Propuesta de Implementación del gemelo digital en las construcciones navales de los Servicios Industriales de la Marina de Guerra del Perú

Proposal for the implementation of the digital twin in the shipbuilding of the Industrial Services of the Navy of Peru

Capitán de Corbeta Azul Castillo Figueroa. Licenciado en Ciencias Marítimo Navales por la Escuela Naval del Perú. Maestro en Gerencia del Mantenimiento Naval y Maestro en Administración Estratégica de Empresas, ambas maestrías graduado y titulado en la Universidad Nacional del Callao. Calificado en Ingeniería Naval, ingresó a la Escuela Naval del Perú en el año 2008. En el ámbito académico, es docente de post grado en la Dirección de programas de segunda especialidad profesional y se ha desempeñado laboralmente en unidades navales, en los servicios industriales de la Marina en el Callao y Chimbote, así como en la Jefatura de Ingeniería de la Dirección de Alistamiento Naval. Actualmente es oficial alumno del programa Comando y Estado Mayor de la Escuela Superior de Guerra Naval.

Resumen: El presente artículo académico aborda, desde un enfoque estratégico y técnico, la implementación del gemelo digital en el contexto de la construcción naval en el Perú, específicamente en los proyectos desarrollados por el Servicio Industrial de la Marina del Perú. A partir de la reciente alianza con la empresa surcoreana Hyundai Heavy Industries, se identifica una oportunidad clave para introducir esta tecnología innovadora que permite representar digitalmente sistemas físicos mediante modelos virtuales conectados en tiempo real a través de sensores inteligentes, procesamiento de datos y plataformas interoperables. La investigación evidencia que, aunque esta tecnología ha sido aplicada con éxito en astilleros de países como España, Corea del Sur, Alemania, Noruega y el Reino Unido, su incorporación en el ámbito peruano enfrenta desafíos estructurales como la ausencia de normativas institucionales y brechas tecnológicas. Para enfrentar estas limitaciones, se plantea una metodología en cinco fases: diagnóstico de capacidades actuales, diseño del gemelo digital, implementación de un piloto en las nuevas construcciones navales que se ejecutan en el astillero nacional, formación especializada del personal técnico y evaluación institucional de resultados. Asimismo, se recomienda integrar esta capacidad digital dentro de

los procesos logísticos y de sostenimiento de la Marina de Guerra del Perú, con el objetivo de consolidar un modelo de mantenimiento predictivo en la construcción naval, reducir costos operacionales, aumentar la eficiencia energética y fortalecer la soberanía tecnológica. La creación de un centro nacional de simulación, la cooperación con instituciones extranjeras y la emisión de directivas formales son acciones fundamentales para garantizar su implementación. En conclusión, el gemelo digital constituye una herramienta estratégica imprescindible para modernizar la construcción naval en el Perú y proyectar un poder marítimo eficiente, resiliente y autónomo en la industria naval.

Palabras clave: Gemelo digital, construcción naval en el Perú, Servicio Industrial de la Marina del Perú, transformación digital, mantenimiento predictivo, sostenimiento naval, Marina de Guerra del Perú, innovación tecnológica.

Abstract: *This academic article addresses, from a strategic and technical perspective, the implementation of the digital twin in the context of shipbuilding in Peru, specifically in projects developed by the Industrial Service of the Peruvian Navy. Based on the recent alliance with the South Korean company Hyundai Heavy Industries, a key opportunity has been identified to introduce this innovative technology, which allows the digital representation of physical systems through virtual models connected in real time via smart sensors, data processing, and interoperable platforms. The research shows that, although this technology has been successfully applied in shipyards in countries such as Spain, South Korea, Germany, Norway, and the United Kingdom, its incorporation in Peru faces structural challenges such as the absence of institutional regulations and technological gaps. To address these limitations, a five-phase methodology is proposed: diagnosis of current capabilities, design of the digital twin, implementation of a pilot project in new shipbuilding projects carried out at the national shipyard, specialized training of technical personnel, and institutional evaluation of results. Likewise, it is recommended to integrate this digital capability into the Peruvian Navy's logistics and maintenance processes, with the goal of consolidating a predictive maintenance model in shipbuilding, reducing operational costs, increasing energy efficiency, and strengthening technological sovereignty. The creation of a national simulation center, cooperation with foreign institutions, and the issuance of formal directives are fundamental actions to ensure its implementation. In conclusion, the digital twin constitutes an essential strategic tool for modernizing shipbuilding in Peru and projecting efficient, resilient, and autonomous maritime power in the naval industry.*

Keywords: *Digital twin, shipbuilding in Peru, Industrial Service of the Peruvian Navy, digital transformation, predictive maintenance, naval sustainment, Peruvian Navy, technological innovation.*

Introducción

La evolución tecnológica de las últimas décadas ha transformado radicalmente los procesos productivos y logísticos en múltiples sectores industriales. Esta transformación, reconocida como la Cuarta Revolución Industrial, se caracteriza por la convergencia de tecnologías digitales, físicas y biológicas que están reformulando los modelos tradicionales de gestión, producción y operación. En este contexto, el sector naval se presenta como uno de los campos estratégicos que puede beneficiarse ampliamente de dichas innovaciones. En particular, la implementación de soluciones como el "gemelo digital" ofrece un potencial significativo para optimizar las etapas de diseño, construcción, operación y mantenimiento de las unidades navales (Marr 2020).

El gemelo digital, conceptualizado originalmente por la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) en 2012, consiste en una representación virtual de un sistema físico, alimentada continuamente por datos reales captados a través de sensores, algoritmos y dispositivos interconectados (Glaessgen & Stargel 2012). Su integración en sistemas navales permite simular el comportamiento de los buques en diversas condiciones operativas, anticipar fallas, reducir costos de mantenimiento y mejorar el desempeño global del activo. Asimismo, esta herramienta facilita el monitoreo remoto en tiempo real y permite la toma de decisiones estratégicas basadas en datos predictivos y no en criterios reactivos (Pun Lay, et. al.,2024).

En el caso del Perú, el Servicio Industrial de la Marina (SIMA Perú), empresa estatal de derecho privado adscrita al Ministerio de Defensa, ha venido consolidando su rol como astillero estratégico en el ámbito de la defensa y desarrollo tecnológico nacional (SIMA 2023). Recientemente, la firma de un acuerdo de cooperación con HD Hyundai Heavy Industries (HHI), uno de los principales astilleros del mundo, para la construcción de cuatro unidades navales marca un hito fundamental en la modernización de la flota de la Marina de Guerra del Perú (MGP) (La Lupa 2024). Esta coyuntura abre una ventana de oportunidad sin precedentes para incorporar tecnologías emergentes como el gemelo digital desde la fase de diseño de los buques, alineando el desarrollo tecnológico nacional con estándares internacionales.

El presente artículo tiene como objetivo proponer una metodología estructurada para la implementación del gemelo digital en el proceso de construcción y mantenimiento de unidades navales en el SIMA, considerando las particularidades operativas, tecnológicas y organizativas del entorno

peruano. Para ello, se analizarán los fundamentos teóricos del gemelo digital, las experiencias internacionales más relevantes, y se formulará una hoja de ruta específica que permita su adopción progresiva.

Esta investigación busca posicionar al SIMA como un referente regional en innovación naval, al integrar de forma estratégica las tecnologías de la Industria 4.0 en su modelo operativo. La propuesta se sustenta en la necesidad de fortalecer la autonomía tecnológica del país, mejorar la disponibilidad operativa de las unidades navales, y asegurar la sostenibilidad logística en el mediano y largo plazo. En suma, se trata de una apuesta por la eficiencia, la resiliencia institucional y la soberanía nacional desde una perspectiva marítima y tecnológica integrada.

1. Planteamiento del Problema

En las últimas décadas, el sector naval global ha adoptado herramientas tecnológicas avanzadas con el objetivo de optimizar los procesos de diseño, construcción y sostenimiento de unidades marítimas. Sin embargo, en el contexto peruano, persisten importantes desafíos estructurales y operativos que limitan la adopción de estas tecnologías, en particular del gemelo digital. A pesar de que el SIMA Perú ha consolidado capacidades técnico-industriales en la región, se observa una brecha tecnológica significativa en cuanto a la integración de modelos digitales en sus ciclos de vida productivos. Esta situación se traduce en limitaciones tangibles para alcanzar niveles de eficiencia, trazabilidad y disponibilidad operativa comparables a los estándares internacionales (Ferreño González 2022).

Uno de los principales problemas identificados es la ausencia de un sistema integral de recopilación y análisis de datos que permita alimentar un modelo digital dinámico. La carencia de sensores inteligentes instalados en componentes críticos de los buques, así como la falta de plataformas interoperables de gestión de mantenimiento y operación, imposibilita el desarrollo de simulaciones y predicciones en tiempo real. Esta limitación se agrava cuando se considera que los sistemas actuales funcionan de manera aislada, sin una infraestructura digital integrada que facilite la visualización del ciclo de vida completo del buque (Rolls-Royce 2021).

A nivel doctrinario, la Marina de Guerra del Perú no cuenta aún con lineamientos específicos que impulsen la implementación progresiva de gemelos digitales en su estrategia de sostenimiento logístico o en sus programas de adquisición tecnológica. Esta ausencia de doctrina técnica y normativa se convierte en un obstáculo adicional para su adopción institucional.

Adicionalmente, la falta de incentivos presupuestales sostenidos para la innovación tecnológica dentro de los organismos castrenses limita el desarrollo de prototipos, fases piloto o validaciones de concepto que podrían facilitar la adopción de estas herramientas digitales (Oudot de Dainville 2023).

Asimismo, se evidencia una limitada formación especializada en tecnologías de simulación avanzada, inteligencia artificial aplicada a mantenimiento predictivo, y gestión de datos masivos (Big Data) en el personal técnico-operativo del SIMA y de la Dirección General de Material de la Marina. Esto dificulta la consolidación de un ecosistema institucional favorable para el desarrollo de capacidades digitales robustas, sostenibles y aplicables al contexto operativo peruano (Pun Lay, et al 2024).

En síntesis, el problema central no radica únicamente en la ausencia de tecnología, sino en la falta de un enfoque sistémico que articule capacidades técnicas, organizativas y doctrinarias con una visión de transformación digital. Si bien la cooperación con HHI abre un escenario prometedor, es imperativo estructurar un marco estratégico y metodológico que permita superar las brechas existentes, y garantizar que la adopción del gemelo digital se traduzca en una mejora real en la eficiencia, autonomía tecnológica y disponibilidad operacional de las unidades navales del Perú (Hyundai Heavy Industries 2023).

2. Objetivos

El desarrollo e implementación del gemelo digital (GD) en los procesos de construcción y sostenimiento de unidades navales en el Perú constituye un objetivo estratégico que debe abordarse de manera estructurada. Esta sección tiene como finalidad definir con claridad los propósitos generales y específicos del presente estudio, a fin de orientar tanto el marco teórico como el enfoque metodológico que fundamentará la propuesta.

En primer lugar, el objetivo general responde a la necesidad institucional de integrar herramientas de la Cuarta Revolución Industrial en el ámbito naval peruano. Esta integración debe contemplar no solo la transferencia de tecnología desde los países aliados, sino también su internalización y adaptación a las condiciones operativas locales. La experiencia internacional indica que los proyectos de GD exitosos combinan capacidades de modelado, sensores IoT, infraestructura de almacenamiento y procesamiento de datos, junto con capacidades organizativas para el análisis y la toma de decisiones basadas en simulaciones virtuales (AVEVA 2023c).

Por lo tanto, el objetivo general del presente artículo es:

Diseñar una propuesta metodológica para la implementación del gemelo digital en los procesos de construcción y mantenimiento de buques en el Servicio Industrial de la Marina (SIMA Perú), con el propósito de fortalecer la eficiencia operativa, la sostenibilidad logística y la autonomía tecnológica de la Marina de Guerra del Perú (MGP).

A partir de este objetivo principal, se plantean los siguientes objetivos específicos:

Efectuar una aproximación al marco conceptual, doctrinario y tecnológico del gemelo digital aplicado al ámbito naval, incluyendo su evolución, componentes, tecnologías habilitadoras y beneficios demostrados en experiencias internacionales.

Examinar los casos de implementación de GD en astilleros y fuerzas navales de referencia, como Navantia (España), Hyundai Heavy Industries (Corea del Sur), Meyer Werft (Alemania) y Rolls-Royce (Reino Unido), para identificar buenas prácticas replicables en el contexto peruano (Kongsberg Maritime 2021).

Diagnosticar las capacidades actuales del SIMA Perú y la MGP para la adopción de tecnologías asociadas al GD, incluyendo infraestructura, procesos, recursos humanos, sistemas de información y marco normativo vigente.

Formular una hoja de ruta metodológica para la implementación progresiva del GD en el SIMA, basada en etapas sucesivas, que incluya mecanismos de validación, formación de personal, integración operativa y retroalimentación técnica.

Estos objetivos permitirán desarrollar una propuesta sólida, viable y alineada con los intereses estratégicos del Estado peruano en materia de defensa, innovación tecnológica y soberanía industrial. Asimismo, servirán como base para el desarrollo de políticas públicas orientadas a fortalecer la base tecnológica nacional, generar sinergias interinstitucionales y promover una cultura organizacional orientada a la transformación digital.

3. Marco Teórico

El marco teórico de este artículo tiene como finalidad sustentar conceptualmente el fenómeno del gemelo digital (GD) en el ámbito naval, así como identificar las principales tecnologías habilitadoras, doctrinas operativas asociadas, y tendencias internacionales que respaldan su adopción progresiva. Este enfoque permite comprender no solo la dimensión técnica del GD, sino

también su rol estratégico en el fortalecimiento de la soberanía tecnológica y la eficiencia operacional de las instituciones navales.

El gemelo digital ha sido definido por Glaessgen y Stargel (2012) como una réplica virtual dinámica de un sistema físico, actualizada en tiempo real mediante el flujo continuo de datos provenientes de sensores instalados en el activo real (Glaessgen & Stargel). Esta herramienta se ha consolidado como un habilitador central de la Industria 4.0, al permitir monitorear, simular y optimizar procesos en entornos complejos, como los sistemas navales de combate, plataformas logísticas y buques de guerra.

La arquitectura del GD típicamente se compone de tres niveles: sistema físico con sensores embebidos; infraestructura de conectividad y almacenamiento de datos (*edge computing*, *cloud computing*); y plataforma digital de simulación y análisis predictivo. Su valor reside en la capacidad para identificar fallos incipientes, predecir comportamientos, evaluar escenarios tácticos, y mejorar la toma de decisiones operativas (Tao, F., et al 2019).

Entre las tecnologías habilitadoras más relevantes se encuentran: el Internet de las Cosas (IoT), los sistemas ciberfísicos, la inteligencia artificial (IA), el big data, y la visualización 3D. En el sector naval, estas herramientas se integran en los sistemas de gestión de mantenimiento (CMMS), control de daños, navegación, propulsión y logística. Estudios realizados por Rolls-Royce (2021) y AVEVA (2023b) han demostrado que los GD en motores marinos o diseños estructurales permiten extender la vida útil de los activos, reducir costos de mantenimiento, y mejorar la eficiencia energética de los buques (Rolls-Royce 2021).

A nivel doctrinario, fuerzas navales como la Armada Española, la Marina de Corea del Sur y la Marina de los Estados Unidos han incorporado el concepto del GD dentro de sus estrategias de sostenimiento inteligente. Estas doctrinas reconocen al GD como una herramienta de "supervisión cognitiva del ciclo de vida", es decir, como un componente fundamental en la gestión integrada de capacidades desde su diseño hasta su desmantelamiento (García González 2023).

En suma, el GD no solo representa una innovación tecnológica, sino también una transformación estructural en la forma en que las fuerzas navales conciben, opera y mantienen sus medios. Su adopción en el Perú, a través de un enfoque adaptativo y progresivo, permitiría alinear las capacidades nacionales con las mejores prácticas internacionales, incrementando la eficiencia, autonomía y proyección estratégica de la Marina de Guerra del Perú.

4. Metodología

La presente investigación adopta un enfoque cualitativo, de carácter aplicado y con orientación propositiva. La metodología se sustenta en el análisis documental, el estudio de casos internacionales, y el diseño de una hoja de ruta metodológica para la implementación progresiva del gemelo digital (GD) en el Servicio Industrial de la Marina (SIMA Perú). Este enfoque permite integrar variables técnicas, doctrinarias y organizacionales propias del contexto naval peruano, dentro de un marco de transformación digital adaptativa.

El análisis documental ha comprendido la revisión exhaustiva de literatura científica y técnica sobre el GD, tanto en bases de datos académicas como en informes de empresas líderes en ingeniería naval, entre ellas AVEVA, Rolls-Royce, Kongsberg y Hyundai Heavy Industries. Asimismo, se han considerado doctrinas institucionales de fuerzas armadas extranjeras, particularmente la Armada Española, cuyos lineamientos operacionales han sido adaptados para el contexto de la Marina de Guerra del Perú (MGP) (Armada Española 2022).

Paralelamente, se han identificado cuatro casos de estudio representativos: Navantia y las fragatas F-110 en España, el buque autónomo *Yara Birkeland* en Noruega, los cruceros de Meyer Werft en Alemania; y los portaviones digitales del astillero DSME en Corea del Sur. Estas experiencias han sido seleccionadas por su valor demostrativo en la aplicación real del GD y por la diversidad de soluciones tecnológicas empleadas, que permiten establecer puntos de comparación y extrapolación con el modelo propuesto para SIMA Perú (DSME 2022).

A partir de esta base, se ha formulado una propuesta metodológica compuesta por cinco fases secuenciales:

Diagnóstico de capacidades tecnológicas existentes: identificación de plataformas digitales, sensores, sistemas CMMS y recursos humanos especializados en el entorno del SIMA.

Diseño conceptual del gemelo digital: definición del alcance funcional, arquitectura técnica, requerimientos de interoperabilidad y niveles de simulación requeridos.

Implementación de un proyecto piloto: selección de un sistema crítico (propulsión, navegación o control de daños) para validar el modelo GD.

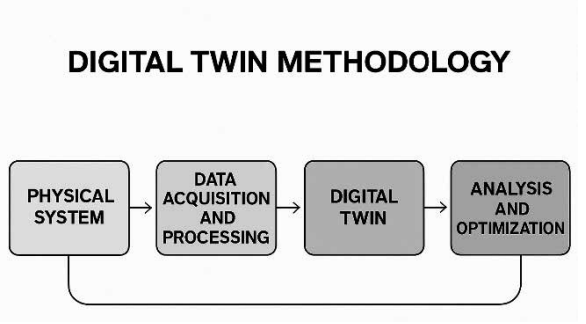
Capacitación técnica y doctrinaria: desarrollo de programas formativos

para oficiales y técnicos en gemelos digitales, mantenimiento predictivo, y análisis de datos.

Evaluación de resultados e integración institucional: medición de impactos en disponibilidad, tiempos de respuesta, y sostenibilidad; alineamiento con la estrategia logística-operacional de la MGP.

Este proceso está representado gráficamente a través del siguiente mapa de procesos:

Figura 1
Metodología General del Gemelo Diaital en Construcción Naval



Fuente. Elaboración propia en base a AVEVA (2023), Rolls Royce (2021) y García González (2023).

5. Propuesta de Implementación

La presente sección detalla una propuesta técnica y estratégica para la implementación progresiva del gemelo digital (GD) en los procesos de construcción, sostenimiento y operación de unidades navales en el Servicio Industrial de la Marina (SIMA Perú), alineada con las prioridades institucionales de la Marina de Guerra del Perú (MGP). Esta propuesta parte del entendimiento de que la adopción tecnológica requiere de un enfoque sistémico, gradual y respaldado por capacidades humanas, normativas y técnicas preexistentes.

La propuesta considera como eje central la implementación del GD en un entorno piloto controlado que permita validar la arquitectura funcional, el flujo de datos, la interoperabilidad con los sistemas existentes (como el CMMS y el SIGEMA) y su utilidad en la toma de decisiones de mantenimiento. La implementación se desarrolla en tres niveles: estratégico, operativo y táctico, abordando tanto la infraestructura física como los procesos de gestión del conocimiento.

En el nivel estratégico, se plantea la inclusión del GD dentro del Plan Nacional de Transformación Digital de la Defensa, proponiendo su incorporación como componente obligatorio en los nuevos proyectos de construcción naval. Este nivel contempla además la creación de una oficina técnica permanente para la innovación digital naval, con participación conjunta del SIMA, el Ministerio de Defensa y la Dirección General de Material (DIGEMAR) (Ministerio de Defensa del Perú 2022).

En el nivel operativo, se propone la ejecución de un plan piloto en una de las nuevas unidades multipropósito en construcción en alianza con Hyundai Heavy Industries (HHI). Este plan incluirá la integración de sensores inteligentes, plataformas de modelado tridimensional y sistemas de análisis predictivo. La interoperabilidad con el sistema logístico institucional (SIGEMA) y el sistema de gestión de mantenimiento CMMS permitirá verificar los beneficios del GD en términos de disponibilidad, reducción de fallas y eficiencia operativa (García González 2023).

En el nivel táctico, se sugiere el diseño de un programa de formación continua en GD dirigido a los oficiales de ingeniería naval y al personal técnico del SIMA. Esta formación debe incluir: fundamentos de modelado digital, inteligencia artificial, mantenimiento predictivo, y análisis de datos aplicados. Además, se plantea la creación de un laboratorio de simulación con equipos de visualización 3D, estaciones de control digital y servidores para el procesamiento de big data, que funcionaría como centro de excelencia en innovación naval (AVEVA 2023a).

El proceso de implementación se desarrollaría en tres fases:

Fase inicial (año 1): Desarrollo conceptual, selección del sistema crítico, adquisición de sensores e infraestructura básica.

Fase intermedia (año 2): Ejecución de pruebas piloto, capacitación operativa, y primer diagnóstico de impacto.

Fase final (año 3): Escalamiento institucional, integración con doctrina logística, y diseño de indicadores permanentes de evaluación.

Este enfoque estructurado permitirá garantizar no solo la viabilidad técnica del GD, sino, también, su sostenibilidad organizacional. Asimismo, generará capacidades nacionales en ingeniería naval digital, alineadas con los objetivos de autosuficiencia y disuasión estratégica de la Marina de Guerra del Perú.

6. Beneficios Esperados

La implementación del gemelo digital (GD) en los procesos de construcción y sostenimiento de unidades navales peruanas conlleva una serie de beneficios tangibles y estratégicos, tanto a nivel operativo como institucional. Estos beneficios no solo se traducen en mejoras de desempeño técnico, sino, también, en el fortalecimiento de la soberanía tecnológica, la eficiencia presupuestaria y la capacidad de respuesta ante escenarios complejos.

Uno de los principales beneficios esperados es la optimización del ciclo de vida operativo de los buques, a través de la posibilidad de monitorear, simular y anticipar el comportamiento de sistemas críticos en tiempo real. Esto permitirá a la Marina de Guerra del Perú (MGP) pasar de un modelo de mantenimiento correctivo o programado a uno predictivo basado en condición (CBM), reduciendo tiempos de inactividad no planificada y maximizando la disponibilidad de las unidades navales (Tao, et al 2022, pp. 728-742).

En términos económicos, se proyecta una reducción de hasta un 30% en los costos de mantenimiento gracias a la identificación temprana de fallas, la mejora de los procesos logísticos y la estandarización del diagnóstico técnico. Experiencias como la de Rolls-Royce en sus motores marinos han demostrado que el uso de GD permite prolongar la vida útil de los equipos, reduciendo el número de reemplazos prematuros y optimizando los tiempos de parada técnica (Rolls-Royce 2021).

Otro beneficio clave es el incremento de la eficiencia energética. Mediante la simulación continua de perfiles operativos y condiciones ambientales, el GD puede recomendar ajustes en los parámetros de operación, lo que se traduce en un consumo de combustible más racional y una menor huella de carbono. Este beneficio es particularmente relevante para unidades logísticas y multipropósito que operan en condiciones diversas y prolongadas (AVEVA 2023).

Desde la perspectiva organizacional, la incorporación del GD fortalecerá la toma de decisiones basada en datos (*data-driven decision-making*). El acceso en tiempo real a métricas operacionales permitirá a los comandantes, planificadores logísticos y autoridades técnicas evaluar escenarios, asignar recursos de manera eficiente y anticipar contingencias operativas. Esto se alinea con las mejores prácticas internacionales de sostenimiento integrado y planeamiento logístico militar (U.S. Department of Defense).

Finalmente, la adopción del GD contribuirá al fortalecimiento del capital

humano técnico. La necesidad de operar, interpretar y gestionar entornos digitales complejos impulsará la profesionalización del personal del SIMA y de la MGP en disciplinas como modelado 3D, inteligencia artificial aplicada, ingeniería de sistemas y ciberseguridad naval. Esto no solo ampliará la base tecnológica del país, sino que consolidará una cultura de innovación y transformación digital en el ámbito de la defensa marítima.

En conjunto, estos beneficios configuran un nuevo paradigma operativo para la Marina de Guerra del Perú, donde la eficiencia, la resiliencia y la adaptabilidad se convierten en pilares de la disuasión estratégica y la sostenibilidad logística en el siglo XXI.

7. Casos Internacionales

La experiencia comparada en materia de implementación de gemelos digitales (GD) en la industria naval ofrece valiosas lecciones para el contexto peruano. Astilleros de países como España, Corea del Sur, Noruega, Alemania y Reino Unido han desarrollado programas pioneros de integración del GD que no solo han mejorado el rendimiento técnico de sus plataformas navales, sino que también han transformado sus procesos logísticos, doctrinarios y de mantenimiento. Estos casos sirven como referencia para diseñar una estrategia nacional alineada a estándares internacionales.

7.1 Navantia (España)

Navantia ha incorporado el GD en el diseño y gestión de las fragatas F-110, convirtiéndose en uno de los primeros programas europeos en aplicar esta tecnología desde la etapa conceptual. A través de su iniciativa "Astillero 4.0", se integran sensores, modelado 3D, simulación y plataformas digitales para monitorizar el comportamiento de los buques en tiempo real. La Armada Española ha incorporado estos desarrollos en su doctrina logística, considerando el GD como un activo de sostenimiento integrado (Armada Española 2022).

7.2 Kongsberg Maritime (Noruega)

La empresa noruega Kongsberg ha liderado el desarrollo del primer buque portacontenedores completamente autónomo y eléctrico del mundo: el *Yara Birkeland*. En este caso, el GD permitió simular todos los procesos operativos antes del lanzamiento, garantizando seguridad y eficiencia. El sistema continúa operando con retroalimentación en tiempo real, lo que ha optimizado la navegación, el consumo energético y la previsión de fallas (Kongsberg Maritime 2021).

7.3 Meyer Werft (Alemania)

El astillero alemán Meyer Werft ha implementado GD en la construcción de cruceros de gran escala. A través del uso de la plataforma AVEVA Marine, se optimiza el diseño, se detectan errores antes de la producción física, y se mejora la eficiencia energética de los sistemas integrados. Este enfoque ha reducido significativamente los tiempos de construcción y ha mejorado la integración de sistemas complejos (AVEVA 2023c).

7.4 DSME (Corea del Sur)

Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering (DSME) ha desarrollado un ecosistema digital naval con GD aplicados a la gestión de grandes buques militares, incluidos portaviones. La plataforma emplea simulación avanzada, análisis de datos operacionales y mantenimiento predictivo, logrando reducir fallos críticos y aumentando la operatividad de sus sistemas navales (DSME 2022).

7.5 Rolls-Royce (Reino Unido)

Rolls-Royce ha implementado GD en motores marinos y plataformas offshore, desarrollando sistemas que permiten la predicción de fallas y la mejora del rendimiento a través de datos históricos y en tiempo real. Este enfoque ha demostrado eficacia en flotas comerciales y buques logísticos del Reino Unido, con reducción significativa de costos operacionales (Rolls-Royce 2021).

Estos casos confirman que la implementación del GD no solo es viable, sino altamente recomendable en el ámbito naval. Su adopción fortalece la autonomía tecnológica, incrementa la seguridad operativa y reduce los costos de sostenimiento, configurándose como un elemento clave para la transformación digital de las fuerzas armadas en el siglo XXI.

8. Desafíos del contexto peruano

Si bien la implementación del gemelo digital (GD) en la industria naval representa una oportunidad tecnológica sin precedentes, su adopción en el contexto peruano presenta una serie de desafíos estructurales, técnicos, doctrinarios y culturales que deben ser cuidadosamente identificados y gestionados. El análisis de estos factores es clave para diseñar una hoja de ruta realista, adaptable y sostenible que permita al SIMA Perú y a la Marina de Guerra del Perú (MGP) asimilar progresivamente esta innovación dentro de sus capacidades institucionales.

8.1 Brechas tecnológicas e infraestructura digital limitada

A pesar del avance en capacidades constructivas, el SIMA no cuenta aún con un entorno de fabricación y sostenimiento plenamente digitalizado. La escasa interoperabilidad entre plataformas de diseño asistido (CAD), sistemas de planificación de recursos (ERP), gestión del mantenimiento (CMMS), y la ausencia de una arquitectura de datos integrada, limitan el desarrollo de un ecosistema funcional de GD (Ministerio de Defensa del Perú 2023). Esta carencia impide la captura, análisis y explotación de datos en tiempo real, que son la base operativa del gemelo digital.

8.2 Ausencia de normativa doctrinaria para transformación digital naval

A nivel institucional, la MGP aún no ha emitido directivas específicas que regulen el uso de tecnologías emergentes como el GD. La doctrina logística actual sigue centrada en modelos tradicionales de mantenimiento programado y correctivo. Esta situación genera un vacío normativo que limita la toma de decisiones y la priorización de inversiones en digitalización naval. La falta de un marco normativo impide además incorporar el GD en los procesos de planeamiento estratégico y sostenimiento operacional (Escuela Superior de Guerra Naval 2022).

8.3 Débil articulación entre instituciones tecnológicas y defensa

Existe escasa vinculación entre los centros de innovación tecnológica del país, las universidades técnicas, y los institutos de defensa. Esta fragmentación institucional limita el desarrollo de soluciones conjuntas, la formación de competencias digitales y la validación de tecnologías en entornos operativos reales. En comparación, países como España, Corea del Sur o Alemania han desarrollado ecosistemas colaborativos entre armada, industria y academia que potencian la madurez tecnológica y la implementación efectiva del GD (Ferreño González 2022).

8.4 Limitaciones en la formación y profesionalización del capital humano

El personal técnico-operativo del SIMA y de la MGP carece aún de formación especializada en áreas como ciencia de datos, inteligencia artificial, mantenimiento predictivo o visualización avanzada. Esto restringe la capacidad de absorción tecnológica institucional y la sostenibilidad de proyectos innovadores. La profesionalización del capital

humano debe ser priorizada para asegurar la adopción efectiva del GD (García González 2023).

8.5 Restricciones presupuestales y falta de continuidad financiera

La innovación tecnológica en defensa requiere inversiones sostenidas a mediano y largo plazo. Sin embargo, los presupuestos anuales, altamente dependientes de asignaciones coyunturales, dificultan la planificación multianual y la adquisición progresiva de componentes tecnológicos. Esta situación puede poner en riesgo la continuidad de proyectos piloto o la ampliación del GD a otras unidades navales (Oudot de Dainville 2023, pp. 84–89).

Frente a estos desafíos, resulta fundamental diseñar una estrategia de implementación del GD que contemple un enfoque de madurez tecnológica progresiva, institucionalización normativa, articulación intersectorial, y fortalecimiento sostenido del capital humano técnico.

9. Conclusiones

El presente trabajo ha demostrado que la implementación del gemelo digital (GD) representa una oportunidad estratégica para transformar la construcción, operación y sostenimiento de unidades navales en el Perú. A partir de un análisis doctrinario, técnico y comparado, se ha evidenciado que el gemelo digital permite optimizar el ciclo de vida de los buques, reducir costos operacionales, incrementar la disponibilidad de plataformas, y fortalecer la soberanía tecnológica del país.

Se ha identificado que el gemelo digital no es solo una herramienta técnica, sino una capacidad sistémica que debe articularse con doctrina logística, infraestructura digital, capital humano calificado y planeamiento multianual. La experiencia internacional, analizada a través de casos como Navantia, Kongsberg, Meyer Werft, DSME y Rolls-Royce, ha mostrado que su implementación exitosa requiere de una estrategia institucional clara, apoyo político, financiamiento sostenible y cooperación tecnológica.

Asimismo, el estudio ha diagnosticado una serie de desafíos estructurales en el entorno nacional, entre los cuales destacan la ausencia de normativa especializada, limitaciones en conectividad e interoperabilidad de sistemas, escasa articulación interinstitucional y una brecha de formación técnica en tecnologías de la Industria 4.0. Sin embargo, estos obstáculos no son insalvables y pueden ser abordados mediante una planificación progresiva y alineada a las capacidades del SIMA Perú y la Marina de Guerra del Perú (MGP).

En conclusión, el gemelo digital puede y debe convertirse en un componente clave de la transformación digital naval peruana, consolidando un modelo de sostenimiento inteligente, proactivo y autónomo. Esta tecnología, implementada adecuadamente, contribuirá a proyectar un poder naval más eficiente, resiliente y disuasivo, alineado con los intereses estratégicos del Estado peruano en el dominio marítimo.

10. Recomendaciones para Cumplir la Propuesta

Ejecutar un proyecto piloto con las construcciones navales que se realizarán en el astillero SIMA, lo que permitirá validar la metodología y generar resultados medibles.

Establecer un centro de simulación naval que funcione como nodo técnico para el desarrollo de gemelos digitales.

Priorizar la formación técnica continua del personal del SIMA y de la MGP en áreas relacionadas al gemelo digital.

Promover alianzas internacionales con centros tecnológicos y astilleros de referencia que permitan la transferencia y adaptación de modelos exitosos de Gemelo Digital al contexto peruano.

Aprovechar la alianza estratégica con Hyundai Heavy Industries (HHI) como plataforma inicial para la migración hacia el modelo de gemelo digital, integrando esta capacidad desde la fase de diseño de las nuevas unidades navales y fomentando la transferencia de conocimiento asociado.

Referencias

1. Armada Española. (2022). *Programa F110: Gemelo digital y sostenimiento integrado*. Ministerio de Defensa de España.
2. AVEVA. (2023a). *Digital energy optimization in naval platforms*. AVEVA Innovation Report.
3. AVEVA. (2023b). *Digital transformation in naval engineering*. AVEVA Knowledge Base.
4. AVEVA. (2023c). *How Meyer Werft uses AVEVA Marine for shipbuilding*. https://www.aveva.com/en/success-stories/meyer-werft/
5. Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering. (2022). *Digital transformation in shipbuilding* [Whitepaper]. DSME.
6. Escuela Superior de Guerra Naval. (2022). *Doctrina logística naval y gestión del ciclo de vida* [Documento institucional].
7. Ferreño González, S. (2022). *Aproximación metodológica a la implantación del gemelo digital en buques* [Tesis doctoral, Universidade da Coruña]. Repositorio UDC.
8. García González, P. (2023). *Gemelo digital: Concepto y aplicación en la Armada Española* [Trabajo de fin de máster, Universidad de Cádiz]. Armada Española.
9. Glaessgen, E., & Stargel, D. (2012). The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air Force vehicles. *51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*.
10. HD Hyundai Heavy Industries. (2023). *Advanced digital twin integration in Korean shipyards*. HHI Press Room.
11. Kongsberg Maritime. (2021). *The Yara Birkeland: World's first autonomous and electric container ship*. https://www.kongsberg.com/maritime/
12. La Lupa. (2024). HD Hyundai Heavy y SIMA inician construcción de buques de guerra en el Perú. https://lalupa.pe/peru/hd-hyundai-heavy-y-sima-inician-construccion-de-buques-de-guerra-en-el-peru-93784
13. Marr, B. (2020, 6 de marzo). What is digital twin technology and why is it so important? *Forbes*. https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2020/03/06/what-is-digital-twin-technology/
14. Ministerio de Defensa del Perú. (2022). *Lineamientos de transformación digital del sector defensa* (Resolución Ministerial N.º 1243-2022-DE).
15. Ministerio de Defensa del Perú. (2023). *Informe sobre capacidades digitales en la industria naval*. Dirección General de Políticas para la Defensa.
16. Oudot de Dainville, A. (2023). Stratégie navale russe et conséquences maritimes de la guerre en Ukraine. *Revue Défense Nationale*, 857, 84–89.
17. Pun Lay, S. D. C., Del Alamo, H. J., Gamarra, R. A. H., & Muñoz, L. S. (2024). *Gemelo digital en el área de mantenimiento del SIMA PERÚ* [Tesis de maestría, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. http://hdl.handle.net/10757/676197
18. Rolls-Royce. (2021). *Digital twin for marine engines: Enabling predictive maintenance*. Rolls-Royce Marine Division.
19. Tao, F., Sui, F., Liu, A., Qi, Q., & Zhang, M. (2022). Digital twin-driven smart maintenance: State-of-the-art review. *Journal of Manufacturing Systems*, 62, 728–742. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.01.005
20. Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions*

on Industrial Informatics, *15*(4), 2405–2415. https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186
21. U.S. Department of Defense. (2020). *Condition-Based Maintenance Plus (CBM+): Guidebook*. Office of the Deputy Assistant Secretary of Defense for Materiel Readiness.