Identificar y calificar proveedores alternativos para componentes clave. Negociar contratos con cláusulas de penalización por retrasos y mantener un inventario de seguridad para ítems críticos si es viable.
4	<b>Fallos o interrupciones en los sistemas de comunicación submarina y control del AUV</b> <i>Relacionado con: Fase 2.4, Fase 4.3, Fase 5.3, Fase 6.2</i>	Media	Alto	Diseñar el sistema con redundancia en los protocolos de comunicación (ej., acústica, óptica para corta distancia). Implementar protocolos robustos de corrección de errores y mecanismos de auto-recuperación para el AUV. Desarrollar modos de operación autónomos de emergencia en caso de pérdida total de comunicación.
5	<b>Incumplimiento de las normativas navales, de seguridad o medioambientales aplicables</b> <i>Relacionado con: Fase 1.3, Fase 6.2</i>	Media	Alto	Realizar una vigilancia tecnológica y normativa continua (Fase 1.3) con asesoramiento legal especializado. Integrar los requisitos normativos desde las fases de diseño (Fase 2) y desarrollo. Obtener todas las certificaciones y permisos necesarios antes del despliegue piloto (Fase 6.1).

## **8. Resultados e Impactos Esperados**

### **8. Resultados e Impactos Esperados**

#### **#### 8.1. Resultados Esperados (Entregables)**

- **Informe de Vigilancia Tecnológica y Requisitos Normativos:** Un informe detallado que documenta las tecnologías de detección de corrosión y biofouling basadas en IA más prometedoras, los fabricantes de Vehículos Submarinos Autónomos (AUVs) con capacidades adecuadas, un compendio de las principales normativas navales aplicables y la definición de los requisitos técnicos preliminares para el sistema. Este entregable corresponde al Objetivo Específico 1: Realizar un estudio de vigilancia tecnológica exhaustivo.

#### **#### 8.2. Impactos Esperados**

- **Impacto Técnico/Científico:**

El proyecto impulsará significativamente el estado del arte en el monitoreo marítimo al integrar de forma innovadora drones submarinos autónomos (AUVs) con técnicas avanzadas de Inteligencia Artificial para la detección y análisis de corrosión y bioincrustaciones en cascos de buques. Se desarrollarán nuevas metodologías para la adquisición, procesamiento y análisis de datos subacuáticos, estableciendo un paradigma para la inspección predictiva y la gestión de mantenimiento en la industria naval, superando las limitaciones de los métodos tradicionales y sentando las bases para futuras aplicaciones de IA en entornos marinos complejos.

- **Impacto Económico:**

Se espera una reducción sustancial de los costos operativos para las empresas navieras, derivada de la optimización de la seguridad operacional, la mejora de la eficiencia energética (al minimizar el arrastre causado por el biofouling) y la extensión de la vida útil de los activos marítimos. La implementación del sistema permitirá una planificación de mantenimiento más precisa y predictiva, reduciendo el tiempo de inactividad de los buques y los gastos asociados a las inspecciones manuales y reparaciones reactivas. Esto aumentará la competitividad de la flota y generará nuevas oportunidades de negocio en servicios de monitoreo y mantenimiento avanzado.

- **Impacto Social/Ambiental:**

Desde una perspectiva social, el proyecto mejorará la seguridad laboral al reducir la necesidad de intervenciones humanas en entornos subacuáticos potencialmente peligrosos. Además, fomentará la creación de nuevos puestos de trabajo especializados en la operación de AUVs y el análisis de datos de IA, capacitando a la fuerza laboral en tecnologías emergentes. Ambientalmente, al asegurar cascos de buques más limpios y eficientes, el sistema contribuirá directamente a la reducción del consumo de combustible y, consecuentemente, a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero y de la huella de carbono de la industria marítima, promoviendo así la sostenibilidad y la protección del ecosistema marino.

## **9. Referencias Bibliográficas**

- Bobkov, V., Morozov, M. A., Kudryashov, A., & Inzartsev, A. (2023). Ship Hull Inspection Using Autonomous an Underwater Vehicle with a Stereo Camera. \*2023 International Conference on Robotics and Automation in Industry (RAI)\*, 1–5.

- Chaarani, A., Cieślak, P., Esteba, J., Eichhardt, I., & Ridao, P. (2025). Three-Dimensional Binary Marker: A Novel Underwater Marker Applicable for Long-Term Deployment Scenarios. \*IEEE Robotics and Automation Letters\*, \*10\*(1), 169–176.
- Dadson, N. K. N., & Barbalata, C. (2025). Marine Event Vision: Harnessing Event Cameras for Robust Object Detection in Marine Scenarios. \*Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)\*, 6301–6310.
- Imran, M. M. H., Jamaludin, S., Ayob, A. F. M., Ali, A., Syed Ahmad, S. Z. A., Akhbar, M., Suhrab, M. I. R., Zainal, N., Norzeli, S. M., & Mohamed, S. B. H. B. (2023). Application of Artificial Intelligence in Marine Corrosion Prediction and Detection. \*Sensors\*, \*23\*(17), 7480.
- Imran, M. M. H., Jamaludin, S., Mohamad Ayob, A. F., Ali, A. I. M., Suhrab, M. I. R., Norzeli, S. M., & Hasan Basri, S. B. (2024). A REVIEW OF PREDICTIVE MAINTENANCE APPROACHES FOR CORROSION DETECTION AND MAINTENANCE OF MARINE STRUCTURES. \*Journal of Mechanical Engineering\*, \*11\*(1), 116–130.
- O'Byrne, M., Ghosh, B., Schoefs, F., & Pakrashi, V. (2020). Applications of Virtual Data in Subsea Inspections. \*Proceedings of the ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering\*, V006T06A020.
- Ozog, P., Carlevaris-Bianco, N., Kim, A., & Eustice, R. (2016). Long-term mapping techniques for ship hull inspection and surveillance using an autonomous underwater vehicle. \*Journal of Field Robotics\*, \*33\*(7), 960–980.
- Sathisha KG, Kumar, V. V., Prakash R, S., Bopanna H R, & Ashik V. (2024). Detection of Flaws in Ship Hull Using Underwater Remotely Operated Vehicle. \*International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)\*, \*13\*(01), 316-321.
- Upasane, S. J., Hagras, H., Anisi, M., Savill, S., Taylor, I., & Manousakis, K. (2024). A Type-2 Fuzzy-Based Explainable AI System for Predictive Maintenance Within the Water Pumping Industry. \*IEEE Transactions on Industrial Informatics\*, \*20\*(2), 1530–1540.