



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Simulador virtual de navegación para lanchas de
instrucción de la Armada*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Adrián Pérez de la Peña

DIRECTORES: Francisco Troncoso Pastoriza
Xavier Núñez Nieto

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Simulador virtual de navegación para lanchas de
instrucción de la Armada*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

En estos tiempos los simuladores aportan a las Fuerzas Armadas de cualquier nación un complemento tremendamente valioso a la formación de sus militares. Las ventajas de los simuladores con respecto a la formación en un entorno real son el bajo coste, inmediatez y facilidad de uso, independencia de factores externos o climáticos y la práctica en entornos seguros de situaciones límite que en la vida real sería irrealizables por su excesivo riesgo para el personal o el material.

Este Trabajo Fin de Grado busca aportar una herramienta más, no sustitutiva de la formación real recibida por los alumnos en la mar, pero sí complementaria. El objetivo es aportar facilidades para que puedan practicar por cuenta propia aquellos ejercicios que deban reforzar o realizar protocolos y procedimientos que mediante la repetición les sirva para después tener una base aún más sólida durante los ejercicios reales.

El escenario base de este simulador será la Ría de Pontevedra y el modelo de vehículo será la lancha de instrucción modelo Rodman 66 de la Armada Española. Los ejercicios simulados serán aquellos más característicos, así como un modo de libre navegación donde los alumnos podrán moverse libremente por el escenario.

PALABRAS CLAVE

Simulación virtual, Lanchas de instrucción, Visualización realista, Informática gráfica.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a mis familiares, amigos y compañeros, así como a mis mandos y profesores, tanto civiles como militares, quienes han estado siempre presentes a lo largo de este camino y han contribuido de manera significativa a mi desarrollo personal, ya sea a través de su apoyo, su ejemplo o sus enseñanzas.

En primer lugar, me gustaría agradecer especialmente a mis tutores, Francisco Troncoso Pastoriza y Xavier Núñez Nieto, por su constante asesoramiento, disponibilidad y orientación durante todas las fases del desarrollo de este proyecto.

Asimismo, deseo agradecer al teniente de navío Gonzalo María Delgado Franco por las facilidades brindadas para la realización de pruebas a bordo de la lancha real, así como por su acompañamiento y apoyo durante las mismas. Del mismo modo, quiero reconocer la colaboración del alférez de fragata José Manuel Ros Rial, por su asistencia durante estos ejercicios, y de los guardiamarinas Teresa Pampín Hernández, Lucía Robledo González y Gonzalo Liaño Ruiz, por su participación en pruebas adicionales realizadas en días posteriores a bordo de otras embarcaciones de la misma clase.

Por último, quiero hacer extensivo mi agradecimiento a todas aquellas personas que han contribuido durante la fase de pruebas del proyecto, ayudando a detectar errores y aportando críticas constructivas y valiosas opiniones que han permitido mejorar el resultado final.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	5
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Introducción	7
1.2 Objetivos	8
1.3 Estructura del documento	8
2 Estado del arte	11
2.1 Descripción de simulador	11
2.1.1 Orígenes de los simuladores	12
2.1.2 Simulación en el ámbito virtual	13
2.1.3 Principales Motores Gráficos	14
2.2 Programas de entrenamiento en centros militares	16
2.2.1 Estilo de entrenamiento y formación militar a lo largo del siglo XX-XXI	17
2.3 Futuro y expectativas de la simulación militar	18
2.3.1 Realidad virtual, beneficios y defectos actuales	19
2.3.2 Capacidades y limitaciones de los ordenadores de gama media para la simulación	20
2.3.3 Simuladores. Peligro del entrenamiento negativo	21
2.4 Principales programas empleados	21
2.4.1 Unreal Engine	22
2.4.1.1 Historia de Unreal Engine	22
2.4.1.2 Unreal Engine 5	23
2.4.1.3 Ventajas y limitaciones de Unreal Engine 5. Aspectos que vigilar	23
2.4.2 Blender	23
2.4.2.1 Historia de Blender	24
2.4.2.2 Ventajas y limitaciones de Blender	24
2.4.3 Otros programas	25
2.4.3.1 Paint.NET	25
2.4.3.2 Audacity	25
3 Desarrollo del TFG	27
3.1 Fase de modelado	27
3.1.1 Introducción y herramientas principales	27
3.1.2 Casco	28
3.1.3 Superestructura	30
3.1.4 Objetos secundarios, etapa de detalle	32

3.1.4.1 Elementos exteriores de detalle	32
3.1.4.2 Interiores del puente de gobierno	34
3.1.5 Conclusión de la fase de modelado	35
3.2 Fase de exportación e importación.....	37
3.2.1 Introducción a la exportación	37
3.2.2 Exportación desde Blender e importación en Unreal	37
3.3 Fase de programación	39
3.3.1 Introducción a la programación por Blueprints en Unreal	39
3.3.2 Principales nodos empleados	39
3.3.3 Programación de las físicas iniciales	42
3.3.3.1 Programación de las físicas coherentes a la lancha real	42
3.3.3.2 Maniobras avanzadas de gobierno de la embarcación	44
3.3.3.3 Comportamiento dinámico: balanceo en función de la velocidad	45
3.3.3.4 Uso de delta seconds en la simulación	45
3.4 Fase de creación de entorno	46
3.4.1 Introducción a la creación de entornos	46
3.4.2 Mapa de la costa, Cesium	46
3.4.3 Introducción a la implementación de colisiones.....	47
3.4.4 Sistema de coordenadas locales a GPS.....	48
3.4.5 Conclusiones sobre la creación de entorno.....	49
3.5 Fase de ejercicios	49
3.5.1 Introducción a la fase de ejercicios.....	49
3.5.2 Ejercicio de “hombre al agua”	49
3.5.3 Ejercicio de fondeo de precisión.....	53
3.5.4 Ejercicio de remolque	54
3.5.5 Ejercicio de aprovisionamiento en la mar	56
3.5.6 Ejercicio de canal dragada	58
3.5.7 Ejercicio de formaciones	59
3.6 Sistemas adicionales del simulador.....	61
3.6.1 Sistema de ayudas visuales y análisis de maniobras	61
3.6.2 Implementación de fallos instrumentales: error de giroscópica	63
3.6.3 Sistema de tráfico civil	64
3.6.4 Sistema de iluminación dinámica y ciclo día/noche.....	66
3.6.5 Recreación de la ría de Pontevedra y ayudas a la navegación reales	68
3.6.6 Sistema de luces, marcas y banderas conforme al RIPAM	69
3.6.7 Interfaz de usuario: menú principal interactivo	70

3.6.8 Sistema de widgets e interfaz durante la simulación	72
3.6.9 Sistema de sonido y retroalimentación auditiva	73
3.6.10 Técnicas de optimización del rendimiento (LODs y Nanite)	74
3.6.11 Sistema de control del usuario y movimiento libre	74
3.6.11.1 Concepto de movimiento libre sobre la embarcación	74
3.6.11.2 Control de usuario y gobierno de la embarcación	76
3.6.12 Sistemas de colisiones	77
3.6.12.1 Colisiones entre embarcaciones	77
3.6.12.2 Colisiones con costa y bajos	78
4 Resultados	81
4.1 Introducción general a los resultados	81
4.2 Resultados de modelado	81
4.2.1 Resultado final del modelo tridimensional de la embarcación	81
4.2.2 Resultado del modelado interior y elementos funcionales	83
4.2.3 Resultado del entorno de simulación	84
4.3 Resultados de programación	85
4.3.1 Implementación funcional de los ejercicios	85
4.3.2 Resultados visuales de los ejercicios implementados	85
4.3.3 Secuencias de ejecución de maniobras	87
4.4 Resultados de simulación e interacción con el sistema	88
4.4.1 Interfaz general del simulador	88
4.4.2 Interacción del usuario con el simulador	88
4.4.3 Repercusión de la configuración en la simulación	89
4.5 Validación del sistema y valoración global	89
4.6 Video demostrativo del simulador	89
5 Conclusiones y líneas futuras	91
5.1 Conclusiones	91
5.2 Líneas futuras de desarrollo	91
6 Bibliografía	93
Anexo I: Implicaciones Sociales, Económicas, y Ambientales	97
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Simulador de submarinos de la Armada [28]	11
Figura 2-2 Link Trainer. National Museum of the United States Air Force [29]	12
Figura 2-3 C-101 Aviojet de Digital Combat Simulator [30]	15
Figura 2-4 Simulador de torre de carro de combate Leopard. Ejército de Tierra [31]	18
Figura 2-5 Meta Quest 3 [32]	19
Figura 2-6 Epic Games. Logo de Unreal Engine [33]	22
Figura 2-7 Blender Foundation. Logo de Blender [34]	24
Figura 2-8 dotPDN LLC. Logo de Paint.NET [35]	25
Figura 2-9 Audacity Team. Logo de audacity [36]	25
Figura 3-1: Modelado con imágenes de referencia en Blender (Elaboración propia)	28
Figura 3-2 Pulido de la malla del casco hasta la v.0.4 (Elaboración propia)	29
Figura 3-3 Superestructura (Elaboración propia)	31
Figura 3-4 Detalles de la lancha (Elaboración propia)	33
Figura 3-5 Modelo interior del puente de mando (Elaboración propia)	34
Figura 3-6 Versión 1.0 y 0.4 (Elaboración propia)	36
Figura 3-7 Versión 1.0.1 en Unreal (Elaboración propia)	39
Figura 3-8 Blueprint Add Force (Elaboración propia)	40
Figura 3-9 Blueprint Add Torque (Elaboración propia)	40
Figura 3-10 Blueprint Add Impulse (Elaboración propia)	41
Figura 3-11 Blueprint Add Angular Impulse (Elaboración propia)	41
Figura 3-12 Colisiones de la lancha (Elaboración propia)	48
Figura 3-13 Efecto del viento sobre el pabellón nacional (Elaboración propia)	52
Figura 3-14 Ejercicio de fondeo (Elaboración propia)	54
Figura 3-15 Ejercicio de remolque diurno (Elaboración propia)	56
Figura 3-16 Fase de aproximación al buque proveedor (Elaboración propia)	57
Figura 3-17 Buque receptor manteniendo posición a babor del proveedor (Elaboración propia) ...	58
Figura 3-18 Vista aérea de canal dragada. "Soluciones" activas (Elaboración propia)	59
Figura 3-19 Formación en línea de demora (Elaboración propia)	60
Figura 3-20 Canal dragada. "Soluciones" activas en primera persona (Elaboración propia)	62
Figura 3-21 Error de giroscópica (Elaboración propia)	63
Figura 3-22 Tres tipos de embarcaciones civiles (Elaboración propia)	65
Figura 3-23 Mercante, velero y pesquero en navegación nocturna (Elaboración propia)	65
Figura 3-24 Pesquero no de arrastre y mercante en navegación nocturna (Elaboración propia)	66
Figura 3-25 Simulación al atardecer. Ciclo día/noche (Elaboración propia)	67

Figura 3-26 Puerto de Portonovo al anochecer (Elaboración propia)	69
Figura 3-27 Aproximación para aprovisionamiento. Bandera "Romeo" (Elaboración propia)	70
Figura 3-28 Menú principal del simulador (Elaboración propia).....	71
Figura 3-29 Imagen en primera persona con interfaz en la parte superior (Elaboración propia).....	72
Figura 3-30 Caminando en primera persona. Exterior de la embarcación (Elaboración propia).....	75
Figura 3-31 Controles del programa (Elaboración propia)	76
Figura 3-32 Imagen en primera persona de una colisión con un pesquero (Elaboración propia)	78
Figura 3-33 Colisiones de la costa sobre una carta de entrenamiento (Elaboración propia)	79
Figura 4-1 Detalles de castillo en Blender (Elaboración propia)	82
Figura 4-2 Detalles de toldilla en Blender (Elaboración propia)	82
Figura 4-3 Rodman 66 de la Armada en Blender (Elaboración propia).....	83
Figura 4-4 Interior de la Rodman 66 en Blender (Elaboración propia)	83
Figura 4-5 Ría de Pontevedra vista desde cubierta (Elaboración propia)	84
Figura 4-6 Imagen nocturna de un pesquero y una lancha (Elaboración propia).....	84
Figura 4-7 Ejercicio de hombre al agua. Abatiendo hacia el naufrago (Elaboración propia).....	85
Figura 4-8 Ejercicio de fondeo. Fase final de aproximación (Elaboración propia)	86
Figura 4-9 Ejercicio de remolque nocturno (Elaboración propia).....	86
Figura 4-10 (Ejercicio de formaciones durante el ocaso (Elaboración propia).....	86
Figura 4-11 Ejercicio de canal dragada en condiciones nocturnas (Elaboración propia)	87
Figura 4-12 Ejercicio de aprovisionamiento. Distintas fases del ejercicio (Elaboración propia)	87
Figura 4-13 Vista en 1ª persona con interfaz en pantalla (Elaboración propia).....	88
Figura 4-14 Código QR de galería de videos del simulador (Elaboración propia).....	90

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

La formación en el ámbito de la navegación marítima requiere no solo la adquisición de conocimientos teóricos, sino también el desarrollo de habilidades prácticas relacionadas con el gobierno de embarcaciones, la interpretación del entorno y la toma de decisiones en tiempo real. Sin embargo, el acceso a este tipo de formación práctica presenta limitaciones evidentes, tanto por la disponibilidad de medios como por los riesgos y costes asociados a la navegación en condiciones reales. En este contexto, los simuladores se han consolidado como una herramienta de gran valor, permitiendo reproducir escenarios de navegación en entornos controlados, seguros y repetibles.

El presente Trabajo de Fin de Grado se centra en el desarrollo de un simulador de maniobras navales basado en una embarcación tipo lancha, concretamente una Rodman 66 empleada en la Escuela Naval Militar de Marín. El objetivo principal del proyecto ha sido diseñar e implementar una herramienta interactiva capaz de reproducir, con un nivel adecuado de realismo, distintas maniobras y ejercicios habituales en la formación de oficiales, integrando tanto aspectos físicos como operativos de la navegación.

Para ello, se ha utilizado el motor gráfico Unreal Engine 5, que permite la creación de entornos tridimensionales en tiempo real, junto con el software de modelado Blender para la construcción de la geometría de la embarcación. A lo largo del desarrollo, se han abordado distintas fases, incluyendo el modelado del buque, la implementación de un sistema de físicas coherente, la creación de un entorno geográfico basado en datos reales y el diseño de múltiples ejercicios orientados al entrenamiento.

Más allá del objetivo técnico, este proyecto busca aportar una herramienta con valor formativo real, capaz de complementar la enseñanza tradicional mediante la práctica en un entorno virtual. Para ello, se han incorporado elementos que refuerzan la fidelidad de la simulación, como la aplicación de normativa marítima, la interacción con el entorno, la representación de condiciones variables o la inclusión de tráfico civil, entre otros.

Cabe destacar que el desarrollo de este simulador se ha llevado a cabo en un periodo aproximado de dos meses y medio, lo que ha condicionado ciertas decisiones de diseño, especialmente en lo relativo al nivel de detalle del modelado frente a la implementación de funcionalidades. En este sentido, se ha priorizado la creación de un sistema funcional y ampliable, orientado a la simulación de maniobras y al comportamiento dinámico de la embarcación, por encima de la reproducción exacta de todos los elementos visuales.

En definitiva, este trabajo presenta el desarrollo de una primera versión de un simulador naval con un alto potencial de evolución, que combina herramientas actuales de desarrollo en tiempo real con

conocimientos de navegación, dando lugar a una solución que puede resultar de utilidad en el ámbito de la formación marítima.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es el desarrollo de un simulador de maniobras navales basado en una embarcación tipo lancha, que permita reproducir de forma interactiva y con un nivel adecuado de realismo distintas situaciones de navegación, con especial enfoque en su aplicación como herramienta de apoyo a la formación.

Para alcanzar este objetivo general, se han definido los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar y modelar una embarcación representativa, basada en una lancha tipo Rodman 66, incluyendo tanto su estructura exterior como los elementos principales del puente de mando necesarios para la simulación.
- Implementar un sistema de físicas que permita reproducir de forma coherente el comportamiento dinámico de la embarcación, incluyendo aspectos como la propulsión, el giro, el efecto del viento y la interacción con el entorno.
- Desarrollar un entorno de navegación basado en un escenario geográfico real, integrando elementos como la costa, ayudas a la navegación y zonas navegables, con el objetivo de aportar realismo y contexto a las maniobras.
- Diseñar e implementar distintos ejercicios de navegación, tales como hombre al agua, fondeo de precisión, remolque, aprovisionamiento o navegación en canal, orientados a reproducir situaciones reales de formación.
- Incorporar sistemas adicionales que enriquezcan la experiencia del usuario, como tráfico civil, señalización conforme al RIPAM, sistema de ayudas visuales, interfaz de usuario, sonido y condiciones de iluminación variables.
- Garantizar la estabilidad y el rendimiento del simulador mediante la aplicación de técnicas de optimización, asegurando su correcto funcionamiento en distintos equipos.
- Validar el simulador mediante pruebas prácticas y revisiones por parte de usuarios con experiencia en navegación, con el fin de evaluar su utilidad como herramienta formativa.
- Desarrollar una solución flexible y ampliable, que permita la incorporación futura de nuevas embarcaciones, escenarios o funcionalidades sin necesidad de rediseñar el sistema desde cero.

En conjunto, estos objetivos persiguen no solo la creación de un simulador funcional, sino también el establecimiento de una base sólida para el desarrollo de herramientas más avanzadas dentro del ámbito de la simulación naval.

1.3 Estructura del documento

La memoria se organiza en varios capítulos que recogen de forma progresiva el planteamiento, desarrollo y evaluación del simulador naval realizado. Su estructura sigue un orden que permite comprender tanto la motivación del proyecto como las decisiones técnicas adoptadas durante su desarrollo, así como los resultados obtenidos y las posibles líneas de evolución futura.

- En el Capítulo 1: “Introducción y objetivos” se introduce el contexto general del trabajo, justificando la utilidad de la simulación como herramienta complementaria en el ámbito de la formación naval. Además, se exponen los objetivos del proyecto.
- El Capítulo 2 “Estado del arte”, recoge el marco teórico y tecnológico en el que se sitúa el proyecto. En él se abordan los orígenes y la evolución de los simuladores, su aplicación en entornos virtuales, su papel dentro de la formación militar y las tendencias actuales de la simulación. También se

describen las principales herramientas empleadas en el desarrollo, como Unreal Engine 5 y Blender, junto con otros programas auxiliares utilizados.

- El Capítulo 3 "Desarrollo", constituye el núcleo de la memoria y describe de forma detallada el desarrollo del TFG. En este apartado se presentan las distintas fases del proyecto y cómo ha ido evolucionando, desde el modelado de la embarcación hasta su integración en el motor gráfico, la programación de sus físicas, la creación del entorno, la implementación de ejercicios de navegación y el desarrollo de sistemas complementarios como la interfaz, el tráfico civil, la iluminación, el sonido o las optimizaciones de rendimiento, entre otros.
- En el Capítulo 4 "Resultados" se expone todo lo obtenido a partir del trabajo realizado. Para ello, se organiza la información en distintos bloques centrados en el resultado del modelado, la programación y la simulación final, mostrando tanto el acabado visual del sistema como su funcionamiento práctico. Además, se incluye una valoración global del simulador, su validación por parte de usuarios con experiencia y finalmente un acceso a material audiovisual demostrativo del proyecto.
- El Capítulo 5 "Conclusiones y líneas futuras", recoge las conclusiones principales derivadas del desarrollo del simulador, valorando el grado de cumplimiento de los objetivos inicialmente planteados. Del mismo modo, se presentan distintas líneas futuras de desarrollo, orientadas a ampliar las capacidades del sistema, mejorar su realismo y extender su aplicación a nuevos escenarios o embarcaciones.
- El Capítulo 6 "Bibliografía" reúne la bibliografía empleada como base teórica y técnica para la elaboración del trabajo. Tras ella, se incluyen dos anexos complementarios dedicados, respectivamente, a las implicaciones sociales, económicas y ambientales del proyecto, y a las reflexiones éticas y sociales derivadas de su desarrollo y posible aplicación.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Descripción de simulador

Desde hace mucho tiempo el ser humano ha estado siempre intentando reproducir la realidad para aprender o practicar sin asumir riesgos reales. En el ámbito militar esto es todavía más importante aún ya que muchas de las actividades que se realizan son peligrosas y caras. Por eso, la simulación aparece como una solución lógica para entrenar en entornos controlados, reduciendo así los riesgos pero manteniendo un aprendizaje útil o al menos suficientemente real.

Un simulador podría explicarse como un sistema que imita el comportamiento de algo real y permite interactuar con ello. Pero esta definición se queda algo corta. En el contexto militar no basta con que algo “se vea real”, sino que debe comportarse de forma coherente respetando procedimientos, límites físicos y consecuencias. Si esto no se cumple el simulador no sirve, o incluso puede enseñar de una forma incorrecta [11] como explicaremos más adelante, lo cual es un problema serio.

Desde el punto de vista formativo el simulador no sustituye al entrenamiento real, sino que lo complementa [3]. Permite repetir situaciones muchas veces, introducir fallos o condiciones adversas sin peligro real, y entrenar errores que en la realidad no se pueden permitir. Esto es especialmente útil en la formación naval y en el manejo de vehículos, donde un fallo puede tener consecuencias graves. Siendo así los simuladores especialmente necesarios sobretudo en vehículos y entornos especialmente hostiles o con curvas de aprendizaje largas y complejas, como es por ejemplo el caso de los submarinos: Figura 2-1, donde un solo error podría acarrear consecuencias importantes.



Figura 2-1 Simulador de submarinos de la Armada [28]

El realismo es un aspecto clave. No solo importa el realismo visual o sonoro, sino sobre todo el funcional. Es decir, que el sistema responda como lo haría en la realidad. Si un vehículo no acelera, gira o frena como debería, el alumno puede adquirir hábitos incorrectos. Este llamado entrenamiento negativo es algo que se debe evitar, ya que luego es difícil de corregir.

Los simuladores pueden ser físicos, virtuales o híbridos. Los físicos usan cabinas reales y sistemas mecánicos, pero son caros y poco accesibles. Los virtuales se basan en entornos digitales y se ejecutan en ordenadores normales, lo que los hace más flexibles y baratos. Los híbridos mezclan ambos enfoques, aunque siguen siendo complejos. El simulador de este trabajo es virtual, ya que está pensado para ser usado en ordenadores personales como apoyo ala formación, no como sustituto del entrenamiento real. Su objetivo principal es que el alumno se familiarice con el manejo básico, repita procedimientos y llegue mejor preparado a la práctica real, lo cual en el fondo es lo que se busca con la simulación [23].

2.1.1 Orígenes de los simuladores

Los simuladores, tal y como se conocen hoy, están muy ligados al desarrollo tecnológico y, sobre todo, al ámbito militar.

Desde hace siglos se han usado formas de “simulación” como maquetas o ejercicios teóricos, pero no fue hasta el siglo XX cuando aparecieron sistemas creados específicamente para imitar el funcionamiento de vehículos reales, con fines de entrenamiento.

La aviación fue el primer campo donde la simulación tuvo un papel importante. Volar era algo nuevo, peligroso y con muchos riesgos, y los pilotos aprendían casi solo volando de verdad. Esto provocaba muchos accidentes, incluso durante la formación. Por eso, pronto surgió la necesidad de entrenar sin tener que despegar, especialmente para aprender ciertas habilidades básicas.

Uno de los primeros grandes hitos fue el Link Trainer, a finales de los años veinte (véase la Figura 2-2). Esta era una cabina cerrada que se movía con un sistema neumático y simulaba de forma muy básica el vuelo. No servía para aprender a volar en general, sino para entrenar el vuelo instrumental. Aun siendo muy simple comparado con los sistemas actuales, demostró algo clave: Que no hacía falta copiar toda la realidad, solo lo importante para el aprendizaje. Este principio se repetiría muchas veces después. Simular lo necesario, no todo.



Figura 2-2 Link Trainer. National Museum of the United States Air Force [29]

Con la Segunda Guerra Mundial, la simulación dio un salto enorme. La necesidad de formar rápidamente a muchos militares hizo que los simuladores pasaran de ser algo experimental a una

herramienta esencial. Se desarrollaron sistemas para pilotos, artilleros y otros operadores, casi todos mecánicos o analógicos, pero eficaces para repetir procedimientos y aprender a usar instrumentos. No eran muy avanzados, pero cumplían su función.

En el ámbito naval, el desarrollo fue más despacio. La formación seguía basándose mucho en el buque real y en la experiencia directa. Aun así, empezaron a usarse maquetas y entrenamientos en tierra, que pueden considerarse formas tempranas de simulación, aunque bastante limitadas y poco dinámicas.

El verdadero cambio llegó con los primeros ordenadores electrónicos. Gracias a la computación, fue posible simular sistemas más complejos y modificar escenarios con mayor flexibilidad. Ya no se trataba solo de imitar movimientos, sino de crear modelos que representaran el comportamiento real de un sistema, teniendo en cuenta muchas variables al mismo tiempo.

Durante la Guerra Fría, la simulación militar se desarrolló mucho más. Los sistemas eran cada vez más complejos y requerían personal muy especializado. En el ámbito naval aparecieron simuladores de puente, de combate y de control de averías, capaces de recrear situaciones completas. En algunos casos, incluso se instalaron en los propios buques.

Además, los simuladores dejaron de usarse solo para principiantes. Empezaron a emplearse también para entrenar a personal con experiencia, sobre todo en situaciones raras o muy peligrosas que no se podían practicar fácilmente en la realidad.

A finales del siglo XX la simulación estaba ya muy asentada, aunque seguía siendo cara y muy especializada. Con la llegada de los ordenadores personales y el desarrollo de los videojuegos, todo empezó a cambiar. Los sistemas gráficos mejoraron mucho y se abrieron nuevas posibilidades para la simulación, también fuera del ámbito militar.

En resumen, la simulación no es algo reciente. Ha evolucionado durante décadas junto con la tecnología y las necesidades formativas, especialmente en el ámbito militar. El simulador que se plantea en este trabajo forma parte de esa evolución, adaptado a los medios actuales y a las necesidades de la formación naval moderna, siguiendo ideas que ya estaban presentes desde los primeros simuladores [27].

2.1.2 Simulación en el ámbito virtual

La simulación en el ámbito virtual ha sido un cambio importante en el entrenamiento militar. No ha sido solo una mejora técnica frente a los simuladores antiguos, sino una nueva forma de entender cómo se enseña y se aprende. Al pasar a entornos digitales el entrenamiento dejó de depender tanto de soportes físicos concretos lo que abrió muchas más posibilidades [13].

Uno de los puntos fuertes de la simulación virtual es que nos permite crear escenarios completos donde el usuario puede interactuar de forma parecida a la realidad. No se entrena solo una acción concreta sino varias cosas a la vez. Esto es especialmente importante en el ámbito militar donde casi nunca se decide en función de un solo factor, sino del conjunto de la situación.

Además, la simulación virtual permite repetir situaciones que en la realidad serían difíciles o peligrosas. Como mal tiempo, averías, emergencias o condiciones poco habituales pueden reproducirse sin riesgo. Esto ayuda a que el alumno se acostumbre a reaccionar mejor y gane confianza. Esta repetición controlada es una de las claves del aprendizaje.

Otro aspecto importante es la inmersión. Ya que no se trata solo de que el entorno se vea bien sino de que el usuario sienta que forma parte de él, que sus decisiones tengan consecuencias y que el sistema responda de forma lógica. Si esto no ocurre el aprendizaje pierde eficacia aunque el simulador sea visualmente atractivo [25].

En este sentido no basta con que el simulador parezca real, tiene que comportarse de forma realista. Un sistema que responda de manera poco coherente puede generar errores en el alumno. Esto es algo que se repite mucho en la simulación virtual y que debe cuidarse desde el diseño del sistema.

La simulación virtual también destaca por la cantidad de variables que puede manejar a la vez: Meteorología, visibilidad, tráfico, estado del vehículo o aparición de incidencias pueden combinarse de muchas formas. Gracias a esto, se pueden crear ejercicios adaptados al nivel del alumno, desde los más básicos hasta otros más complejos, algo que resulta muy útil.

En el ámbito naval, esta capacidad es especialmente relevante. La navegación depende de muchos factores externos que cambian constantemente.

Por ejemplo el estado del mar, el viento o la presencia de otras embarcaciones influyen de manera directa en la toma de decisiones. La simulación virtual permite juntar todos estos elementos en un mismo entorno, facilitando una visión global de la situación.

Otra ventaja es la adaptabilidad del sistema. Un mismo simulador puede servir para alumnos sin experiencia y para personal más avanzado, basta con cambiar las condiciones o los objetivos del ejercicio. Esto facilita mucho el proceso formativo ya que no todos los alumnos aprenden al mismo ritmo.

También hay que destacar la posibilidad de evaluar de forma automática. El entorno digital permite registrar las acciones del usuario y analizarlas después. No solo importa el resultado final sino cómo se ha llegado a él. Esto ayuda a detectar errores y a mejorar la formación sobre todo en el ámbito militar.

Desde el punto de vista logístico, la simulación virtual reduce costes y facilita el acceso al entrenamiento. No se necesitan grandes infraestructuras ni medios reales y puede utilizarse en equipos personales. Esto es especialmente útil en este trabajo ya que el simulador está pensado para que los alumnos lo usen en sus propios dispositivos. Sin embargo, la simulación virtual también tiene limitaciones. No se pueden reproducir sensaciones físicas como el balanceo o las aceleraciones, que afectan enormemente a la experiencia real final. Además, el rendimiento del hardware y del software es clave, si el sistema falla, se pierde la inmersión y el aprendizaje se resiente.

Por último, el comportamiento del alumno puede cambiar al saber que está en un entorno virtual, esto hace necesario que el simulador se use como complemento y no como sustituto del entrenamiento real.

En conjunto, la simulación virtual es una herramienta muy útil, pero su eficacia depende de un buen diseño y de una correcta integración en el proceso formativo [3].

2.1.3 Principales Motores Gráficos

La evolución de los simuladores virtuales está muy alineada con el desarrollo de los motores gráficos que los hacen posibles.

Estos motores a los que nos referimos son la base técnica de cualquier simulador, ya que controlan el cómo se ve el entorno, cómo se mueven los objetos y cómo interactúa el usuario con el sistema, etc. Por esto, entender su evolución ayuda a explicar por qué los simuladores actuales son como son, y también a justificar las decisiones técnicas de este trabajo [10].

En los primeros simuladores digitales cada sistema utilizaba su propio motor, creado casi exclusivamente para ese simulador concreto. Eran motores muy específicos pensados para un número reducido de escenarios y funciones. Su desarrollo era caro, lento y requería personal muy especializado, pero a cambio ofrecían un control muy preciso sobre los aspectos importantes para la formación.

Durante gran parte del siglo XX, sobre todo en el ámbito militar, los motores gráficos estaban muy limitados por el hardware disponible en la época. Las limitaciones técnicas obligaban a usar gráficos muy simples. Aun así, estos simuladores eran útiles porque lo importante no era tanto el aspecto visual como la correcta reproducción de procedimientos y comportamientos, una forma de pensar que sigue siendo válido hoy en día.

Con la mejora de los ordenadores, especialmente a partir de los años ochenta y noventa, los motores comenzaron a incorporar sistemas más avanzados. Esto permitió simuladores más complejos, tanto civiles como militares.

No obstante, el gran cambio llegó con el crecimiento de la industria del videojuego. La necesidad de entornos cada vez más realistas impulsó la aparición de motores gráficos de propósito general, capaces de manejar escenas complejas, físicas más realistas y sistemas de iluminación avanzados. Aunque estaban pensados para el ocio, su nivel tecnológico los hizo útiles para otros ámbitos, incluida la simulación. Motores comerciales como Unreal Engine o Unity empezaron a utilizarse fuera del videojuego, también en simuladores civiles y poco a poco en simulación militar [12]. Sin embargo, sus ventajas son claras: menor coste, mejor documentación y actualizaciones constantes. Todo esto reduce mucho los tiempos de desarrollo, lo cual es clave.

En simuladores civiles, su uso se extendió rápidamente, sobre todo en vuelo y conducción. Muchos simuladores pensados como entretenimiento alcanzaron un realismo suficiente para usarse con fines formativos, como podría ser el caso de Flight Simulator de Microsoft o incluso del CASA C-101 en DCS World (véase la Figura 2-3), cuyo módulo ha sido desarrollado por AvioDev, estudio español, en colaboración con Eagle Dynamics, empresa desarrolladora del simulador.

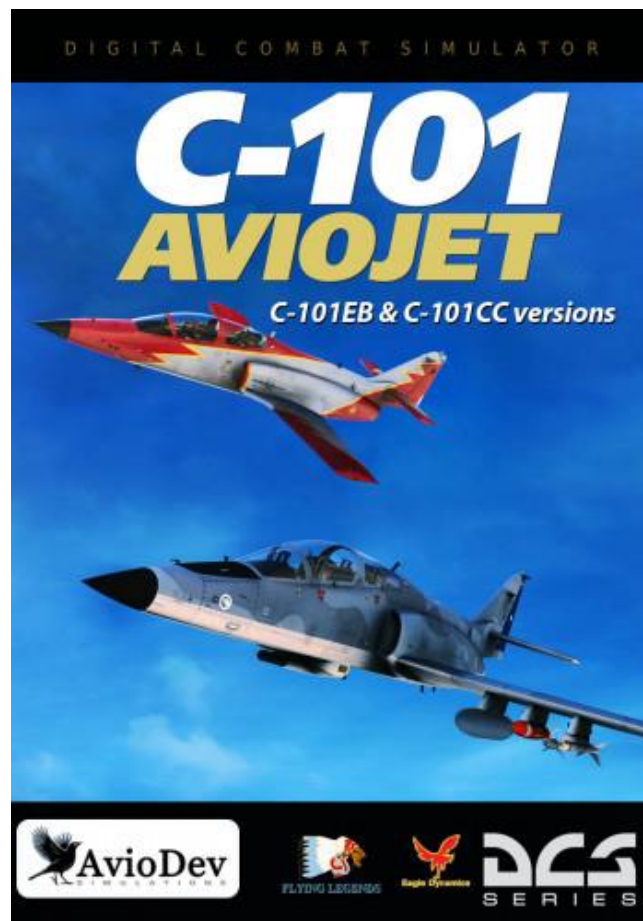


Figura 2-3 C-101 Aviojet de Digital Combat Simulator [30]

Esto hizo que la diferencia entre simulación profesional y lúdica no estuviera tan clara, aunque el objetivo final siguiera siendo distinto.

En el ámbito militar actual, siguen existiendo motores propios, sobre todo en proyectos grandes. Aun así, cada vez se emplean más motores comerciales como base, especialmente en simuladores de menor escala o con fines educativos. Mantener un motor propio es caro, y no siempre compensa el esfuerzo necesario en su desarrollo. Esto vuelve a reforzar la idea de usar motores ya existentes.

En este trabajo, la elección de un motor gráfico comercial tiene sentido. Se busca un simulador accesible, para ordenadores personales, sin instalaciones complejas. Motores como Unreal Engine o Unity ofrecen un equilibrio razonable entre calidad visual, capacidad de simulación y facilidad de desarrollo, algo que ya se ha dicho, pero conviene repetirlo. Además, estos motores permiten que el proyecto crezca con el tiempo. Se puede empezar con algo sencillo y añadir nuevas funciones más adelante. También facilitan la integración con tecnologías como la realidad virtual, aunque no sea un requisito inicial, lo cual alarga la vida útil del simulador

Eso no significa que no tengan limitaciones por supuesto. Al ser motores generales, no siempre están optimizados para simulación militar y en algunos casos el realismo físico puede quedarse corto frente a modelos hechos a medida. Por eso, el motor no es el fin sino una herramienta más. Un motor potente no garantiza un buen simulador si el diseño no es coherente.

En resumen, la evolución de los motores gráficos ha sido clave en el desarrollo de la simulación virtual. Se ha pasado de sistemas muy específicos a motores comerciales versátiles y accesibles. En el contexto de este trabajo y de la formación naval, el uso de un motor moderno y extendido resulta una opción lógica, realista y acorde a las capacidades y medios de los oficiales alumnos de la Escuela Naval Militar [17].

2.2 Programas de entrenamiento en centros militares

En general se suele decir, y se repite bastante, que la superioridad militar no depende solo del material. Depende mucho de las personas, de su preparación, de cómo se entrenan y de si saben adaptarse. Esto los ejércitos lo tienen claro desde hace años y por eso invierten tanto en formación del personal [8].

Tradicionalmente la instrucción militar se basaba en teoría por un lado y práctica real por otro. La teoría sirve para entender normas, procedimientos y sistemas y la práctica sirve para aplicarlos, normalmente con supervisión de algún superior con experiencia. Este modelo funciona pero tiene límites claros cuando los sistemas son caros, complejos o peligrosos.

Por eso aparecen los simuladores. Aquí entra una tercera parte del entrenamiento. La simulación no sustituye a nada, pero complementa. Permite practicar sin riesgos reales, repetir errores y aprender poco a poco. En los centros militares actuales la simulación se usa mucho y en casi todas las fases de la formación, desde lo más básico hasta niveles avanzados. Sirve para estandarizar, reducir riesgos y ahorrar recursos. Esto es clave cuando hay muchos alumnos y se necesita que todos aprendan lo mismo, más o menos.

En el ámbito naval esto se nota bastante. Antes la formación se hacía casi toda a bordo, aprendiendo por experiencia directa. Eso tenía cosas buenas, pero también hacía que el aprendizaje dependiera mucho de la situación concreta. No siempre era igual para todos y podían aparecer carencias.

Con el tiempo se crearon centros de formación más organizados, con manuales y procedimientos comunes, se comenzó a escribir doctrina [14]. Así se podía formar a más personal y de forma más homogénea. La llegada de los simuladores mejoró aún más este sistema.

Por ejemplo, los simuladores de puente permiten entrenar maniobras o situaciones de riesgo sin salir a la mar. Esto ahorra dinero y evita accidentes. Además, una misma situación se puede repetir muchas veces, cosa que en la realidad no siempre es posible.

La formación militar además es continua. No acaba al principio de la carrera. Durante toda la vida profesional se siguen aprendiendo cosas nuevas. Aquí los simuladores vuelven a ser útiles, para actualizar conocimientos y adaptarse a nuevos sistemas.

Desde el punto de vista educativo, ahora se intenta que el alumno tenga más protagonismo. La simulación ayuda a esto porque cada uno puede avanzar a su ritmo. Se pueden repetir ejercicios y corregir fallos antes de pasar a algo más complejo. También permiten evaluar de forma más objetiva ya

que los simuladores registran acciones, errores y tiempos. Esto ayuda tanto al alumno como al instructor. Aunque no sea perfecto, es una ventaja clara.

Eso sí, la simulación no lo es todo. Si se usa demasiado puede dar una falsa sensación de control. La experiencia real sigue siendo necesaria, sobre todo en el ámbito naval. El equilibrio entre simulación y práctica real es fundamental, y no siempre es fácil conseguirlo [23].

El simulador desarrollado en este trabajo se plantea como una ayuda. No sustituye ni a los centros ni a la experiencia a bordo. Sirve para practicar, para reforzar lo aprendido y para llegar mejor preparado a la navegación real. En ese sentido considero que encaja bien con la formación actual.

En resumen, los programas de entrenamiento en centros militares han cambiado mucho y seguirán cambiando. La simulación se ha convertido en algo esencial para la formación militar pero incapaz por el momento de sustituir las maniobras reales.

2.2.1 Estilo de entrenamiento y formación militar a lo largo del siglo XX-XXI

El entrenamiento militar en el manejo de vehículos ha cambiado mucho a lo largo del siglo XX y XXI, sobre todo por el avance tecnológico y por la evolución de la forma de combatir y sus sistemas. Al principio los vehículos eran sencillos y la formación se basaba casi solo en la experiencia directa aprendiendo poco a poco con la ayuda de personal más veterano que hacía de instructor.

En los primeros años del siglo XX, el aprendizaje se hacía principalmente usando el vehículo real. El alumno observaba, repetía maniobras y asumía responsabilidades de forma progresiva. Este sistema permitía conocer bien el vehículo y sus límites pero también tenía muchos problemas y riesgos. El coste era alto hacía falta mucho material y el riesgo de accidentes era elevado, sobre todo al inicio del entrenamiento.

Durante la primera mitad del siglo XX y especialmente en periodos de guerra, estas limitaciones se hicieron más evidentes.

Era necesario formar a muchas personas en poco tiempo, lo que llevó a introducir más formación teórica. Aparecieron manuales, procedimientos escritos y una doctrina más clara, el aprendizaje empezó a organizarse mejor, con fases definidas aunque la práctica real seguía siendo imprescindible.

Después la Segunda Guerra Mundial, los vehículos militares se volvieron cada vez más complejos. Ya no eran solo sistemas mecánicos sino plataformas con comunicaciones, navegación y electrónica. Esto hizo que el modelo basado solo en la práctica directa ya no fuera suficiente.

Ahora antes de operar un vehículo, el personal necesitaba una base teórica más sólida porque los errores podían tener consecuencias muy graves. En este contexto comenzaron a desarrollarse los primeros simuladores [8].

En navegación, por ejemplo, los simuladores permitían entrenar maniobras sin usar un buque real. Esto reducía costes y riesgos y además permitía repetir ejercicios muchas veces, algo difícil de hacer en la realidad.

A lo largo de la segunda mitad del siglo XX, el entrenamiento pasó a combinar teoría, simulación y práctica real. Al principio la simulación era solo un complemento de iniciación, para completos principiantes, pero con el tiempo fue ganando importancia. En el ámbito naval esto fue especialmente relevante, ya que la navegación depende mucho del entorno y de factores externos difíciles de controlar en la mar.

Ya en el siglo XXI la simulación se ha convertido en una parte central del entrenamiento militar de cualquiera de las ramas de las Fuerzas Armadas, ya sean terrestres (véase la Figura 2-4 donde se muestra un simulador de carro de combate Leopardo), navales o aéreas. Los sistemas actuales permiten recrear situaciones muy realistas y evaluar el rendimiento del personal en toda clase de condiciones.



Figura 2-4 Simulador de torre de carro de combate Leopard. Ejército de Tierra [31]

Aun así, la experiencia real sigue siendo necesaria. Ningún simulador puede sustituir completamente la sensación del entorno real ni la responsabilidad que implica operar un vehículo con personas a bordo. Por eso, el modelo más eficaz sigue siendo el que combina simulación y práctica real. El simulador propuesto en este trabajo sigue esta idea. No busca sustituir el entrenamiento tradicional, sino complementarlo directamente. Permite que el personal llegue mejor preparado a la práctica real, reduciendo riesgos y mejorando el aprendizaje. En este sentido, se ajusta al estilo de formación actual de las Fuerzas Armadas [17].

2.3 Futuro y expectativas de la simulación militar

El desarrollo de los ordenadores y del software ha permitido crear simuladores mucho más realistas que antes. Ahora es más fácil integrar gráficos avanzados, física, inteligencia artificial o sonido. Esto ayuda a crear entornos bastante creíbles, algo que hace unos años era difícil de imaginar, y por eso la simulación está cada vez más presente.

Pero este avance también tiene problemas. La tecnología avanza tan rápido que los sistemas se quedan obsoletos en poco tiempo.

Lo que hoy es moderno puede quedar viejo en pocos años, y eso obliga a invertir continuamente en actualizaciones. Esto choca con la idea tradicional de los sistemas militares, que solían durar décadas.

Por eso, los simuladores actuales tienen ciclos de vida más cortos. Esto obliga a diseñarlos de forma modular y flexible, para poder actualizarlos con más facilidad. Usar tecnologías conocidas y extendidas resulta más práctico que crear sistemas muy cerrados o específicos [17].

Sin embargo, hay límites claros. El usuario siempre sabe que está en una simulación, y eso cambia su comportamiento. Se toman más riesgos y no existe el mismo miedo al error. Esto ya se ha mencionado, pero es algo clave, ya que hay factores psicológicos que no se pueden simular del todo.

Por eso la simulación no va a reemplazar completamente al entrenamiento real. Va a ser un complemento muy importante, pero no suficiente por sí sola. Sirve para preparar mejor al personal,

reducir riesgos y ahorrar recursos, pero la experiencia real, y lo que se siente al llevar el vehículo real, sigue siendo algo necesario de experimentar.

En el ámbito naval esto es todavía más evidente. Hay sensaciones como el movimiento del buque o la vida a bordo que no se pueden reproducir en un simulador. Aun así, la simulación es muy útil para entrenar maniobras, procedimientos y toma de decisiones antes de enfrentarse a la realidad.

2.3.1 Realidad virtual, beneficios y defectos actuales

La realidad virtual es hoy en día uno de los avances tecnológicos más importantes dentro de la simulación, especialmente en el ámbito militar a diferencia de otros sistemas tradicionales, no se limita a mostrar la información en una pantalla, sino que introduce al usuario dentro del entorno simulado, ocupando todo su campo de visión y generando una sensación de presencia mucho mayor [18].

Todo esto supone un inmenso cambio claro en la forma de interactuar con los escenarios virtuales.

El objetivo principal de la realidad virtual es representar la realidad de la manera más fiel posible, no solo en lo visual, sino también en cómo se percibe el espacio. Es gracias a la visión estereoscópica, el usuario puede apreciar profundidad y distancias de forma más natural. Esto es especialmente importante en simulación militar, donde interpretar correctamente el entorno es clave para tomar decisiones. En el ámbito naval, por ejemplo, la estimación de distancias o velocidades se ve claramente beneficiada.

Con el paso de los años los visores de realidad virtual han ido mejorando en calidad y ergonomía (véase la Figura 2-5, donde se muestran unas Meta Quest 3, uno de los dispositivos de realidad virtual más empleados en la actualidad). Cada generación aumenta la resolución, el campo de visión y la fluidez de imagen (fotogramas por segundo), lo que reduce problemas como el mareo o la fatiga visual. Aunque estos efectos no han desaparecido del todo, sí se han reducido bastante en comparación con los primeros dispositivos, lo que hace que la experiencia sea más cómoda.

El sonido envolvente también tiene un papel importante. Poder identificar la dirección de un sonido según la posición del usuario mejora mucho la sensación de realismo.

Además, existen dispositivos como mandos, guantes o sistemas hápticos que permiten interactuar de forma más natural con el entorno virtual. Estas tecnologías todavía no están del todo desarrolladas ni estandarizadas, pero apuntan a una evolución clara de la realidad virtual y una apuesta a futuro de los simuladores por esta tecnología que ya estamos comenzando a ver en muchos ejércitos del mundo, incluyendo nuestras propias Fuerzas Armadas. Aun así, no siempre se usan, y en muchos casos se sigue recurriendo a soluciones más simples debido a los problemas que también presentan en su actual y temprano estado de desarrollo.



Figura 2-5 Meta Quest 3 [32]

Muchos sistemas de realidad virtual dependen de condiciones de iluminación concretas y de hardware específico. Los dispositivos autónomos suelen tener menos potencia, mientras que los visores conectados por cable ofrecen mejor calidad pero limitan la movilidad. Las soluciones inalámbricas existen (por wi-fi o bluetooth), pero suelen introducir latencia o pérdida de fluidez, lo que afecta a la experiencia. Otro problema es la autonomía de las baterías que obliga a interrumpir sesiones o a usar cables. Esto no siempre es un inconveniente grave, pero sí una restricción más. Por eso, la realidad virtual funciona mejor en simulaciones con poca movilidad como el manejo de vehículos terrestres o aeronaves.

En cambio, en entrenamientos que requieren movimiento continuo, como operaciones de infantería, la realidad virtual sigue teniendo problemas. El desplazamiento humano es uno de sus mayores retos y las soluciones actuales no terminan de ser muy prácticas ni ergonómicas. Esto limita su aplicación en ciertos escenarios.

En este proyecto no apostaremos de primeras por esta tecnología debido a la dificultad de combinarla con el uso de ordenadores de características más humildes, objetivo principal de este proyecto.

2.3.2 Capacidades y limitaciones de los ordenadores de gama media para la simulación

El uso de simuladores virtuales en ordenadores personales obliga a tener en cuenta las capacidades reales del hardware disponible. En este trabajo esto es importante, ya que el simulador está pensado para funcionar en ordenadores de gama media, sin equipos especiales ni instalaciones complejas. Por eso es necesario que conozcamos qué pueden ofrecer estos equipos y hasta dónde pueden llegar sus limitaciones para que el simulador sea útil y accesible.

Los ordenadores personales han mejorado mucho en los últimos años, tanto en potencia como en gráficos. Hoy en día tareas que antes solo podían hacerse en equipos muy caros pueden ejecutarse en ordenadores domésticos normales. Esto ha permitido que la simulación ya no sea algo exclusivo de centros especializados sino que pueda usarse también a nivel individual.

El concepto de “gama media” no es fijo, cambia con el tiempo. Un ordenador que hoy se considera de gama media puede quedarse anticuado en pocos años. Aun así, suele tratarse de equipos pensados para un uso general, capaces de mover programas exigentes sin llegar al nivel de los ordenadores más potentes. Para simulación, este tipo de equipos suelen ser suficientes si el diseño está bien hecho [1].

En cuanto a capacidades, los ordenadores de gama media permiten ejecutar simuladores con entornos tridimensionales, físicas básicas y sistemas interactivos en tiempo real. No se puede llegar a un realismo extremo, pero sí a uno creíble. Esto es suficiente para reproducir escenarios de navegación y maniobra de forma coherente que es lo que interesa desde el punto de vista formativo. Uno de los puntos más importantes es encontrar el equilibrio entre rendimiento y accesibilidad.

A nivel gráfico, las tarjetas de gama media pueden manejar iluminación, sombras y algunos efectos atmosféricos. No hace falta un nivel de detalle muy alto. De hecho, un exceso de gráficos puede afectar al rendimiento, y en simulación lo importante es que todo funcione de forma fluida. El rendimiento estable es más importante que el aspecto visual, aunque a veces se tienda a pensar lo contrario erróneamente.

Los ordenadores de gama media también destacan por su versatilidad. El simulador puede usarse en distintos lugares y momentos, lo que facilita su integración en la rutina de estudio. El alumno puede practicar cuando lo necesite, sin depender siempre de horarios o recursos externos. Sin embargo, estos equipos también tienen limitaciones claras. La optimización es fundamental. Un simulador mal optimizado puede funcionar mal incluso en un ordenador de buenas prestaciones. Además, la variedad de configuraciones de hardware obliga a diseñar sistemas flexibles, con opciones que se adapten a distintos niveles de rendimiento lo que complica el desarrollo.

En resumen, los ordenadores de gama media ofrecen un equilibrio razonable entre capacidad y accesibilidad para simuladores formativos. Aunque tienen limitaciones, estas pueden gestionarse con un diseño adecuado [10].

2.3.3 Simuladores. Peligro del entrenamiento negativo

Los simuladores se usan mucho para formar tanto en el ámbito civil como militar, y tienen ventajas claras. Aun así, también tienen riesgos, y uno de los más importantes es el llamado entrenamiento negativo. Básicamente ocurre cuando el alumno aprende hábitos o procedimientos incorrectos por culpa de una simulación mal planteada o poco realista [11].

Este problema no es solo de los simuladores, también puede pasar en entrenamientos reales si se hacen mal, pero en la simulación es más fácil que ocurra. El hecho de no tener consecuencias reales puede hacer que el usuario actúe con menos cuidado que como lo haría en la vida real, o que repita errores sin darse cuenta.

Un factor clave es la falta de fidelidad del simulador. Si el sistema responde de forma irreal, el alumno aprende cosas que luego no funcionan en la realidad. Esto es todavía peor si el alumno no tiene experiencia previa, porque confía en el simulador como referencia principal.

También influye mucho la simplificación excesiva. Quitar pasos o consecuencias puede hacer que el usuario no valore ciertos procedimientos, algo peligroso en el ámbito militar.

Por eso, los simuladores deben estar bien diseñados, con límites claros y objetivos concretos. No sustituyen la realidad, solo la complementan, y si se usan así, el riesgo de entrenamiento negativo se reduce bastante.

2.4 Principales programas empleados

El desarrollo de un simulador virtual requiere el uso de distintos programas de software, ya que todo el trabajo se realiza de forma digital. A diferencia de los simuladores antiguos, donde lo más importante era el diseño físico, en los simuladores actuales el peso recae casi por completo en las herramientas informáticas empleadas para crear el entorno, la lógica y la interacción con el usuario. La elección de estos programas es importante, porque influye directamente en lo que el simulador puede hacer y lo que no y también en si el proyecto es viable o deja de serlo [10].

De forma general, el desarrollo puede dividirse en varias áreas, como el motor gráfico, el modelado tridimensional, el apartado visual y el sonido.

Cada una de estas partes necesita programas específicos, aunque todos deben poder trabajar juntos sin demasiados problemas.

El motor gráfico es el elemento central del simulador, ya que se encarga de mostrar el entorno, gestionar la interacción del usuario y controlar el funcionamiento general del sistema.

Alrededor de este motor se integran los modelos 3D, las texturas y los sonidos, que son creados previamente con otras herramientas.

Por otro lado, el modelado tridimensional es especialmente importante en un simulador naval, ya que incluye tanto la embarcación como el entorno marítimo.

El sonido también juega un papel muy relevante, aunque en ocasiones se deja en segundo plano. Elementos como el ruido del motor o del mar ayudan a que el usuario perciba mejor el comportamiento de la embarcación, incluso a que experimente ciertas sensaciones.

En este trabajo se ha optado por herramientas ampliamente utilizadas y compatibles entre sí. Además, son programas que pueden ejecutarse en equipos de gama media, lo que encaja con el objetivo de crear un simulador accesible y orientado a la formación individual. En los siguientes apartados se analizarán estas herramientas de forma más al detalle.

2.4.1 Unreal Engine

Unreal Engine destaca sobre todo por su capacidad para generar entornos visualmente creíbles sin necesidad de un modelado extremadamente complejo. Esto es importante en simulación, porque la sensación de realismo influye directamente en la inmersión del usuario. Además, es un motor maduro, estable y bien documentado.

En el caso concreto de la simulación naval, el motor permite representar espacios amplios como el mar o zonas portuarias con un rendimiento aceptable.

Por último, la gran comunidad de usuarios y la posibilidad de ampliar el proyecto en el futuro refuerzan la elección de Unreal Engine (Figura 2-6). En conjunto, es una herramienta adecuada, accesible y suficientemente potente para los objetivos formativos del simulador [17].



Figura 2-6 Epic Games. Logo de Unreal Engine [33]

2.4.1.1 Historia de Unreal Engine

La historia de Unreal Engine es un buen ejemplo de cómo una tecnología creada para el entretenimiento puede acabar utilizándose en contextos mucho más serios, como la simulación. Entender esta evolución ayuda a justificar por qué hoy en día se considera una opción válida para desarrollar simuladores virtuales, incluso fuera del ámbito del videojuego. No surge como una herramienta formativa, pero acaba siéndolo en parte.

Unreal Engine aparece a finales de los años noventa, cuando los videojuegos empezaban a pasar de forma clara a los entornos tridimensionales. En ese momento, muchos motores se diseñaban solo para un juego concreto, lo que hacía que cada nuevo proyecto fuese caro y poco flexible. Epic Games apostó por crear un motor reutilizable, y así nació Unreal Engine junto al videojuego Unreal en 1998, con un nivel gráfico bastante avanzado para su época.

Durante los años 2000, Unreal Engine fue creciendo y mejorando, sobre todo con las versiones Unreal Engine 2 y Unreal Engine 3. Estas versiones añadieron mejores gráficos, físicas más completas y herramientas de desarrollo más accesibles.

Unreal Engine 3, en especial, se usó en muchos juegos comerciales, lo que ayudó a pulir el motor y hacerlo más estable. Esto también hizo que empezara a llamar la atención fuera del mundo de los videojuegos.

La llegada de Unreal Engine 4 supuso un cambio importante técnico. El motor pasó a estar disponible para un público mucho más amplio, incluidos estudiantes y centros educativos, esto facilitó su uso en proyectos académicos y de investigación, algo que ya se estaba empezando a ver antes, pero que se hizo mucho más común a partir de este momento [10].

2.4.1.2 Unreal Engine 5

Unreal Engine 5 supone un avance importante dentro de la evolución del motor, aunque no se puede decir que sea una ruptura total con versiones anteriores, más bien consolida tecnologías que ya se venían anunciando y que encajan bien en el contexto de la simulación virtual.

El equilibrio entre calidad visual, rendimiento y facilidad de desarrollo es uno de los puntos clave, y es también uno de los motivos principales de su elección en este trabajo.

UE5 ofrece una base sólida, flexible y actual para el desarrollo del simulador de lancha de instrucción, cumpliendo con los requisitos técnicos del trabajo, algo que en el fondo resume casi todo lo dicho anteriormente.

2.4.1.3 Ventajas y limitaciones de Unreal Engine 5. Aspectos que vigilar

El uso de Unreal Engine 5 en un simulador virtual formativo tiene ventajas claras, sobre todo a nivel visual ya que el motor permite crear entornos marítimos creíbles con relativa facilidad, lo que ayuda a la inmersión y a entender mejor el espacio. Esto es importante en simulación, porque ver bien el entorno facilita tomar decisiones.

Unreal Engine 5 también destaca por su flexibilidad, permite empezar con un proyecto sencillo e ir ampliándolo poco a poco, algo muy útil en un trabajo como este. Además, el entorno de desarrollo favorece la iteración rápida, lo que ahorra tiempo. Esto, en un proyecto individual, es casi imprescindible.

Sin embargo, hay limitaciones claras. El uso excesivo de efectos avanzados puede afectar al rendimiento en ordenadores de gama media. Esto ya se ha dicho antes pero es un riesgo real. En simulación formativa la estabilidad es clave, y una bajada de rendimiento puede afectar al aprendizaje.

Otro aspecto a vigilar es la fidelidad funcional. Las físicas del motor no son específicas para simulación naval, por lo que el comportamiento de la embarcación debe simplificarse con cuidado. Un modelo sencillo pero coherente es mejor que uno complejo y poco real. Esto se relaciona directamente con el riesgo de entrenamiento negativo.

También la interfaz y los controles deben ser claros. Unreal Engine 5 permite diseños muy atractivos, pero aquí lo importante es que la información sea comprensible. En resumen, el motor es muy potente, pero solo si se usa con criterio [7].

2.4.2 Blender

Blender es un programa de creación tridimensional que permite realizar modelado, texturizado y preparación de modelos para motores gráficos (Figura 2-7). Aunque suele asociarse al ámbito artístico, actualmente se usa también en contextos técnicos y educativos, incluida la simulación, y es perfectamente válido para este tipo de proyectos.

Una de sus principales ventajas es que se trata de software libre y de código abierto. Esto implica que no tiene costes de licencia y que puede utilizarse sin restricciones, algo especialmente importante aquí. Además al ser una herramienta muy extendida, existen muchos recursos formativos disponibles, lo que facilita su aprendizaje, aunque no sea sencillo al principio.

En el desarrollo de un simulador naval Blender ofrece funcionalidades suficientes para modelar una lancha de instrucción y los elementos básicos del entorno, como muelles o señalización.

Otro aspecto relevante es la compatibilidad de Blender con motores gráficos modernos. Los modelos pueden exportarse en formatos estándar como .fbx, lo que facilita su integración en el motor sin grandes problemas [5].



Figura 2-7 Blender Foundation. Logo de Blender [34]

2.4.2.1 Historia de Blender

Al principio, Blender no tenía grandes aspiraciones comerciales ni buscaba competir directamente con otros programas. Esto hizo que su diseño priorizara la flexibilidad y la eficiencia.

El momento clave de su historia llega a comienzos de los años 2000 cuando el proyecto estuvo cerca de desaparecer. Ante esta situación se tomó una decisión muy importante, liberar el código y convertir Blender en software libre. A partir de ahí se crea la Blender Foundation, que garantiza su continuidad.

Desde entonces, el desarrollo pasa a depender de una comunidad internacional de usuarios y desarrolladores, lo que cambia por completo la evolución del programa en sí.

Este modelo abierto permitió que Blender creciera de forma constante, incorporando mejoras basadas en necesidades reales.

Hoy en día, Blender se considera una herramienta madura, capaz de adaptarse a distintos ámbitos, como el desarrollo de simuladores o el trabajo con motores gráficos [5].

2.4.2.2 Ventajas y limitaciones de Blender

El uso de Blender como herramienta principal es la creación de modelos 3D en un simulador formativo presenta ventajas claras, aunque también algunas limitaciones que es necesario tener en cuenta.

Una de las ventajas más importantes de Blender es su accesibilidad. Al ser un software gratuito y de código abierto no supone ningún coste económico, lo cual es especialmente relevante.

Desde un punto de vista técnico, Blender ofrece suficientes herramientas de modelado para cubrir las necesidades visuales del proyecto. Permite crear tanto modelos sencillos como otros algo más complejos.

Otra ventaja relevante es el control sobre la geometría y la optimización. Blender permite reducir polígonos y preparar modelos más optimizados.

Sin embargo, Blender también presenta limitaciones. Una de las principales es su curva de aprendizaje, que puede resultar elevada para usuarios sin experiencia previa. La cantidad de opciones y herramientas disponibles puede ser confusa al principio, lo que exige dedicar tiempo a aprender el programa. Esto obligan a planificar bien el alcance del proyecto. Intentar crear modelos demasiado detallados puede consumir mucho tiempo y afectar al desarrollo global del simulador. Además, existe el riesgo de centrarse en exceso en el aspecto visual, algo que no siempre aporta valor real al aprendizaje.

Otra limitación es que Blender no permite comprobar directamente el comportamiento final de los modelos dentro del motor de simulación. Es necesario exportar y probar los modelos en Unreal Engine de forma iterativa, ajustando su complejidad y rendimiento. Además, Blender no simula comportamientos físicos reales, como la hidrodinámica, tensiones o fatiga, ya que su función es únicamente visual. Por último, es importante mantener una escala y proporciones correctas [5].

2.4.3 Otros programas

También se utilizan otros programas de apoyo. No son el núcleo del proyecto, pero sí resultan necesarios para completar el conjunto y dar coherencia al resultado final. Sin ellos, la experiencia quedaría incompleta, especialmente a nivel visual y sonoro, estas herramientas se usan sobre todo para trabajar imágenes y sonido. Aunque estos elementos no son los más importantes desde el punto de vista funcional influyen bastante en cómo el usuario percibe el simulador. La elección de estos programas sigue criterios similares a los del resto del proyecto, como accesibilidad, compatibilidad y facilidad de uso.

Dentro de este grupo destacan dos programas bastante conocidos y utilizados: Paint.NET y Audacity. Ambos se emplean como herramientas de apoyo durante el desarrollo del simulador de lancha de instrucción, cada uno en su ámbito.

2.4.3.1 Paint.NET

Paint.NET (Figura 2-8) es un programa de edición de imágenes raster de uso gratuito que permite realizar modificaciones básicas sobre gráficos bidimensionales de forma sencilla. Aunque no dispone de todas las funcionalidades avanzadas de herramientas más complejas, resulta suficiente para tareas simples dentro de un proyecto como este. En este caso, se ha optado por utilizar Paint.NET principalmente por tratarse de una herramienta gratuita y fácil de usar. Dado que las necesidades de edición eran bastante básicas, no era necesario recurrir a programas más avanzados. Durante el desarrollo, Paint.NET se ha empleado para realizar ajustes sencillos sobre imágenes que posteriormente se integran en el motor gráfico. Entre estos usos se incluyen la creación y edición de texturas simples, la corrección de color, el ajuste de contraste o pequeños retoques en elementos visuales como iconos o detalles de superficies de la embarcación.

Su uso ha sido puntual y centrado en tareas concretas, funcionando como una herramienta de apoyo dentro del flujo de trabajo general. De esta manera, ha permitido preparar recursos gráficos de forma rápida y sin añadir complejidad innecesaria al proyecto.



Figura 2-8 dotPDN LLC. Logo de Paint.NET [35]

2.4.3.2 Audacity

El sonido es una parte importante del simulador, aunque a veces no se le da tanta prioridad como a lo visual, el sonido. Aun así, aporta información y mejora la experiencia del usuario. Para el tratamiento del audio se ha utilizado Audacity (Figura 2-9), un programa de edición de sonido libre. Audacity está desarrollado por la Audacity Team y permite grabar y editar audio de forma sencilla [2]. Su carácter gratuito lo hace muy adecuado para proyectos como este. En el simulador se usa para preparar efectos sonoros básicos, como el sonido del motor o del agua, vibraciones, etc.



Figura 2-9 Audacity Team. Logo de audacity [36]

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Fase de modelado

3.1.1 Introducción y herramientas principales

La primera fase en el desarrollo de este proyecto consistió fundamentalmente en un proceso de modelado de la embarcación que posteriormente sería utilizada en el simulador como vehículo principal.

Este trabajo se llevó a cabo utilizando el software de Blender, una herramienta ampliamente utilizada en el ámbito del modelado 3D, animación y creación de entornos virtuales.

Blender ofrece un entorno de trabajo muy completo para la generación de modelos tridimensionales mediante mallas poligonales, permitiendo al usuario construir objetos complejos a partir de elementos geométricos sencillos como vértices, aristas y caras.

El objetivo principal de esta fase fue crear una representación de la lancha que sirviese como base visual y funcional dentro del simulador desarrollado posteriormente en Unreal Engine 5.

Aunque el modelado debía ser suficientemente detallado como para resultar reconocible y creíble dentro de un entorno de simulación, también es necesario tener en cuenta las limitaciones de tiempo disponibles para la realización del proyecto.

Por este motivo, el trabajo se abordó buscando un equilibrio entre nivel de detalle, tiempo de desarrollo y eficiencia del modelo, evitando procesos excesivamente minuciosos que podrían haber ralentizado significativamente el avance del resto de fases del proyecto, como la programación de físicas o la implementación de los ejercicios de simulación o el escenario.

A pesar de estas limitaciones temporales, se trató de realizar un modelado lo más completo posible, abordando tanto la parte exterior de la embarcación como los elementos visibles del interior incluyendo distintas estructuras, compartimentos y componentes característicos de la lancha.

El objetivo era que el modelo final ofreciese una apariencia suficientemente fiel al buque real, permitiendo al usuario del simulador orientarse dentro del entorno virtual de manera intuitiva y reconociendo las distintas partes de la embarcación.

El proceso de modelado comenzó con la creación de la estructura principal del casco, que constituye el elemento más importante desde el punto de vista geométrico y visual, así como la base de todo el resto de elementos. Para poder realizar este proceso de forma lo más precisa posible se emplearon imágenes de referencia reales de la embarcación, que se utilizaron como guía durante el modelado (como se muestra en la Figura 3-1).



Figura 3-1: Modelado con imágenes de referencia en Blender (Elaboración propia).

Estas imágenes incluían principalmente vistas laterales, vistas desde proa y referencias generales de la silueta de la lancha. En algunos casos estas imágenes fueron importadas dentro de Blender como imágenes de referencia en el visor 3D o en planos móviles de fondo, lo que permite situarlas en el espacio de trabajo y utilizarlas como guía visual mientras se construye la geometría del modelo.

3.1.2 Casco

Una vez definidas las referencias visuales, se procedió a crear la base del casco mediante el uso de mallas poligonales simples, comenzando normalmente a partir de figuras geométricas básicas como cubos o planos. A partir de estas se fue dando forma progresivamente al casco mediante distintas herramientas de edición de malla disponibles en Blender.

Entre las herramientas más utilizadas durante esta fase se encuentran operaciones básicas como extruir, escalar, mover y rotar que permiten modificar la posición y forma de los vértices, aristas y caras para construir progresivamente la geometría deseada.

La herramienta extruir fue especialmente importante durante el proceso de modelado del casco, como suele ser siempre en Blender. Esta herramienta permite generar nueva geometría a partir de una cara existente, extendiéndola en una dirección determinada.

Gracias a estas operaciones fue posible ir creando progresivamente la longitud del casco y sus distintas secciones, añadiendo nuevas caras que posteriormente podían ajustarse en posición y escala para adaptarse a la forma real de la embarcación. Este método es muy común en modelado básico ya que te permite construir estructuras complejas partiendo de formas relativamente simples.

Durante el proceso también se emplearon con frecuencia herramientas de selección y unión de vértices, aristas y caras, alternando entre los distintos modos de selección de Blender para poder modificar con precisión las distintas partes de la malla.

En ocasiones se trabajó seleccionando grupos completos de vértices para modificar la curvatura del casco, mientras que en otras situaciones era más conveniente ajustar únicamente determinadas aristas para definir mejor algunas transiciones entre superficies.

Otra herramienta utilizada de forma habitual fue loop cut, que permite añadir nuevos cortes o divisiones dentro de una malla. Estos cortes adicionales son muy útiles para aumentar el nivel de control sobre la forma del modelo, ya que permiten introducir nuevos vértices en zonas donde se necesita modificar la geometría con mayor precisión. En el caso del casco, los loop cuts se utilizaron para definir mejor algunas de las curvaturas del casco y para ajustar progresivamente la silueta general de la embarcación.

Además de estas herramientas, también se empleó el modo de edición proporcional, conocido en Blender como proportional editing. Este modo permite modificar un vértice concreto mientras que los vértices cercanos se desplazan también de manera gradual, generando deformaciones suaves en la malla.

Esta herramienta resulta especialmente útil cuando se trabaja con superficies curvas como las que aparecen en el casco de una embarcación, ya que permite crear transiciones más naturales sin necesidad de modificar manualmente cada vértice de forma individual.

En paralelo al modelado directo de la geometría, también se prestó atención a mantener una estructura de malla relativamente limpia y ordenada, evitando en la medida de lo posible geometrías innecesariamente complejas o con un número excesivo de polígonos. Este aspecto es importante no solo desde el punto de vista del modelado, sino también pensando en la posterior integración del modelo dentro del motor gráfico, donde una malla excesivamente pesada podría afectar negativamente al rendimiento del simulador.

No obstante, el modelo podría estar más optimizado, con más tiempo de desarrollo se podría trabajar en ello. De todos modos, aunque la optimización puede ser mejorable, el sistema de Level of Detail (LODs) que después emplearé en Unreal, permitirá que las mallas más alejadas o fuera de cámara se intercambien por unas mucho más sencillas.

A lo largo de esta fase inicial se realizaron múltiples ajustes iterativos sobre la geometría del casco (véase la Figura 3-2), alternando constantemente entre el modo de edición y la visualización general del modelo para comprobar que la silueta resultante se correspondía razonablemente con la forma real de la embarcación.

Este proceso de refinamiento progresivo es habitual en el modelado 3D, ya que permite ir acercándose poco a poco a la forma final deseada mediante pequeños ajustes sucesivos.

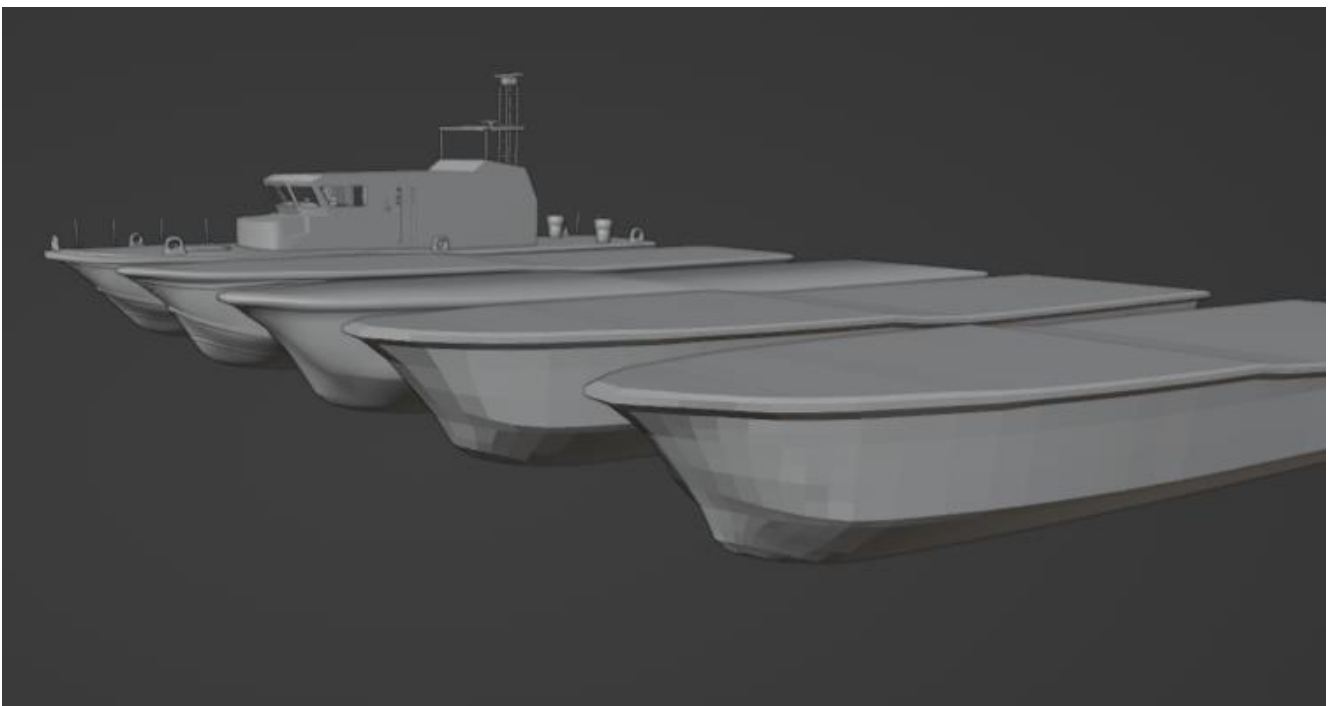


Figura 3-2 Pulido de la malla del cascos hasta la v.0.4 (Elaboración propia)

En definitiva, esta primera etapa del proyecto estuvo centrada en la construcción de la base geométrica de la lancha, estableciendo la estructura principal del casco a partir de la cual se desarrollarían posteriormente el resto de elementos del modelo.

Aunque el modelado no buscaba alcanzar un nivel de detalle extremadamente alto debido a las limitaciones de tiempo del proyecto, sí se procuró que la geometría resultante fuese lo suficientemente representativa de la embarcación real como para cumplir adecuadamente su función dentro del simulador.

Esta base serviría posteriormente como un punto de partida para continuar con el modelado de la superestructura y de los distintos elementos de detalle que componen en conjunto el total de la embarcación.

3.1.3 Superestructura

Una vez finalizado el modelado básico del casco de la embarcación, el siguiente paso dentro del proceso de creación del modelo consistió en el modelado de la superestructura de la lancha, es decir, todas aquellas estructuras que se sitúan sobre la cubierta principal y que incluyen elementos como el puente y puente alto, las paredes exteriores del puente y CIC, el techo y otros componentes visibles que caracterizan la silueta superior de la embarcación.

Esta fase también se llevó a cabo dentro del entorno de modelado del software Blender, empleando nuevamente técnicas de modelado poligonal básicas similares a las utilizadas durante la creación del casco.

Para abordar esta parte del modelado se partió nuevamente de geométricas simples, generalmente cubos o planos, que posteriormente se fueron modificando mediante operaciones básicas de edición de la malla.

Al igual que en el caso del casco, se utilizaron herramientas fundamentales del modo de edición que permiten modificar la geometría de la malla de forma progresiva hasta alcanzar la forma deseada. Estas herramientas son especialmente adecuadas para el modelado de estructuras arquitectónicas simples, como es el caso de muchas partes de la superestructura de una embarcación.

Uno de los recursos mas importantes utilizados durante esta fase fue el uso del modificador de simetría, conocido en Blender como Mirror Modifier. Este modificador permite modelar únicamente una mitad del objeto mientras el programa genera automáticamente la otra mitad de forma simétrica respecto a un eje determinado.

En el caso de la Rodman 66, cuya geometría es prácticamente simétrica respecto al eje longitudinal, esta herramienta resulta especialmente útil, ya que permite reducir considerablemente el tiempo de modelado y mantener una mayor precisión geométrica.

De este modo, durante gran parte del proceso únicamente fue necesario trabajar sobre uno de los lados de la superestructura, mientras que el otro lado se generaba automáticamente como reflejo del primero.

El uso de la simetría también ayudó a mantener una estructura de malla más ordenada, evitando posibles diferencias o irregularidades entre ambos lados del modelo que podrían aparecer si se modelasen por separado.

Además, cualquier modificación realizada en una mitad del modelo se reflejaba automáticamente en la otra, lo que permitía realizar ajustes rápidos en la forma general de la superestructura sin necesidad de duplicar todo el trabajo.

A diferencia del casco, que presenta numerosas superficies curvas y transiciones suaves entre diferentes zonas del modelo, la superestructura de la lancha está compuesta principalmente por superficies planas y aristas relativamente definidas (véase la Figura 3-3 con los planos del modelo 3D).

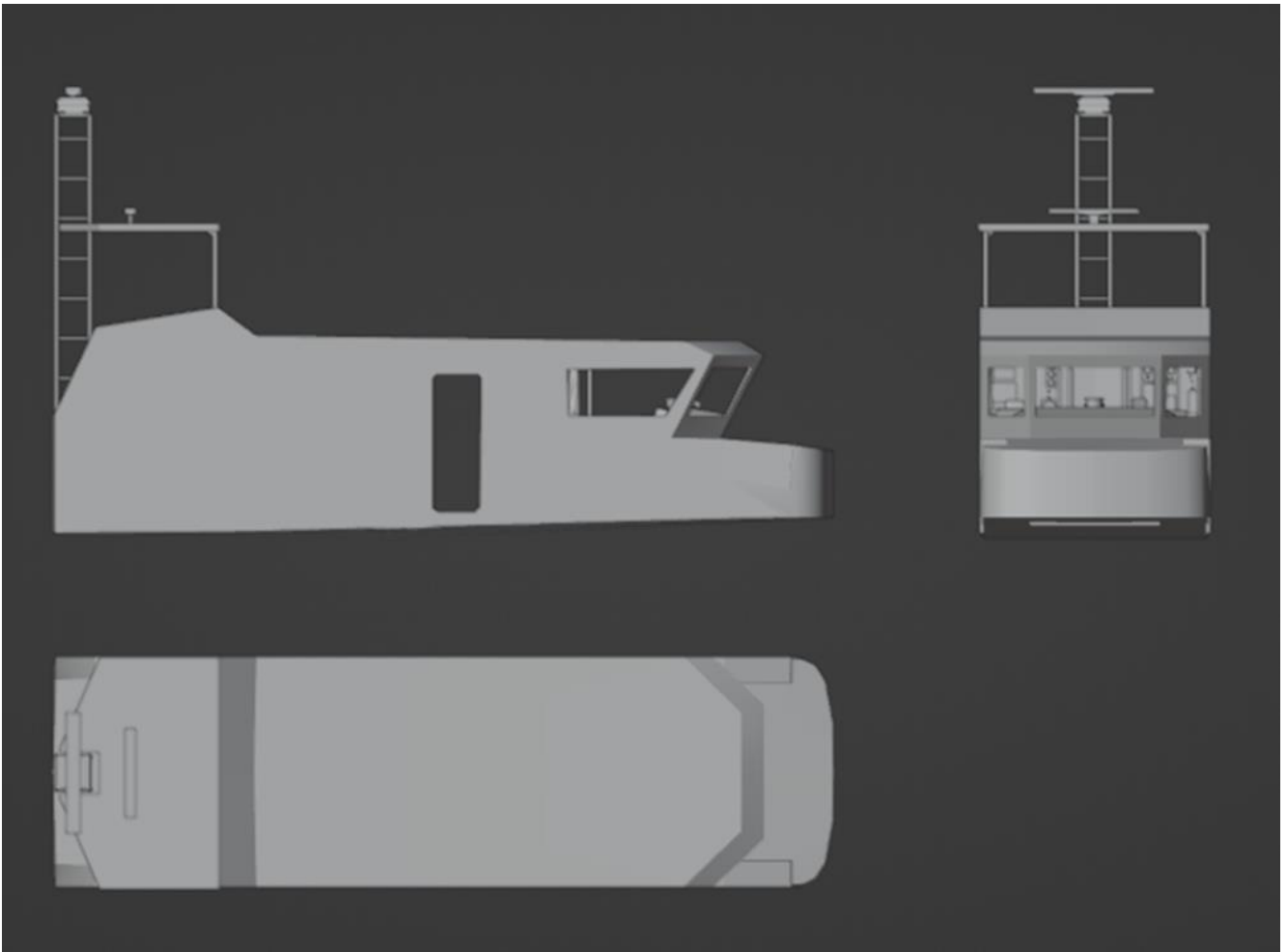


Figura 3-3 Superestructura (Elaboración propia)

Esta característica permitió simplificar considerablemente la geometría necesaria para representarla, ya que en superficies planas no es necesario utilizar un número elevado de polígonos para obtener un resultado visual correcto. En consecuencia, la malla utilizada en esta parte del modelo es significativamente más ligera que la del casco en términos de número de vértices y caras. Este aspecto resulta especialmente importante desde el punto de vista de la optimización del modelo, ya que el número total de polígonos influye directamente en el rendimiento del motor gráfico cuando el modelo es importado posteriormente al entorno de simulación. Al reducir la complejidad geométrica en aquellas zonas donde no es necesaria una gran cantidad de detalle, se consigue mantener un equilibrio adecuado entre calidad visual y eficiencia computacional.

Durante el modelado de la superestructura también se prestó especial atención a la definición de los espacios donde posteriormente se ubicarían elementos adicionales, como puertas, ventanas y otros componentes estructurales. En lugar de añadir estos elementos directamente en esta fase inicial, se decidió dejar huecos o aperturas en la geometría principal que más adelante permitirían insertar estos objetos como modelos independientes. Este enfoque facilita el trabajo y posterior de detallado, ya que permite crear cada elemento de manera separada y con mayor control sobre su geometría.

Para generar estos huecos en la malla se utilizaron diferentes técnicas básicas de modelado. En algunos casos se emplearon operaciones de extrusión hacia el interior, que permiten crear cavidades dentro de la geometría existente. En otros casos se añadieron loop cuts adicionales para definir con mayor precisión la zona donde posteriormente se abriría el hueco correspondiente.

Estas divisiones adicionales de la malla permiten delimitar con mayor claridad los contornos de puertas y ventanas, facilitando posteriormente la inserción de estos elementos dentro del modelo. A

medida que se avanzaba en el modelado de esta parte de la embarcación, se fueron realizando múltiples revisiones visuales del modelo desde diferentes ángulos dentro del visor 3D.

Blender permite cambiar fácilmente entre distintos modos de visualización, como el modo sólido, el modo wireframe o el modo de vista material, lo cual resulta útil para comprobar tanto la forma general del modelo como la distribución de la malla poligonal. Estas revisiones periódicas permitieron detectar posibles irregularidades en la geometría y corregirlas antes de continuar añadiendo nuevos elementos.

También se prestó atención a mantener una proporción coherente entre las distintas partes de la superestructura y el casco previamente modelado. Para ello se utilizó con frecuencia la herramienta de medición y la observación comparativa con las imágenes de referencia empleadas al inicio del proceso.

Aunque no se buscaba una reproducción absolutamente exacta de todas las dimensiones de la embarcación real, sí era importante que las proporciones generales del modelo resultasen creíbles dentro del entorno de simulación. En caso de disponer de más tiempo podría estudiarse la creación de un modelo aún más detallado y preciso.

En resumen, esta segunda fase del proceso de modelado estuvo centrada en la construcción de la estructura superior de la embarcación, aprovechando las características geométricas más simples de esta parte del buque para crear un modelo eficiente en términos de polígonos.

El uso de herramientas como el modificador de simetría, las operaciones básicas de edición de malla y la planificación previa de los huecos para puertas y ventanas permitió avanzar de forma relativamente rápida en la construcción de la superestructura, cuidando las bases para la siguiente etapa del modelado en la cual se añadirían los distintos elementos de detalle que completan la apariencia de la lancha dentro del simulador.

3.1.4 Objetos secundarios, etapa de detalle

3.1.4.1 Elementos exteriores de detalle

Una vez completadas las fases principales de modelado del casco y de la superestructura de la embarcación, se procedió a iniciar una tercera etapa centrada en la creación de lo que se podría denominar elementos o complementos de detalle del modelo.

Esta fase consistió en añadir todos aquellos objetos secundarios que, si bien no forman parte de la estructura principal de la lancha, sí contribuyen de manera significativa a mejorar el realismo visual del modelo tridimensional y a facilitar la identificación de los distintos espacios dentro de la embarcación.

Entre estos elementos se incluyen componentes como puertas, ventanas, muebles interiores, instrumentos del puente, barandillas, cornamusas o vitas, guías de amarre y otros pequeños accesorios propios de este tipo de embarcaciones (véase en la Figura 3-4 todos los detalles que incorpora el modelo).

Desde el punto de vista del modelado, esta etapa presenta características distintas respecto a las fases anteriores, mientras que el casco y la superestructura se construyen a partir de grandes volúmenes geométricos relativamente sencillos, los elementos de detalle suelen implicar la creación de muchos objetos independientes de menor tamaño, cada uno de los cuales requiere su propio proceso de modelado, posicionamiento y ajuste dentro del conjunto general del modelo.

Esto implica trabajar con una mayor cantidad de objetos dentro de la escena y prestar atención a aspectos como la escala relativa de cada elemento, su correcta colocación y su coherencia con el resto de la embarcación.

La creación de estos elementos se realizó nuevamente dentro del entorno de Blender, al igual que en cada uno de los procesos anteriores, utilizando principalmente siempre técnicas de modelado poligonal básicas.

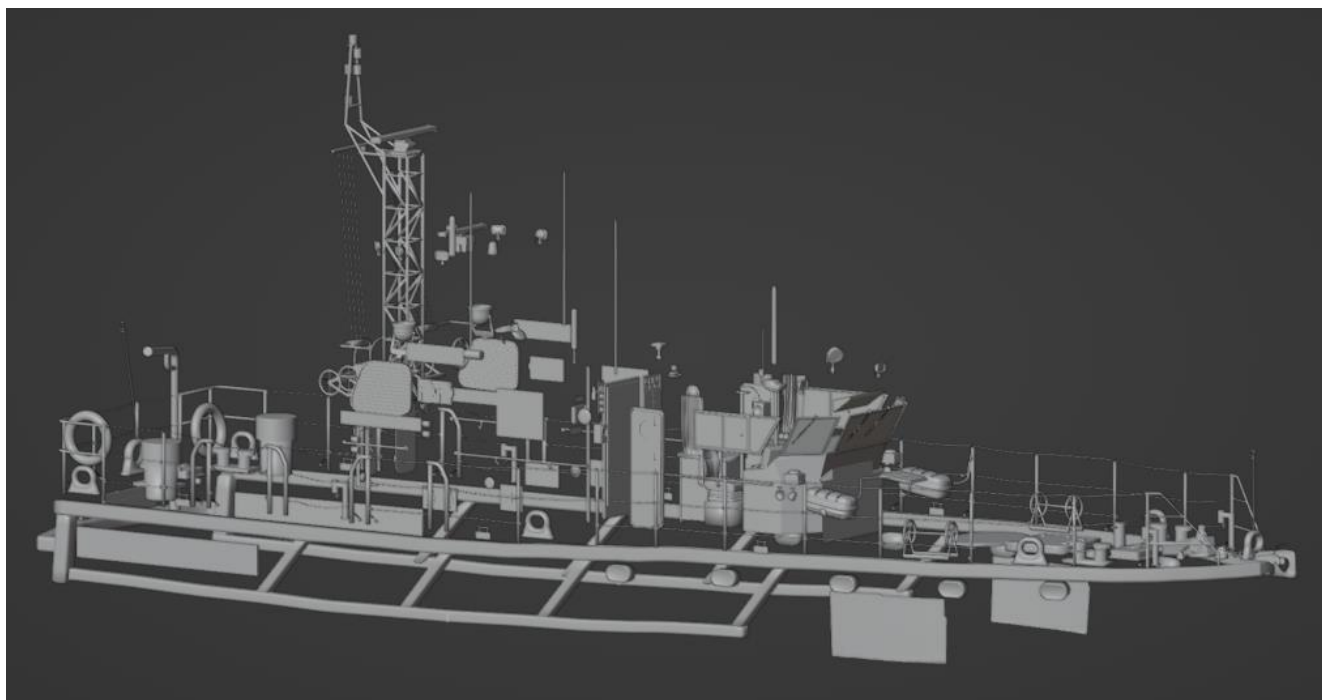


Figura 3-4 Detalles de la lancha (Elaboración propia)

Como siempre, en la mayoría de casos se partió de primitivas simples, como cubos, cilindros o planos, que posteriormente se fueron modificando mediante herramientas habituales del modo de edición de malla, por ejemplo, los muebles interiores o algunos componentes estructurales se modelaron a partir de cubos que posteriormente se escalaron y extruyeron para obtener la forma deseada. De manera similar, elementos cilíndricos como algunas vitas o soportes metálicos se generaron a partir de cilindros básicos, ajustando posteriormente su tamaño y proporciones mediante operaciones de escala y extrusión. Durante esta fase también se emplearon con frecuencia herramientas como bevel, que permite suavizar o redondear determinadas aristas del modelo.

Este tipo de operación resulta útil para evitar que los objetos presenten bordes excesivamente afilados, algo que suele resultar poco natural desde el punto de vista visual, incluso un pequeño biselado en determinadas aristas puede mejorar considerablemente la apariencia final del objeto dentro del motor gráfico, especialmente cuando se aplican materiales o iluminación. Otro aspecto importante de esta fase fue la organización de los distintos objetos dentro de la escena de Blender.

A medida que se iban añadiendo nuevos elementos al modelo, el número de objetos presentes en el archivo aumentaba de forma considerable. Por este motivo fue necesario mantener una cierta organización utilizando nombres identificativos para los objetos y agrupándolos de forma lógica dentro de la escena.

Este tipo de organización facilita posteriormente la exportación del modelo y su integración dentro del motor gráfico, ya que permite localizar rápidamente cada elemento y gestionar mejor los materiales o las transformaciones aplicadas.

No obstante, a pesar de que la creación de estos elementos de detalle contribuye a mejorar el aspecto visual del modelo, también representa una de las fases más exigentes en términos de tiempo de desarrollo. Cada pequeño componente requiere su propio proceso de modelado, ajuste y colocación dentro del conjunto de la embarcación. Cuando se intenta reproducir una embarcación real, el número de elementos que podrían modelarse es potencialmente muy elevado, lo que puede convertir esta etapa en un proceso extremadamente largo si no se establecen ciertos límites.

En este sentido, durante el desarrollo del proyecto fue necesario realizar una gestión cuidadosa del tiempo disponible, ya que el objetivo principal del trabajo no era únicamente la creación de un modelo

tridimensional relativamente detallado, sino el desarrollo completo de un simulador funcional que incluyese físicas realistas, interacción del usuario y ejercicios de navegación. Si el modelado se prolongaba en exceso intentando replicar todos y cada uno de los elementos presentes en la embarcación real, existía el riesgo de no disponer de tiempo suficiente para completar las fases posteriores del proyecto. Podría decirse que la escasez de tiempo y de personal, una sola persona, ha sido el factor sin duda más limitante de este proyecto.

3.1.4.2 Interiores del puente de gobierno

En lo relativo al modelado de los interiores del puente de mando, se llevó a cabo un proceso centrado principalmente en la creación de los distintos instrumentos y elementos visibles desde la posición del oficial de guardia en puente, con el objetivo de aportar tanto realismo visual como funcionalidad dentro del simulador (Figura 3-5).

Esta fase se desarrolló siguiendo un enfoque similar al utilizado en el modelado exterior de objetos secundarios exteriores, aunque adaptado a la naturaleza más detallada y específica de los elementos interiores.

El modelado de los instrumentos se realizó partiendo de formas geométricas simples como es habitual. Por otro lado, fue importante prestar mayor atención a la disposición y proporciones de los elementos, ya que el usuario interactúa visualmente con esta zona de forma más directa durante la simulación. No obstante, al igual que en otras fases del proyecto, no se buscó un nivel extremo de detalle, sino un equilibrio entre fidelidad visual y tiempo de desarrollo.

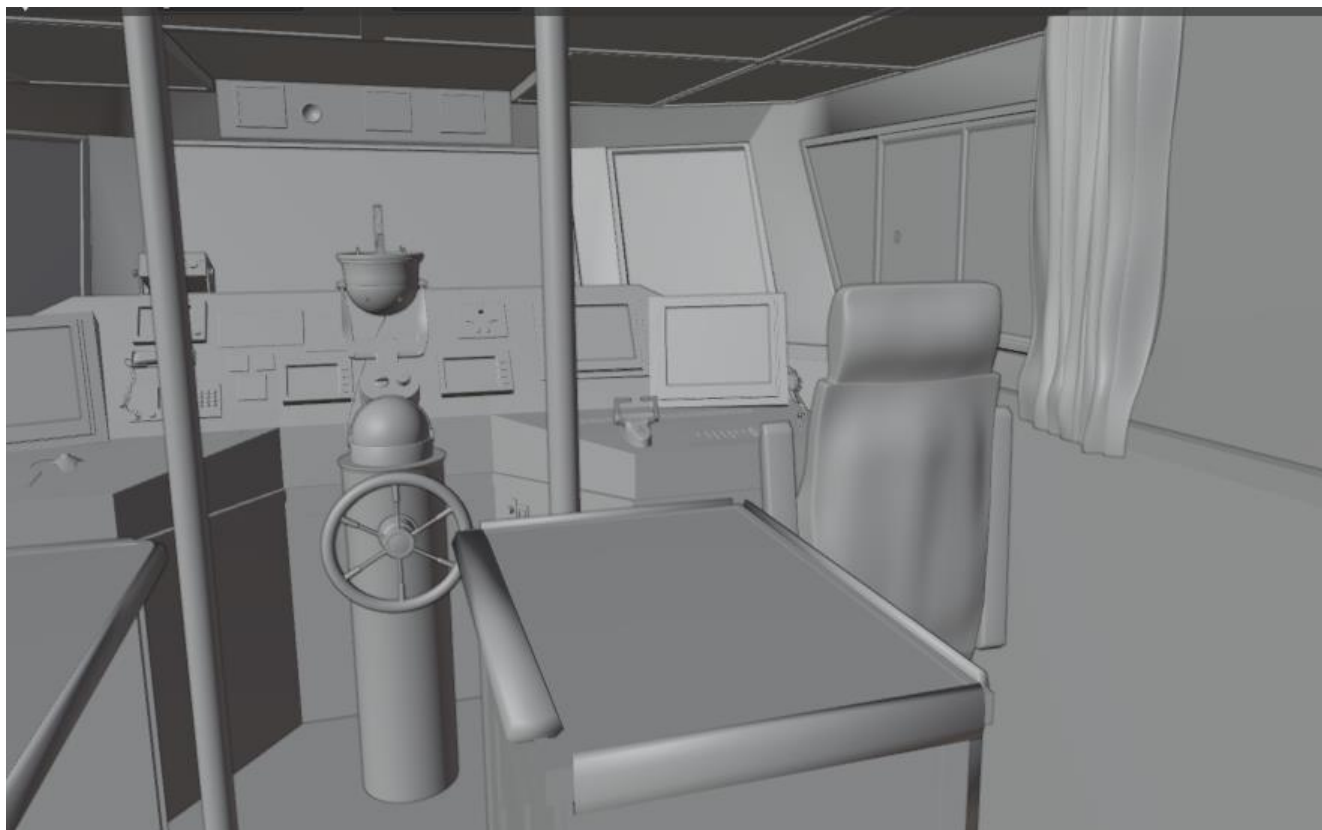


Figura 3-5 Modelo interior del puente de mando (Elaboración propia)

Desde el punto de vista funcional, los instrumentos del puente se pueden dividir en dos grandes grupos. Por un lado, aquellos que cumplen una función principalmente estética o de inmersión, o que aún no tienen su uso disponible, como pueden ser pantallas, indicadores o paneles que no interactúan directamente con el usuario, pero que contribuyen a que el entorno resulte más creíble y cercano a una embarcación real. Estos elementos ayudan a reforzar la sensación de estar en un puente de mando real, lo cual es importante para la experiencia global del simulador.

No obstante, por otro lado, existen instrumentos que sí tienen una función directa dentro del entrenamiento, siendo el caso más representativo el de la alidada, situada en la zona central del puente. Este instrumento se modeló con especial atención, ya que su propósito dentro del simulador no es únicamente visual, sino también operativo.

La alidada permite al usuario realizar mediciones de demoras, es decir, determinar el ángulo entre el norte y un punto de referencia exterior. Este tipo de medición es fundamental en navegación para la orientación y la toma de decisiones.

De este modo, el modelado de los interiores no solo contribuye a mejorar la apariencia del simulador, sino que también sienta las bases para la incorporación de herramientas que tienen un uso real en la navegación, reforzando así el carácter formativo del proyecto.

3.1.5 Conclusión de la fase de modelado

Llegó un punto dentro de esta fase en el que fue necesario detener el proceso de modelado y aceptar el nivel de detalle alcanzado hasta ese momento, aun siendo consciente de que el modelo podía mejorarse en muchos aspectos. Esta decisión forma parte de la planificación habitual en proyectos de desarrollo, donde es necesario

establecer prioridades y definir un punto a partir del cual el modelo puede considerarse suficientemente completo para cumplir su función dentro del proyecto.

Durante este periodo también se produjo una situación en la que fue necesario trabajar simultáneamente en la fase de modelado y en la fase de programación del simulador. Esto implicaba alternar entre el entorno de modelado en Blender y el entorno de desarrollo dentro de Unreal Engine 5, con el objetivo de avanzar en ambas áreas del proyecto de manera paralela.

En algunos momentos esta estrategia permitió comprobar cómo se comportaban dentro del motor gráfico algunos de los elementos que ya habían sido modelados, facilitando así ciertas decisiones sobre el nivel de detalle necesario.

Sin embargo, con el paso del tiempo también se hizo evidente que dividir el esfuerzo entre dos fases complejas al mismo tiempo reducía la eficiencia global del trabajo. Tanto el modelado como la programación requieren una concentración considerable y un flujo de trabajo relativamente continuo.

Es por ello que alternar constantemente entre ambas tareas podía provocar en ocasiones interrupciones en el proceso creativo y ralentizar así el progreso general del proyecto. Debido a estas circunstancias, y teniendo en cuenta el tiempo limitado disponible para completar el trabajo, se tomó la decisión de finalizar formalmente la fase de modelado en el estado en el que se encontraba el modelo en ese momento a finales de febrero.

Esta versión del modelo tridimensional de la lancha fue considerada como la primera versión estable del modelo, a la que se hizo referencia internamente como versión v1.0 (Figura 3-6). Aunque esta versión todavía presenta ciertas simplificaciones y carece de algunos elementos que podrían añadirse en futuras mejoras, se considera suficientemente completa para poder integrarse dentro del simulador y continuar con el desarrollo del resto del proyecto.

A partir de este punto, el trabajo se centró principalmente en la fase de programación y desarrollo del simulador. Esta decisión permitió concentrar los esfuerzos en la implementación de las físicas de navegación, la interacción del usuario y los distintos ejercicios de simulación, aspectos que constituían el núcleo principal del proyecto.

Una vez finalizada la fase de modelado en su totalidad y al poder dedicar toda la atención a la programación, el progreso del proyecto comenzó a avanzar de manera significativamente más rápida y estructurada.



Figura 3-6 Versión 1.0 y 0.4 (Elaboración propia)

En conclusión, esta etapa del proyecto representó un proceso intensivo de creación de pequeños elementos que enriquecen el modelo tridimensional de la embarcación. Aunque el modelo final no alcanza un nivel de detalle absolutamente exhaustivo, sí incluye los componentes más representativos necesarios para que la lancha resulte creíble dentro del entorno de simulación. La decisión de cerrar el modelado en una versión funcional y continuar con el desarrollo del simulador permitió mantener el equilibrio entre calidad visual, viabilidad temporal y objetivos técnicos del proyecto.

En el ámbito de los simuladores, especialmente aquellos orientados al entrenamiento o a la enseñanza, la fidelidad absoluta del modelo visual no siempre es el factor más determinante. Como se mencionó en el “Estado del Arte” al principio de esta memoria, en muchos casos resulta mucho más importante que el usuario perciba sensaciones coherentes con la realidad durante la interacción con el sistema.

Estas sensaciones están relacionadas principalmente con el movimiento de la embarcación, la respuesta a los mandos, la influencia de factores externos como el viento o la inercia, y la percepción general del entorno en el que se desarrolla la simulación, siendo esto lo que más contribuye al aprendizaje.

Por este motivo, uno de los objetivos principales durante el desarrollo del proyecto fue lograr que el usuario que interactúa con el simulador perciba un grado razonable de inmersión dentro del entorno virtual, es decir, que la experiencia de navegación resulte intuitiva y que el comportamiento de la lancha responda de una manera similar a como lo haría una embarcación real en condiciones comparables.

Esta sensación de inmersión no depende únicamente de la apariencia visual del modelo, que también, sino además de factores como el movimiento del barco, la respuesta a los controles de gobierno, la interacción con el entorno y la coherencia general de la simulación.

En este contexto, el modelo tridimensional de la lancha cumple principalmente la función de proporcionar un soporte visual creíble para el sistema de simulación.

Mientras el modelo permita identificar correctamente las partes principales de la embarcación y ofrezca una representación suficientemente clara de su estructura general, puede considerarse adecuado para el propósito de inmersión del proyecto.

3.2 Fase de exportación e importación

3.2.1 Introducción a la exportación

Una vez finalizada la fase principal de modelado tridimensional de la embarcación, el siguiente paso dentro del flujo de trabajo del proyecto consistió en preparar el modelo para su integración dentro del motor gráfico.

Para ello fue necesario realizar el proceso de exportación del modelo desde el entorno de modelado hacia el entorno de desarrollo del simulador, que en este caso se realizó utilizando el motor gráfico Unreal Engine 5.

Este paso es fundamental dentro de cualquier proyecto que combine modelado 3D y desarrollo de simulaciones, ya que implica adaptar la estructura del modelo para que pueda ser interpretada correctamente por el motor gráfico.

3.2.2 Exportación desde Blender e importación en Unreal

Antes de proceder a la exportación, fue necesario realizar un proceso previo de organización y preparación del modelo dentro de Blender. A lo largo de la fase de modelado se habían ido creando numerosos objetos independientes correspondientes a los distintos elementos que componen la lancha: partes estructurales, elementos de cubierta, objetos interiores, instrumentos, barandillas y otros componentes de detalle. Como resultado el modelo final estaba compuesto por cientos de elementos distintos, cada uno de ellos representado como un objeto independiente dentro de la escena de modelado.

Si todos estos elementos se exportasen de forma completamente individual, el manejo del modelo dentro del motor gráfico podría volverse innecesariamente complejo.

Por este motivo se llevó a cabo un proceso de agrupación y organización de los objetos, combinando aquellos que compartían características similares. En particular, se agruparon numerosos elementos según criterios de material o similitud geométrica, de forma que varias piezas que utilizaban el mismo tipo de material pudieran integrarse como un mismo objeto o conjunto de malla.

Este procedimiento permite reducir la complejidad del modelo una vez importado dentro del motor gráfico ya que disminuye el número total de objetos que deben gestionarse dentro de la escena.

Además, mantener agrupaciones lógicas facilita posteriormente la asignación de materiales y la manipulación de los distintos componentes del modelo dentro del entorno de desarrollo.

Posteriormente, el archivo resultante fue importado dentro del entorno de Unreal Engine 5, donde se realizó el proceso de configuración de los materiales y de ajuste de las propiedades visuales del modelo. Dentro de Unreal Engine, cada una de las mallas que componen el modelo puede asociarse a uno o varios materiales, que son los responsables de definir la apariencia visual de la superficie del objeto. Los materiales determinan aspectos como el color, el nivel de brillo, las normales, la reflexión de la luz o la textura visible en la superficie del modelo. En este proyecto, el proceso de asignación de materiales se realizó de forma individual para cada uno de los elementos importados, revisando progresivamente cada parte de la lancha para asignarle el material correspondiente. En la mayoría de los casos se optó por utilizar materiales relativamente genéricos, especialmente en aquellas partes del modelo donde no era necesario representar un detalle visual muy específico. El uso de materiales simples permite acelerar el proceso de desarrollo y evitar dedicar demasiado tiempo a la creación de texturas complejas en zonas donde el usuario del simulador no va a centrar especialmente su atención. Por ejemplo, muchas superficies estructurales de la embarcación, como partes de la cubierta o paneles exteriores, pueden representarse adecuadamente mediante materiales básicos que simulan superficies pintadas o metálicas. No obstante, hubo determinados elementos del modelo que requerían un tratamiento visual más específico, ya que forman parte de detalles reconocibles dentro de la embarcación o contienen información visual concreta. En estos casos fue necesario crear texturas personalizadas diseñadas específicamente para representar estos elementos de forma más realista. Para la elaboración

de estas texturas se utilizó el software de edición gráfica Paint.net, que permite crear y modificar imágenes digitales con gran precisión.

Un ejemplo claro de este tipo de trabajo se encuentra en el caso de las ventanas de la embarcación. En lugar de aplicar simplemente un material transparente genérico, se decidió añadir ciertos detalles visuales que aportan mayor sensación de realismo.

En particular, se crearon texturas que incorporan marcas de suciedad en los contornos, restos de agua o pequeñas irregularidades en el cristal, elementos que son habituales en ventanas expuestas al entorno marino.

Este tipo de detalles, aunque sutiles, contribuyen a que el modelo resulte más creíble cuando se observa desde determinadas posiciones dentro del simulador. De manera similar, fue necesario crear texturas específicas para representar distintos carteles y señalizaciones presentes en la embarcación.

Entre estos elementos se encuentran, por ejemplo, los carteles de seguridad asociados a equipos como los extintores, que en una embarcación real suelen ir acompañados de señalizaciones visibles para facilitar su localización.

En estos casos se diseñaron texturas bidimensionales que posteriormente se aplicaron sobre superficies planas dentro del modelo, reproduciendo de este modo visualmente todos los elementos informativos.

Otro caso similar corresponde a símbolos identificativos o elementos decorativos, como el emblema de la Escuela Naval Militar presente en determinadas superficies del interior de la embarcación o el nombre de la lancha situado en la zona de popa. Estos elementos se generaron también mediante texturas retocadas a partir de imágenes de internet y posteriormente aplicadas como parte de los materiales dentro del motor gráfico.

Además de estos ejemplos, también fue necesario crear texturas para representar pantallas e instrumentos del puente de mando. En el caso de ciertos equipos de navegación, como el radar, se diseñaron imágenes que simulan la apariencia de la pantalla del instrumento.

Estas texturas se aplicaron posteriormente sobre superficies planas dentro del modelo, creando la impresión de que los instrumentos están activos dentro del entorno virtual. Un procedimiento similar se empleó para representar elementos como el disco de la giroscópica, donde la textura reproduce la apariencia característica de este tipo de instrumento.

En todos estos casos en que se empleaban materiales realizados mediante texturas propias, se debía realizar también un pequeño proceso intermedio, pero no menos importante, el desplegado de la malla sobre dicha textura en blender, conocido como “unwrap.”

El uso combinado de materiales genéricos y texturas personalizadas permitió lograr un equilibrio adecuado entre velocidad de desarrollo y calidad visual. En aquellas zonas donde el detalle visual no era crítico se utilizaron materiales simples que facilitaban un flujo de trabajo más rápido, mientras que en elementos concretos se invirtió un mayor esfuerzo para crear texturas específicas que aportasen mayor realismo al conjunto.

En conjunto, esta fase del proyecto permitió transformar el modelo tridimensional previamente creado en Blender en un conjunto de mallas y materiales plenamente integrados dentro del motor gráfico, preparados para ser utilizados en el entorno de simulación.

La correcta organización de los objetos y la asignación adecuada de materiales constituyen pasos esenciales para que el modelo funcione correctamente dentro del simulador y para garantizar que su apariencia visual resulte coherente durante la interacción del usuario con el entorno virtual (véase la Figura 3-7, versión final del modelo: v1.0.1).



Figura 3-7 Versión 1.0.1 en Unreal (Elaboración propia)

3.3 Fase de programación

3.3.1 Introducción a la programación por Blueprints en Unreal

Una vez finalizadas las fases principales de modelado e integración del modelo tridimensional dentro del motor gráfico, se dio comienzo a la fase de programación del simulador, que constituye uno de los apartados más importantes dentro del desarrollo del proyecto. Esta fase fue llevada a cabo dentro del entorno de Unreal Engine 5, utilizando principalmente el sistema de programación visual conocido como Blueprints. El sistema de Blueprints es una herramienta integrada en Unreal Engine que permite desarrollar lógica de programación mediante nodos visuales conectados entre sí en lugar de utilizar código de texto. Cada nodo representa una acción, función o evento dentro del programa y mediante la conexión de estos nodos es posible construir sistemas complejos de comportamiento para los distintos elementos del entorno virtual. Este sistema resulta especialmente útil para el desarrollo rápido de prototipos y para la implementación de mecánicas de simulación, ya que permite visualizar de forma clara el flujo de ejecución de las distintas operaciones.

En el caso de este proyecto, la decisión de utilizar Blueprints como herramienta principal de programación se debió principalmente a que el desarrollador contaba con experiencia previa trabajando con este sistema, lo que permitía implementar las distintas funcionalidades del simulador de forma más ágil y eficiente. Además, para el tipo de simulación física que se pretendía desarrollar, el sistema de Blueprints ofrece acceso directo a numerosas funciones relacionadas con la física de los objetos dentro del motor gráfico.

Entre los nodos más importantes utilizados para implementar el comportamiento dinámico de la lancha se encuentran varias funciones relacionadas con la aplicación de fuerzas e impulsos físicos sobre los objetos del entorno.

Estas funciones permiten simular el efecto de motores, fuerzas externas o cambios bruscos de movimiento sobre un objeto que esté sujeto al sistema de físicas del motor.

3.3.2 Principales nodos empleados

En particular, los nodos más relevantes utilizados durante el desarrollo del simulador fueron Add Force, Add Torque, Add Impulse y Add Angular Impulse.

El nodo Add Force (Figura 3-8) se utiliza para aplicar una fuerza continua sobre un objeto físico dentro del motor de simulación, esta fuerza se aplica durante cada actualización del sistema de físicas mientras el nodo se esté ejecutando lo que produce una aceleración progresiva del objeto en la dirección de la fuerza aplicada.

En el contexto de la simulación de la lancha, este nodo resulta especialmente útil para representar la fuerza generada por los motores durante la propulsión, ya que empujan la embarcación hacia adelante cuando el usuario aumenta la potencia

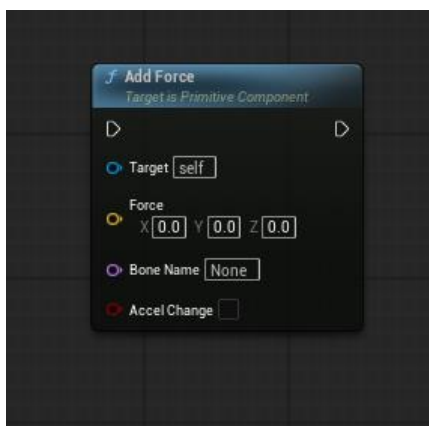


Figura 3-8 Blueprint Add Force (Elaboración propia)

Al aplicar una fuerza constante en la dirección de avance del barco, el sistema físico del motor calcula automáticamente la aceleración resultante teniendo en cuenta factores como la masa del objeto o la resistencia del movimiento.

El nodo Add Torque (Figura 3-9) funciona de manera similar al anterior, pero en lugar de generar un desplazamiento lineal produce una fuerza rotacional continua alrededor de un eje determinado.

En otras palabras, mientras que Add Force hace que un objeto se desplace en línea recta, Add Torque provoca que el objeto tienda a rotar de manera progresiva. Este tipo de fuerza puede emplearse, por ejemplo, para representar ciertas influencias externas que afectan a la orientación del barco, como es el efecto del viento o determinadas fuerzas hidrodinámicas que pueden provocar ligeras rotaciones del casco. Dentro de la simulación de la lancha, el uso de torque resulta especialmente útil para simular las maniobras de giro del barco, que se producen cuando el usuario actúa sobre el timón o modifica la dirección de empuje del sistema de propulsión.

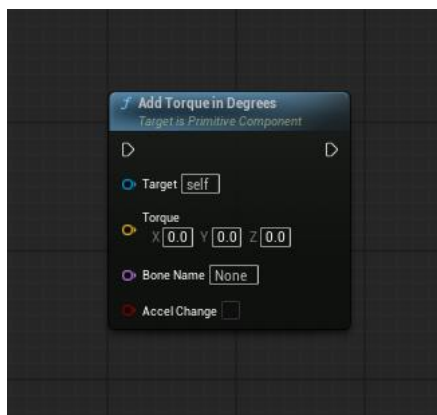


Figura 3-9 Blueprint Add Torque (Elaboración propia)

Al aplicar torque alrededor del eje vertical del barco, se consigue que la embarcación cambie gradualmente su rumbo, reproduciendo el comportamiento real de una embarcación durante una maniobra de giro o empuje asimétrico en sus ejes.

Por otro lado, el nodo Add Impulse (Figura 3-10) se utiliza para aplicar una fuerza instantánea sobre un objeto físico.

A diferencia de Add Force que produce una aceleración gradual mientras la fuerza se mantiene activa, Add Impulse aplica una cantidad determinada de energía de forma inmediata en un único instante.

Esto provoca un cambio brusco en la velocidad del objeto. Este tipo de nodo resulta útil para representar eventos puntuales que generan una reacción inmediata en el sistema físico. En el contexto de una simulación naval, podría utilizarse para representar impactos, cambios rápidos de velocidad o cualquier otro fenómeno que implique una transferencia instantánea de energía al objeto.

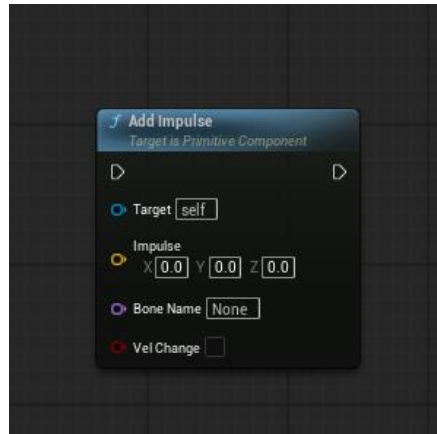


Figura 3-10 Blueprint Add Impulse (Elaboración propia)

Finalmente, el nodo Add Angular Impulse (Figura 3-11) es el equivalente rotacional del impulso lineal anterior. En lugar de generar un desplazamiento lineal instantáneo, este nodo produce un cambio inmediato en la velocidad angular del objeto, es decir, provoca un giro brusco en torno a uno o varios ejes.

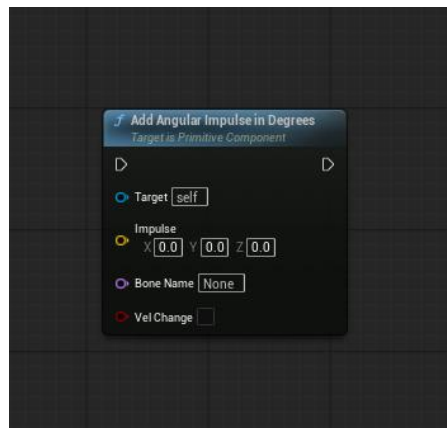


Figura 3-11 Blueprint Add Angular Impulse (Elaboración propia)

Este tipo de impulso rotacional puede utilizarse para simular situaciones en las que el barco experimenta una variación rápida en su orientación, ya sea debido a una interacción externa o a un evento específico dentro de la simulación.

La combinación de todos estos nodos permite construir un sistema de comportamiento físico relativamente completo dentro del simulador. Mediante la aplicación controlada de fuerzas lineales, momentos de rotación e impulsos instantáneos, es posible reproducir el movimiento de la embarcación de forma coherente con los principios básicos de la física.

Además, el motor físico integrado en Unreal Engine 5 se encarga de calcular automáticamente aspectos como la inercia, la aceleración resultante o la interacción entre fuerzas, lo que facilita considerablemente la implementación del sistema de movimiento de la lancha.

En conjunto, el uso de Blueprints y de estas funciones físicas permitió desarrollar un sistema de control de la embarcación que reproduce de forma razonablemente realista el comportamiento dinámico de una lancha dentro del entorno virtual, sentando las bases para la posterior implementación de los distintos ejercicios de navegación que forman parte del simulador.

3.3.3 Programación de las físicas iniciales

En lo relativo al desarrollo del sistema de físicas del simulador, se decidió tomar como punto de partida los principios básicos que rigen el comportamiento dinámico de una embarcación real de dimensiones similares a la lancha empleada como referencia en este proyecto. El objetivo no era únicamente que el modelo tridimensional de la embarcación se desplazase dentro del entorno virtual, sino que lo hiciese de una forma adecuada. Para ello fue necesario implementar un conjunto de fuerzas y momentos que reprodujesen, al menos de forma aproximada al principio, los principales fenómenos físicos que afectan al movimiento de una embarcación sobre la superficie del agua.

En una embarcación real intervienen numerosos factores físicos que influyen en su comportamiento: la fuerza de propulsión generada por los motores, la resistencia del agua al avance, la inercia asociada a la masa del buque, las fuerzas laterales que aparecen durante las maniobras de giro y por tanto los respectivos momentos, así como las posibles influencias externas como el viento o las corrientes. Aunque un simulador desarrollado en un motor gráfico no reproduce todos estos fenómenos con el mismo nivel de detalle que un modelo hidrodinámico especializado, sí es posible aproximar su comportamiento mediante la aplicación controlada de fuerzas y momentos dentro del sistema físico del motor obteniendo un resultado muy aproximado a lo real.

Partiendo de esta idea, la primera etapa dentro del desarrollo de las físicas consistió en implementar un modelo inicial simplificado de movimiento en el que se definieron las fuerzas básicas que actúan sobre la embarcación.

Estas fuerzas incluían principalmente la fuerza de avance y de torque generadas por la propulsión de cada eje, las fuerzas que provocan el giro del barco al actuar sobre el timón o el sistema de gobierno, y ciertos factores de amortiguamiento que simulan la resistencia que el agua ejerce sobre el casco y otras dos fuerzas con sus torques que simulan la corriente y el abatimiento. Este primer modelo permitió obtener un comportamiento preliminar del barco dentro del simulador, lo que sirvió como base para posteriores ajustes ahora ya sí, específicos de la lancha Rodman 66 y no genéricos.

Una vez implementado este sistema inicial, se realizaron numerosas pruebas para comprobar que el comportamiento general de la embarcación dentro del simulador resultaba razonablemente coherente con el de una lancha real.

3.3.3.1 Programación de las físicas coherentes a la lancha real

Tras la fase anterior se evaluaron aspectos como la aceleración del barco al aplicar potencia, la forma en la que respondía al timón durante las maniobras de giro, o la tendencia del barco a mantener su movimiento debido a la inercia una vez que se reducían las fuerzas de propulsión. Estas primeras pruebas permitieron confirmar que el sistema de físicas respondía de forma estable y que el comportamiento general de la embarcación era plausible dentro del entorno de simulación.

Sin embargo, para alcanzar un nivel mayor de realismo, no era suficiente con que el movimiento del barco fuese simplemente creíble. Era necesario que la evolución de la embarcación durante las maniobras coincidiese lo más posible con los datos obtenidos en condiciones reales. Para ello se decidió utilizar como referencia una serie de curvas de evolución reales tomadas a bordo de una lancha real, la GM Barrutia con la que salimos a la mar. De este modo pudimos anotar al detalle cómo cambia la

trayectoria de la embarcación cuando se realiza una maniobra de giro bajo determinadas condiciones, así como aceleraciones, paradas y pruebas al dar atrás.

Las curvas de evolución son una herramienta habitual en el ámbito de la navegación y del estudio de la maniobrabilidad de los buques.

Estas curvas describen la trayectoria que sigue una embarcación cuando se aplica un determinado ángulo de timón manteniendo una velocidad constante. A partir de estas curvas es posible analizar parámetros importantes como el radio de giro, el avance, el traslado o la capacidad de respuesta del buque durante una maniobra.

Durante el desarrollo de este proyecto, dichas curvas fueron obtenidas directamente a bordo de la lancha real, registrando la trayectoria seguida por la embarcación durante diversas maniobras de evolución. Los resultados de estas mediciones se presentan a continuación en forma de gráficas en función de la velocidad y el ángulo de caña.

Estas gráficas constituyeron la referencia fundamental para poder ajustar el comportamiento del modelo simulado.

Una vez disponibles estos datos reales se procedió a realizar un proceso de calibración del sistema de físicas del simulador. Este proceso consistió en ajustar de forma progresiva las distintas variables que controlan las fuerzas aplicadas sobre la embarcación dentro del motor gráfico. Entre estos parámetros se encontraban, por ejemplo, la intensidad de la fuerza de propulsión, los valores asociados al torque que genera el giro del barco, o los coeficientes que simulan la resistencia al movimiento o al giro de la embarcación.

El procedimiento seguido durante esta fase fue esencialmente de comparación. En primer lugar, se realizaba una maniobra de evolución dentro del simulador bajo condiciones similares a las de las pruebas reales. A continuación, se registraba la trayectoria obtenida por la embarcación virtual y se comparaba con la curva de evolución correspondiente obtenida en la lancha real. Si se observaban diferencias significativas entre ambas trayectorias, se procedía a ir modificando ligeramente los parámetros físicos del simulador para intentar reducir dicha diferencia.

Este proceso de comparación y ajuste se repitió numerosas veces, modificando pequeños valores en las fuerzas aplicadas hasta conseguir que las curvas obtenidas en la simulación se aproximasen lo máximo posible a las curvas reales. Era necesario tener siempre precaución en el orden de las variables a corregir, ya que corregir el rozamiento por ejemplo para que la lancha frenase en menos distancia, hacía también que las velocidades disminuyesen, motivo por el cual se debía ajustar primero la resistencia y después la fuerza de los ejes y no al contrario.

En muchas ocasiones los ajustes necesarios eran relativamente pequeños, pero incluso variaciones aparentemente mínimas en los parámetros físicos podían producir cambios apreciables en la trayectoria de la embarcación durante una maniobra.

Debido a la naturaleza de este procedimiento, esta fase del proyecto resultó ser particularmente exigente en términos de tiempo y dedicación. Cada modificación de los parámetros requería volver a ejecutar la simulación, realizar nuevamente la maniobra correspondiente y comparar el resultado con los datos de referencia. Este proceso debía repetirse tantas veces como fuese necesario hasta alcanzar un comportamiento satisfactorio. El objetivo final era que al reproducir dentro del simulador una maniobra equivalente a la realizada en la lancha real, la trayectoria obtenida coincidiese de forma lo más aproximada posible con la curva de evolución real, llegando incluso a emplear planos con la textura de la propia curva sobre el agua del simulador para ir comprobando a tiempo real si la lancha se salía o se mantenía sobre dicha curva. Cuando este requisito se cumplía de manera consistente en distintas pruebas, se podía considerar que el modelo físico del simulador reproducía de forma adecuada el comportamiento dinámico de la embarcación.

Esta etapa de ajuste fino de las físicas representó, sin duda, la segunda parte más laboriosa de todo el proyecto, por detrás del proceso inicial de modelado tridimensional.

No obstante, también fue una de las fases más importantes, ya que permitió garantizar que el simulador no solo presentase una apariencia visual adecuada, sino que además ofreciese un comportamiento dinámico coherente con el de una embarcación real, lo cual constituye un aspecto fundamental para la utilidad del simulador como herramienta de entrenamiento o aprendizaje.

3.3.3.2 Maniobras avanzadas de gobierno de la embarcación

El simulador permite la realización de maniobras avanzadas de gobierno como la ciaboga, avanzar en diagonales y navegación en marcha atrás, lo cual supone un paso importante en la fidelidad del comportamiento de la embarcación. Estas maniobras no se han implementado como acciones predefinidas o automatizadas, sino que son el resultado directo de la interacción del usuario con el sistema de físicas, lo que implica que deben ejecutarse mediante el uso correcto del timón y de los ejes de propulsión. La ciaboga, entendida como la maniobra de giro cerrado de la embarcación sobre sí misma o en un espacio reducido, puede realizarse empleando una adecuada gestión diferencial de los motores de babor y estribor. Al aplicar diferentes revoluciones en cada eje, el usuario puede generar un momento de giro que permite a la embarcación rotar de forma controlada, llegando a su extremo cuando uno de los ejes da adelante y el otro atrás permitiéndonos rotar prácticamente en el sitio, reproduciendo así el comportamiento real de este tipo de maniobra.

Por otro lado, el simulador también permite avanzar en diagonales, efecto que se produce también en la lancha real cuando se pone uno de los ejes en adelante mientras el otro está parado o en atrás, y se emplean a su vez los grados de timón necesarios hacia la banda del eje que da adelante con el fin de que la proa permanezca a rumbo fijo. Este efecto produce en la embarcación una componente lateral significativa durante el movimiento, generalmente debido a una combinación de inercia, ángulo de timón y acción de los motores que se oponen al torque del timón en avance neutralizando cualquier giro pero generando una fuerza lateral además de la propia del avance. Esto hace que la embarcación se desplace en diagonal y no solo de frente. Este tipo de comportamiento es especialmente útil en maniobras dinámicas o en situaciones donde se requiere modificar rápidamente la posición lateral del barco sin variar el rumbo de la proa.

En cuanto a la marcha atrás, esta se ha implementado mediante la posibilidad de aplicar revoluciones negativas a los motores, lo que permite invertir el sentido de empuje de la embarcación. Este modo de operación resulta fundamental en maniobras de precisión, como aproximaciones, correcciones de posición o detenciones controladas. Al igual que en el caso de la navegación hacia adelante, el comportamiento en marcha atrás depende de la combinación de los ejes y del timón, lo que introduce una complejidad adicional que el usuario debe aprender a gestionar.

Es importante destacar que estas maniobras no han sido diseñadas de forma arbitraria, sino que su comportamiento ha sido ajustado en todo momento tomando como referencia pruebas realizadas a bordo de una lancha real. Durante el desarrollo del proyecto, se observaron y registraron estas maniobras en condiciones reales, lo que permitió obtener una base sobre la que calibrar el comportamiento del simulador. Posteriormente, se ajustaron los parámetros del sistema de físicas para que las reacciones de la embarcación virtual se aproximasen lo máximo posible a las observadas en la realidad. Este proceso de validación contribuye a que el simulador no solo permita realizar estas maniobras, sino que lo haga de una manera adecuada al comportamiento real de la embarcación, lo cual es especialmente importante en un entorno de entrenamiento. El usuario no aprende únicamente a ejecutar una acción dentro del simulador, sino que adquiere una comprensión más profunda de cómo responde una lancha ante distintas combinaciones de mandos.

En conjunto, la posibilidad de realizar ciabogas, avances en diagonal y maniobras en marcha atrás refuerza el carácter avanzado del sistema de físicas implementado, permitiendo al usuario explorar y

practicar técnicas de gobierno que forman parte de la navegación real y que resultan fundamentales en situaciones operativas complejas.

3.3.3.3 Comportamiento dinámico: balanceo en función de la velocidad

El simulador incorpora un comportamiento dinámico de la embarcación que tiene en cuenta el balanceo en función de la velocidad, con el objetivo de reproducir de forma coherente cómo se comporta una lancha real frente a la acción del mar y del viento.

Este aspecto, aunque pueda parecer secundario, resulta importante para la sensación de realismo e inmersión, ya que el movimiento del barco transmite al usuario información constante sobre su estado y las condiciones del entorno.

Cuando la embarcación se encuentra parada o a muy baja velocidad, el simulador reproduce un movimiento más irregular y caótico, caracterizado por un balanceo lateral más evidente. En estas condiciones, la lancha se ve más afectada por la mar de viento, es decir, por el oleaje generado por el propio viento en superficie. Este tipo de movimiento es más aleatorio, ya que la embarcación no tiene una dirección predominante de avance que establezca su comportamiento, y por tanto responde de forma más libre a las perturbaciones del entorno.

A medida que la embarcación comienza a ganar velocidad, este comportamiento cambia de forma progresiva. El avance genera un efecto de estabilización dinámica, reduciendo la influencia del balanceo lateral desordenado y dando lugar a un movimiento más estructurado.

En estas condiciones, el movimiento predominante pasa a ser la cabezada, es decir, el desplazamiento oscilatorio en el eje longitudinal de la embarcación (proa-popa), más alineado con la dirección de avance.

Este cambio en el patrón de movimiento refleja un comportamiento real de las embarcaciones, donde el avance tiende a ordenar la interacción con el mar de viento, haciendo que el movimiento resulte más predecible y menos errático que en situación de parada. En el simulador, este efecto se ha implementado ajustando la respuesta de la embarcación en función de su velocidad, de manera que el usuario pueda percibir claramente esta transición.

Desde el punto de vista de la experiencia, este detalle aporta una sensación más auténtica de navegación, ya que el usuario puede notar cómo el comportamiento del barco cambia al pasar de estar detenido a navegar a distintas velocidades, dando pantocazos y levantando agua con efectos de partículas en la simulación. Además, este tipo de feedback visual y dinámico contribuye a mejorar la interpretación del estado de la embarcación, permitiendo intuir si la embarcación propia o una externa se encuentra en reposo, en aceleración o en navegación estable.

En conjunto, la inclusión de este comportamiento variable del balanceo refuerza la coherencia del sistema de físicas del simulador, aportando un nivel adicional de realismo que, aunque no es estrictamente necesario para la ejecución de los ejercicios, sí mejora de forma notable la calidad de la experiencia de usuario.

3.3.3.4 Uso de delta seconds en la simulación

El uso de los delta seconds constituye un aspecto fundamental dentro del desarrollo de cualquier sistema que involucre físicas y movimiento en tiempo real, como es el caso de este simulador. En el entorno de Unreal Engine 5, el valor de *delta seconds* representa el tiempo transcurrido entre un frame y el siguiente, es decir, cuánto tiempo real ha pasado entre dos actualizaciones consecutivas del motor.

La importancia de este concepto consiste en que en un sistema interactivo, la ejecución del programa no ocurre a una velocidad fija, sino que depende del rendimiento del equipo y de la carga de trabajo en cada momento. Esto significa que el número de frames por segundo (FPS) puede variar y por tanto, el tiempo entre frames también lo hace.

Si no se tuviera en cuenta este factor, cualquier cálculo relacionado con el movimiento o las físicas dependería directamente de los FPS, generando comportamientos inconsistentes.

Por ejemplo, si se aplicase una fuerza constante o se modificase la posición de un objeto sin tener en cuenta los delta seconds, el resultado sería que el movimiento sería más rápido en equipos con mayor tasa de frames y más lento en aquellos con menor rendimiento. Esto haría que la simulación no fuese fiable, ya que el comportamiento de la embarcación cambiaría en función del hardware y no de los parámetros físicos definidos. Para evitar este problema, todas las operaciones relacionadas con el movimiento, como la aplicación de impulsos, velocidades o rotaciones, se escalan utilizando el valor de delta seconds. De esta manera, se consigue que el comportamiento del sistema sea independiente del número de frames por segundo, garantizando que la simulación evoluciona correctamente en función del tiempo real y no del número de actualizaciones del motor.

En el caso concreto de este simulador, el uso de delta seconds resulta especialmente importante en la implementación de las físicas de la embarcación. Fuerzas como ciertos efectos en la propulsión, el torque de giro o el efecto del viento deben aplicarse de forma coherente a lo largo del tiempo, independientemente de la fluidez de la ejecución. Gracias al uso de delta seconds, se asegura que la aceleración, la velocidad y el comportamiento general de la lancha sean consistentes en todas las condiciones.

Además, este concepto también se aplica a otros elementos dinámicos del simulador, como el movimiento de objetos flotantes, la evolución de la estela o incluso ciertos efectos visuales. En todos estos casos, el uso de delta seconds permite mantener una simulación estable, predecible y físicamente coherente. Por supuesto hay blueprints como Add Force en los que no es necesario emplearlo pero hay otras situaciones más puntuales como en Add Impulse en las que sí lo es.

En definitiva, los delta seconds son un elemento clave para garantizar que el simulador funcione correctamente desde el punto de vista físico, evitando dependencias del rendimiento del sistema y asegurando que todos los cálculos se realizan en función del tiempo real. Sin su uso, no sería posible obtener un comportamiento fiable ni reproducible en un entorno con físicas como el desarrollado en este proyecto.

3.4 Fase de creación de entorno

3.4.1 Introducción a la creación de entornos

Una vez que el comportamiento básico de la lancha dentro del motor físico resultaba estable y era posible gobernarla controlada por el usuario desde su interior, se abordó la fase de construcción del entorno de navegación, ya que un simulador de este tipo no puede limitarse únicamente a representar la embarcación: también necesita un espacio geográfico en el que el usuario pueda orientarse, maniobrar y ejecutar ejercicios con referencias realistas. Para ello se decidió implementar un escenario basado en cartografía real, combinando un sistema de representación de costa, un sistema de agua (mar) y un sistema de iluminación atmosférica (cielo, nubes y bruma) que aportasen coherencia visual y funcional a la simulación.

3.4.2 Mapa de la costa, Cesium

En primer lugar, se integró Cesium como base para el mapa de costa. Este tipo de herramienta permite trabajar con georreferenciación y datos del mundo real, facilitando la construcción de escenarios que mantienen una relación directa con coordenadas reales de latitud y longitud. En un simulador de navegación, esto supone una ventaja importante ya que el usuario puede interpretar el entorno como un espacio realista con una costa y una distribución geográfica real, en lugar de un mapa genérico o inventado.

Además, al trabajar con Cesium, el entorno queda vinculado a un sistema de coordenadas geográficas, lo cual resulta especialmente útil cuando se pretende implementar funcionalidades relacionadas con posicionamiento o navegación basada en coordenadas reales.

En cuanto a la parte atmosférica, se implementaron el cielo y las nubes utilizando los assets por defecto de Unreal Engine 5, que proporcionan un sistema de iluminación y cielo suficientemente robusto para el propósito del simulador. Estos assets permiten simular condiciones de luz natural, cielo dinámico y un entorno visual creíble sin necesidad de dedicar una fase extensa al desarrollo de shaders o sistemas atmosféricos personalizados.

Esta decisión, al igual que otras tomadas durante el desarrollo del proyecto, responde a un criterio de eficiencia, se buscó utilizar herramientas ya disponibles en el motor para poder centrar el tiempo de desarrollo en los aspectos realmente críticos del simulador.

3.4.3 Introducción a la implementación de colisiones

Una vez construido el escenario general, se abordó un problema fundamental desde el punto de vista del entrenamiento: en un entorno real, una embarcación no puede navegar libremente por cualquier punto sin restricciones, ya que existen limitaciones físicas relacionadas con la profundidad disponible y la presencia de bajos o zonas someras.

Como en el simulador no se dispone necesariamente de un modelo batimétrico completo con interacción física realista, se implementó una solución práctica para simular el efecto de encallar o colisionar con tierra.

Para ello, se decidió limitar el mapa mediante colisiones ubicadas cerca de la costa y en zonas de bajo fondo. Estas colisiones se colocaron de manera que coincidiesen con la zona donde, según la carta náutica, la sonda es inferior a cinco metros.

Es decir, se interpretó que cualquier región con una profundidad de cinco metros o menos representa una zona peligrosa para la navegación de la lancha dentro del contexto del ejercicio. De esta forma, si durante la simulación la embarcación se aproxima a un área que corresponde a esa batimetría reducida, el sistema lo considera equivalente a una colisión con tierra o una varada. Esta decisión aporta un comportamiento muy útil para la dinámica del simulador: se establece una frontera clara entre zona navegable y zona no navegable, evitando que el usuario pueda atravesar tierra firme o “subirse” a la costa sin consecuencias. El sistema implementado provoca que, cuando se detecta la colisión con estas zonas, el ejercicio se detenga automáticamente, simulando el hecho de que la embarcación ha quedado incapacitada para continuar debido a una varada o impacto. Esto, además, introduce un componente de realismo operativo: obliga al usuario a prestar atención al entorno, a las proximidades de la costa y, en general, a mantener un criterio de seguridad en la navegación dentro del escenario.

Es importante remarcar que este efecto no se aplica únicamente a la línea de costa visible, sino también a zonas de bajos aislados, que en un entorno real pueden ser incluso más peligrosos, ya que no siempre son evidentes a simple vista. Al extender el sistema de colisiones a estas áreas, se consigue que el simulador reproduzca de forma básica el riesgo asociado a navegar sobre zonas someras, reforzando la lógica de entrenamiento.

Además del control de colisiones con el terreno, también se implementó un sistema de colisión entre embarcaciones.

Dentro del escenario se incluyeron otros barcos, y cada uno de ellos cuenta con su propio collider, es decir, un volumen de colisión asociado a su malla o a una geometría simplificada que representa su presencia física en el entorno (véase la Figura 3-12). De este modo, si la lancha del usuario impacta contra cualquier otra embarcación durante un ejercicio, el simulador detecta la colisión y detiene inmediatamente la ejecución del ejercicio, interpretando el evento como un accidente o fallo crítico.

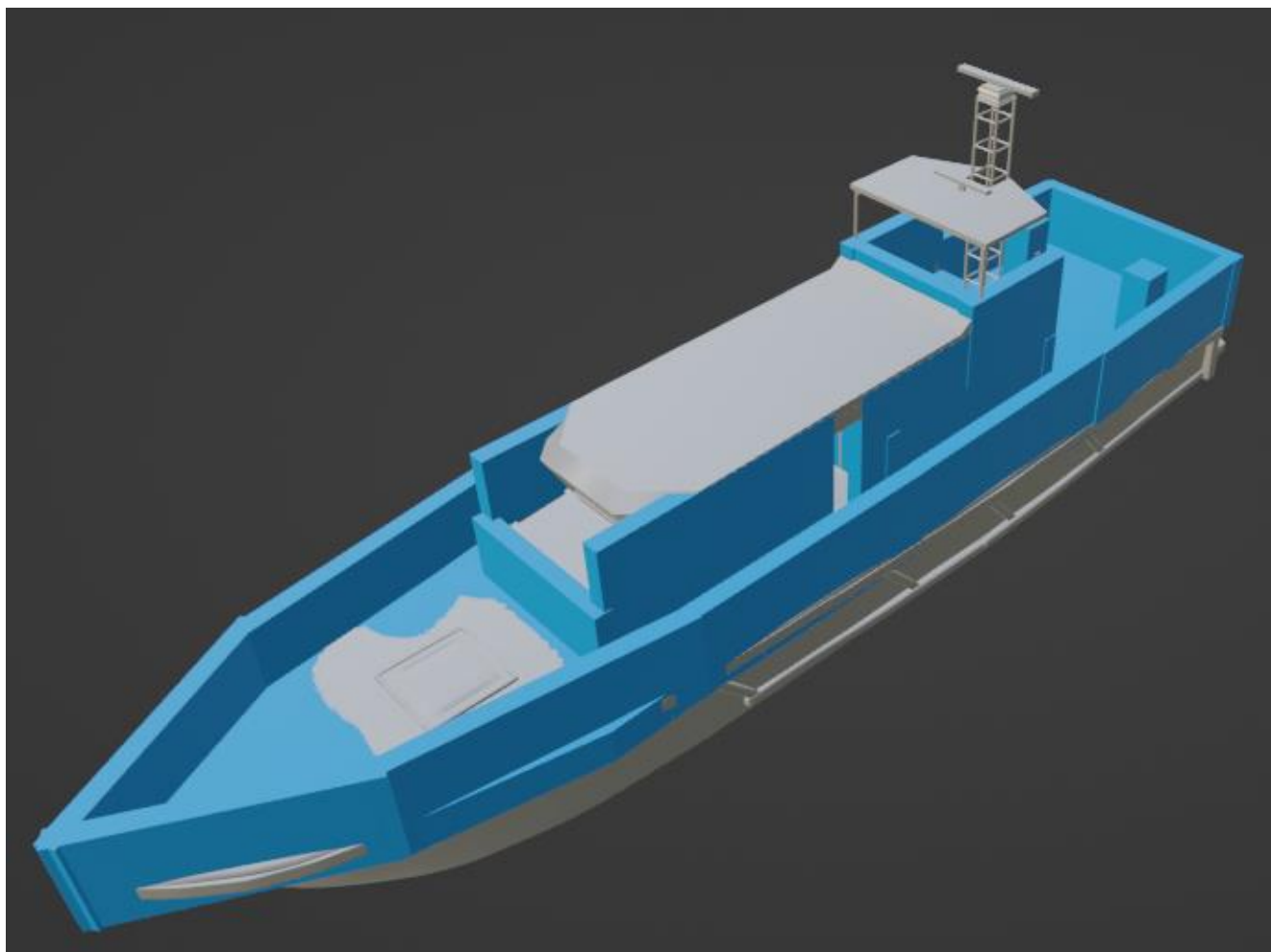


Figura 3-12 Colisiones de la lancha (Elaboración propia)

Esta implementación resulta especialmente útil en ejercicios donde se requiere mantener separación con otras embarcaciones o ejecutar maniobras cercanas, ya que introduce una consecuencia clara ante una mala maniobra.

3.4.4 Sistema de coordenadas locales a GPS

El desarrollo del sistema de coordenadas dentro del simulador supuso un aspecto fundamental para garantizar la coherencia entre el entorno virtual y la navegación real. Esto se debe a que el motor gráfico utilizado, Unreal Engine 5, trabaja de forma nativa con un sistema de coordenadas locales cartesianas, donde las posiciones se expresan en centímetros dentro de un espacio tridimensional definido por ejes X, Y y Z.

Sin embargo, en el ámbito de la navegación marítima, las posiciones se expresan mediante coordenadas geográficas, es decir, latitud y longitud, lo que obligó a establecer un mecanismo de conversión entre ambos sistemas.

En una primera aproximación, se planteó la posibilidad de implementar manualmente estas conversiones utilizando fórmulas clásicas de navegación. Por ejemplo, se consideró el uso de la relación aproximada según la cual un minuto de latitud equivale a una milla náutica, lo que puede expresarse como aproximadamente 111 kilómetros por grado de latitud. De forma similar, para la longitud se tendría en cuenta la variación en función de la latitud, aplicando el correspondiente factor de corrección. Este enfoque permitía, en teoría, transformar desplazamientos en el espacio del simulador en variaciones de coordenadas geográficas mediante cálculos relativamente sencillos.

No obstante, durante el desarrollo se comprobó que este método, aunque válido desde un punto de vista teórico, presentaba ciertas limitaciones prácticas dentro del entorno del simulador. En particular, requería definir con precisión un punto de referencia inicial, gestionar correctamente las escalas y mantener la coherencia con la representación del mapa, además acumulaba error en función de la distancia y por tanto hacia poco escalable el proyecto a otros mapas a futuro.

Ante esta situación, se optó finalmente por aprovechar las funcionalidades proporcionadas por el propio plugin de Cesium, que ya había sido integrado previamente como base del entorno geográfico del simulador. Cesium incluye un sistema propio de georreferenciación, así como una serie de herramientas accesibles mediante Blueprints, que permiten realizar de forma directa la conversión entre coordenadas del mundo virtual y coordenadas geográficas reales.

Gracias a este sistema, fue posible implementar una solución más robusta y precisa, en la que las posiciones dentro del entorno de Unreal Engine se traducen automáticamente a valores de latitud y longitud coherentes con la malla del mapa.

Esto elimina la necesidad de realizar cálculos manuales y garantiza que todas las posiciones del simulador estén correctamente alineadas con el sistema geográfico sobre el que se basa el escenario.

3.4.5 Conclusiones sobre la creación de entorno

En definitiva, la integración de Cesium, el sistema de mar, la atmósfera y los mecanismos de colisión y georreferenciación permitieron construir un escenario de simulación completo, funcional y coherente, sobre el cual se desarrollarían posteriormente los ejercicios de instrucción.

Esta herramienta pese a tener la desventaja de depender de internet para poder cargar la costa, cuenta a su vez con dos grandes ventajas. La primera es que la costa no tiene por qué limitarse exclusivamente a la Ría de Pontevedra, su compartición de datos con Google Maps hace especialmente sencillo implementar nuevas costas de cualquier lugar del mundo en escasos días de trabajo. Por otro lado, al depender de internet, no es necesario tener descargados gigas y gigas de datos de mallas costeras, una simple conexión a internet permite al simulador contar con el mundo entero en apenas espacio en el disco duro.

3.5 Fase de ejercicios

3.5.1 Introducción a la fase de ejercicios

Una vez que el comportamiento dinámico de la lancha dentro del simulador se había ajustado de forma satisfactoria y el entorno de navegación estaba completamente implementado, se alcanzó una fase del desarrollo en la que la embarcación podía desplazarse libremente por el escenario virtual respondiendo correctamente a los mandos y a las fuerzas físicas definidas previamente.

En este punto del proyecto se consideró que la base del simulador estaba suficientemente consolidada como para comenzar a implementar la siguiente etapa del desarrollo: la simulación de ejercicios de instrucción naval.

El objetivo de esta nueva fase era reproducir dentro del simulador algunas de las maniobras y ejercicios que se realizan habitualmente en el ámbito de la formación náutica, permitiendo que el usuario interactúe con el sistema y ejecute procedimientos similares a los que se llevarían a cabo a bordo de una embarcación real.

3.5.2 Ejercicio de “hombre al agua”

Entre los distintos ejercicios posibles, se decidió comenzar con la implementación del ejercicio de “hombre al agua”, ya que se trata de una de las maniobras más importantes desde el punto de vista de la seguridad marítima y constituye una práctica habitual en la formación naval de la Armada.

El ejercicio de hombre al agua consiste, de forma general, en recuperar a una persona que ha caído al mar, lo cual requiere realizar una serie de maniobras de gobierno que permitan volver rápidamente a la posición de la persona en el agua sin perder contacto visual con ella. Este tipo de maniobra exige tener en cuenta múltiples factores que afectan al movimiento relativo entre la embarcación y el objeto flotante que representa a la persona en el agua.

Por este motivo, para poder simular este ejercicio de forma mínimamente realista es necesario asegurarse de la correcta implementación de la influencia del viento sobre los objetos flotantes.

En el ámbito de la navegación, el viento genera un fenómeno conocido como abatimiento, que consiste en el desplazamiento lateral de una embarcación o de un objeto flotante debido a la acción del viento sobre las superficies expuestas.

Este efecto provoca que la trayectoria real del objeto no coincida exactamente con su rumbo teórico, ya que el viento ejerce una fuerza lateral que modifica progresivamente su posición. En embarcaciones reales, el abatimiento es un factor importante que debe tenerse en cuenta durante las maniobras, especialmente en situaciones de baja velocidad o cuando se intenta mantener una posición relativa respecto a otro objeto.

Para simular este fenómeno dentro del entorno desarrollado en Unreal Engine 5, se implementó un sistema de viento que actúa como fuerza lateral aplicada sobre los objetos flotantes presentes en la escena.

Este sistema se encarga de generar una componente de fuerza que empuja los objetos en función de la dirección e intensidad del viento definido en el escenario. De esta forma, tanto la lancha como otros objetos flotantes experimentan un desplazamiento lateral que modifica su trayectoria a lo largo del tiempo.

No obstante, es importante destacar que el abatimiento no afecta de la misma forma a todos los objetos, ya que la magnitud de la fuerza que ejerce el viento depende en gran medida de la superficie expuesta al mismo.

En términos náuticos, suele hablarse de la “vela” del objeto, es decir, la parte del objeto que sobresale del agua y sobre la cual puede incidir el viento.

Cuanto mayor sea esta superficie expuesta, mayor será la fuerza que el viento puede ejercer sobre el objeto y, por tanto, mayor será su tendencia a abatir. En el caso de la lancha, la superficie expuesta al viento está formada principalmente por la superestructura, el puente de mando y otras partes del casco que se encuentran por encima de la línea de flotación. Aunque esta superficie no es extremadamente grande, sí es suficiente para que el viento genere una ligera tendencia a desplazarse lateralmente durante la navegación. Este efecto se integró dentro del sistema de físicas mediante la aplicación de fuerzas laterales proporcionales a la intensidad y dirección del viento y a la superficie aproximada del barco expuesta al flujo de aire.

Por otro lado, el objeto que representa al hombre al agua presenta unas características completamente distintas. Una persona flotando en el agua tiene una superficie expuesta al viento mucho menor que la de una embarcación, ya que la mayor parte del cuerpo permanece sumergida y solo una pequeña fracción queda por encima de la superficie.

Como consecuencia, el abatimiento que experimenta este objeto es significativamente menor que el que experimenta una embarcación con una estructura elevada sobre el agua.

Para reproducir este comportamiento dentro del simulador, se establecieron coeficientes diferentes de influencia del viento para cada tipo de objeto flotante. De esta forma, el sistema físico aplica fuerzas distintas según el tipo de objeto al que se refiera. La lancha recibe una fuerza lateral mayor, mientras que el objeto que representa al naufrago recibe una fuerza considerablemente menor. Esto provoca que, con el paso del tiempo, la posición relativa entre ambos objetos cambie de forma natural, reproduciendo el efecto que se observaría en una situación real. Este aspecto resulta especialmente relevante para el

ejercicio de hombre al agua, ya que obliga al usuario a anticipar el movimiento relativo entre la embarcación y la persona en el agua. Si el viento está presente, el náufrago no permanecerá exactamente en el mismo punto donde cayó al agua, sino que tenderá a desplazarse lentamente en la dirección del viento. Del mismo modo, la propia lancha también experimentará un mayor abatimiento durante la maniobra, lo que introduce un grado adicional de complejidad en la recuperación, obligando al usuario a colocarse a barlovento para una correcta recuperación del náufrago.

La implementación de este sistema de viento y abatimiento permitió dotar al ejercicio de una mayor profundidad desde el punto de vista de la simulación ya que el usuario no solo debe preocuparse por dirigir la embarcación hacia la posición del náufrago, sino también por tener en cuenta cómo las condiciones ambientales pueden modificar la posición relativa entre ambos a lo largo del tiempo.

Este tipo de detalles contribuye a que la experiencia dentro del simulador resulte más cercana a la realidad y refuerza el valor del sistema como herramienta de entrenamiento o práctica de maniobras.

Además de implementar el efecto del viento sobre la dinámica de los objetos flotantes dentro del simulador, también se decidió incorporar un pequeño detalle visual que, aunque en un primer momento pueda parecer meramente estético, tiene en realidad una función práctica desde el punto de vista de la navegación.

Se trata de la simulación del movimiento de una bandera ondeando en la embarcación, elemento que en las lanchas reales suele emplearse como una referencia visual rápida para estimar la dirección del viento.

En muchas embarcaciones pequeñas y medianas, especialmente en aquellas que no disponen de instrumentos meteorológicos complejos o en situaciones en las que el navegante necesita obtener una referencia inmediata, la observación del comportamiento de una bandera o de cualquier elemento flexible expuesto al viento puede proporcionar información muy útil.

El movimiento de la tela indica de forma bastante clara la dirección desde la que incide el flujo de aire relativo, viento más velocidad, lo que permite al patrón o a la tripulación interpretar rápidamente cómo puede afectar el viento a la maniobra o a la navegación.

Por esta razón y por motivos de realismo visual y coherencia con toda embarcación de la Armada, se decidió incluir el pabellón nacional colocado en una posición visible de la embarcación como en las lanchas reales, cuya animación responde a la dirección del viento definido en el sistema de físicas.

Este efecto se implementó dentro del entorno de Unreal Engine 5, utilizando las capacidades del motor para simular el movimiento de telas sometidas a una fuerza externa. De este modo, la tela de la bandera adopta una orientación y un movimiento coherentes con la dirección del viento presente en el escenario.

Aunque este elemento podría considerarse en principio un detalle artístico o decorativo, en el contexto del simulador cumple también una función informativa. El usuario que se encuentra navegando dentro del entorno virtual puede observar la bandera desde la cubierta o desde el puesto de gobierno y deducir de manera intuitiva por qué banda está entrando el viento. Esta información puede resultar útil, por ejemplo, durante el ejercicio de hombre al agua o durante determinadas maniobras en las que el viento puede influir en el abatimiento de la embarcación.

No obstante, conviene señalar que esta solución representa una aproximación sencilla para mostrar la influencia del viento, y no necesariamente el sistema más completo desde el punto de vista instrumental.

En una embarcación equipada con instrumentación de navegación más avanzada, lo habitual sería disponer de un indicador de viento que proporcione información más precisa sobre la dirección y velocidad del flujo de aire.

Este tipo de instrumentos suelen mostrar datos como el ángulo de incidencia del viento respecto al eje del barco o su intensidad. Es por ello que también se decidió incluir este instrumento en las últimas semanas de desarrollo.

En las últimas semanas del proyecto se añadiría en la esquina superior derecha un indicador de viento relativo, no obstante, el uso del viento sobre la bandera es un truco bien sabido y usado a bordo de los buques reales en la mar (Figura 3-13).



Figura 3-13 Efecto del viento sobre el pabellón nacional (Elaboración propia)

Es importante tener en cuenta además que el viento que se observa a través del movimiento de la bandera no corresponde exactamente al viento real existente en el entorno, sino al denominado viento relativo.

En navegación, el viento relativo es el resultado de combinar dos componentes diferentes: por un lado, el viento real presente en el entorno y por otro, el flujo de aire generado por el propio movimiento de la embarcación a través del aire.

Cuando un barco se desplaza, el aire parece incidir sobre él con una dirección que depende tanto de la velocidad del viento ambiental como de la velocidad del propio barco.

En consecuencia, la dirección que adopta la bandera refleja la composición vectorial entre el viento real y la velocidad del barco, lo que significa que puede variar incluso aunque la dirección del viento

ambiental permanezca constante. Por ejemplo, si la embarcación aumenta su velocidad en una determinada dirección, el viento relativo tenderá a desplazarse hacia proa, ya que el movimiento del barco genera una corriente de aire aparente en sentido contrario a su avance.

Este fenómeno es bien conocido en la navegación y constituye un aspecto importante en la interpretación del comportamiento del viento a bordo.

Al reproducir este efecto dentro del simulador, se consigue que la orientación de la bandera responda de manera coherente al movimiento del barco y al viento presente en el entorno, proporcionando así una referencia visual realista y útil para el usuario en ejercicios como este.

En definitiva, aunque la simulación de la bandera pueda parecer un detalle menor dentro del conjunto del proyecto, su inclusión aporta tanto valor visual como funcional al simulador. Por un lado, contribuye a enriquecer la escena desde el punto de vista estético, añadiendo un elemento dinámico que reacciona al entorno. Por otro, ofrece al usuario una pista visual inmediata sobre el comportamiento del viento, lo cual resulta especialmente útil durante la ejecución de maniobras en las que este factor puede influir de manera significativa en la trayectoria de la embarcación.

Podemos concluir definiendo la decisión de definir el “hombre al agua” como primer ejercicio a programar como una de las claves del proyecto. Primero porque permitió terminar de refinar las físicas faltantes o menos pulidas mientras se sacaba a su vez adelante uno de los ejercicios más emblemáticos de cualquier embarcación civil o militar.

3.5.3 Ejercicio de fondeo de precisión

El ejercicio de fondeo de precisión constituye una de las prácticas más completas implementadas dentro del simulador, ya que combina navegación, orientación, control de la embarcación y toma de decisiones en un mismo escenario.

A diferencia de otros ejercicios más simples, en este caso el usuario no solo debe alcanzar una posición determinada, sino hacerlo siguiendo una derrota de aproximación concreta, lo que introduce un mayor nivel de exigencia desde el punto de vista técnico.

Durante el desarrollo del ejercicio, el usuario deberá procurar mantenerse lo más próximo posible al eje de la derrota de aproximación previamente definida, lo cual implica realizar correcciones constantes en el rumbo y en la velocidad de la embarcación. Este aspecto es especialmente relevante, ya que en navegación real el éxito de una maniobra de fondeo depende en gran medida de cómo se realiza la aproximación al punto deseado y por ende de la preparación previa.

Una aproximación incorrecta puede provocar desviaciones importantes en la posición final o dificultar el control de la embarcación en los últimos metros. Para facilitar esta tarea, el simulador pone a disposición del usuario la alidada del puente, previamente modelada, que permite orientarse mediante el uso de demoras a puntos notables de la costa o a luces de referencia. De esta manera, el usuario puede aplicar técnicas reales de navegación visual, utilizando referencias externas para comprobar su alineación con la derrota prevista.

Este enfoque refuerza el carácter formativo del simulador, ya que reproduce procedimientos que se emplean habitualmente en la práctica real. Además, el ejercicio incorpora una herramienta de apoyo que permite al usuario visualizar en cualquier momento la solución teórica.

Mediante la pulsación de una tecla específica, el sistema muestra la derrota ideal de aproximación, tanto desde una vista aérea como desde la perspectiva del propio puente de mando si se alterna con la tecla V.

Esta funcionalidad permite comparar la trayectoria real seguida por la embarcación con la trayectoria correcta, facilitando así el aprendizaje y la corrección de errores. Junto a esta información, también se representa la posición exacta del punto de fondeo objetivo (véase la Figura 3-14).

El ejercicio finaliza automáticamente en el momento en que el usuario ejecuta la orden de hacer fondo, acción que se realiza mediante la pulsación de la tecla ENTER. En ese instante, el sistema informa al usuario de la distancia en yardas a la que ha quedado del punto de fondeo.

Otro aspecto destacable de este ejercicio es su alto grado de personalización, lo cual lo convierte en una herramienta especialmente útil para el entrenamiento.

El simulador permite ajustar parámetros como el nivel de tráfico civil presente en la zona, introduciendo así diferentes niveles de dificultad y obligando al usuario a tener en cuenta la presencia de otras embarcaciones durante la maniobra.

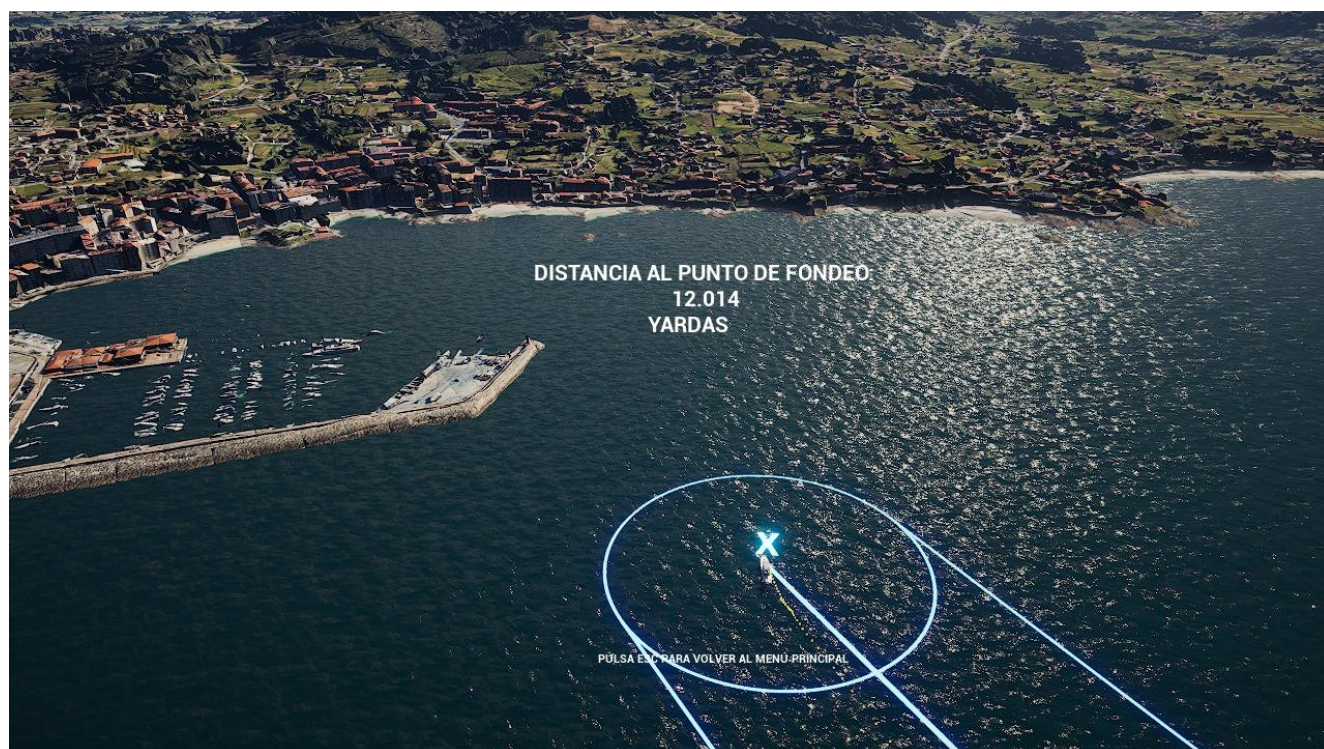


Figura 3-14 Ejercicio de fondeo (Elaboración propia)

Asimismo, es posible modificar las coordenadas del punto de fondeo y el rumbo de la aproximación, lo que permite recrear situaciones muy variadas dentro del mismo entorno. Gracias a esta flexibilidad, los alumnos pueden utilizar el simulador tanto para recrear ejercicios reales que vayan a realizar posteriormente en condiciones reales, como para practicar de forma anticipada diferentes escenarios, adaptando las condiciones a sus necesidades o mejorando sus puntos débiles a base de repetición en el simulador. Esto convierte al simulador en una herramienta de gran valor desde el punto de vista formativo, ya que permite repetir maniobras, analizar errores y mejorar la precisión en un entorno controlado antes de enfrentarse a esta maniobra en situaciones reales.

3.5.4 Ejercicio de remolque

El ejercicio de remolque constituye una de las maniobras más complejas a nivel de programación implementadas dentro del simulador, ya que combina navegación, control fino de la embarcación, conocimiento del entorno y aplicación de normativa marítima, así como físicas relativamente complejas fruto de las interacciones entre el buque remolcado y el remolcador, reproduciendo con bastante fidelidad una situación real de asistencia a otra embarcación como la realizada en la ría en condiciones reales.

En este ejercicio, el usuario debe aproximarse a un buque que se encuentra a la deriva y ejecutar correctamente todas las fases necesarias para establecer el remolque de forma segura. Este ejercicio es sin duda alguna, uno de los clásicos de la Escuela Naval Militar.

El buque remolcado se representa dentro del simulador como una embarcación sin gobierno, es decir, incapaz de maniobrar por sus propios medios. Para indicar esta condición, se han implementado las señales reglamentarias correspondientes: durante el día, el buque muestra dos bolas negras izadas, mientras que durante la noche se representan dos luces rojas, siguiendo lo establecido en el reglamento internacional para prevenir abordajes en la mar. De esta forma, el usuario puede identificar correctamente la situación del buque objetivo desde la distancia, tal y como ocurriría en un entorno real.

Uno de los aspectos más importantes del ejercicio es la aproximación inicial al buque, que debe realizarse obligatoriamente desde barlovento, es decir, desde la dirección de la que proviene el viento. Esta condición no es arbitraria, sino que responde a criterios de seguridad reales. Si el usuario intenta aproximarse desde sotavento, el simulador penaliza automáticamente la maniobra, considerándola incorrecta.

Esto se debe a que el buque a remolcar, al encontrarse a la deriva y generalmente atravesado al viento, suele experimentar un abatimiento mayor que la embarcación que realiza el remolque, lo que incrementa significativamente el riesgo de colisión durante la aproximación al poder encontrarse el buque remolcador en una situación bastante indeseada comprobando como ha de dar marcha atrás para evitar que el buque sin gobierno se le eche encima, esto por supuesto, es algo que el usuario es libre de experimentar en el simulador, pues el programa no le avisará de que se está aproximando por la banda que no debe, simplemente en última instancia no le dejaría dar la estacha, pero se considera de gran valor instructivo el permitir al usuario equivocarse.

La maniobra correcta consiste por tanto, en aproximarse desde barlovento con un ángulo comprendido aproximadamente entre 45 y 90 grados respecto al buque a remolcar, lo que permite mantener un mayor control de la situación y reducir el riesgo de impacto. Durante esta fase, el usuario debe gestionar cuidadosamente la velocidad y el rumbo de la lancha para conseguir posicionarse de forma adecuada. El objetivo es situar la popa de la embarcación propia próxima a la proa del buque a remolcar, con la lancha completamente detenida a velocidad prácticamente nula.

Una vez alcanzada esta posición, el simulador activa la siguiente fase del ejercicio: la entrega de la estacha de remolque. A partir de este momento, ambos buques quedan unidos mediante una estacha, y comienza la fase de remolque propiamente dicha. Este elemento introduce una nueva variable física dentro del simulador, ya que la estacha se comporta como un vínculo entre ambas embarcaciones, transmitiendo tensiones y condicionando el movimiento relativo entre ellas.

Durante el remolque, uno de los aspectos clave que el usuario debe controlar es el comportamiento de la estacha. En condiciones reales, la estacha debe mantenerse parcialmente sumergida bajo el agua, lo cual ayuda a amortiguar tensiones y a evitar esfuerzos bruscos.

En el simulador se ha reproducido este comportamiento como una condición de validez del ejercicio: si la estacha se eleva completamente fuera del agua y entra en una situación de tensión excesiva o innecesaria, el ejercicio se considera incorrecto y deberá repetirse. Esta restricción no es meramente arbitraria, sino que responde a una situación real de riesgo. Una estacha sometida a tensiones elevadas puede llegar a romperse, lo cual representa un peligro significativo para la dotación, ya que la liberación brusca de la energía acumulada puede provocar daños materiales o incluso lesiones personales.

Por este motivo, el simulador obliga al usuario a realizar el remolque de forma progresiva y controlada, evitando aceleraciones bruscas o cambios repentinos en la tensión entre ambas embarcaciones (véase la Figura 3-15, donde se está llevando a cabo el remolque mientras la estacha permanece parcialmente sumergida pero ejerciendo trabajo entre ambas embarcaciones).

El objetivo final del ejercicio se alcanza cuando el buque remolcado consigue una velocidad de aproximadamente 3 nudos, valor que se ha tomado como referencia siguiendo los criterios utilizados en la Escuela Naval Militar.

Este umbral indica que el remolque se ha establecido correctamente y que la maniobra ha sido ejecutada con éxito. En ese momento, el simulador da por finalizado el ejercicio. Adicionalmente, el

ejercicio contempla tanto condiciones diurnas como nocturnas. En el caso de realizarse durante la noche, se han implementado las luces de navegación correspondientes para cada embarcación, de acuerdo con lo establecido en el Reglamento Internacional para Prevenir Abordajes en la Mar.

Esto incluye las luces propias del buque remolcador, del buque remolcado y de una embarcación sin gobierno, según corresponda en cada situación. Este detalle añade una capa adicional de realismo al simulador y obliga al usuario a familiarizarse también con la interpretación de señales luminosas, aspecto fundamental en la navegación nocturna.



Figura 3-15 Ejercicio de remolque diurno (Elaboración propia)

En conjunto, este ejercicio representa una de las prácticas más completas del simulador, ya que exige al usuario aplicar conocimientos de maniobra, seguridad, interpretación del entorno y normativa marítima, integrando múltiples aspectos en una única situación de entrenamiento.

3.5.5 Ejercicio de aprovisionamiento en la mar

El ejercicio de aprovisionamiento en la mar se ha diseñado con el objetivo de simular una maniobra habitual en operaciones navales, en la que una embarcación recibe suministros de otra mientras ambas se encuentran en movimiento.

En este caso concreto, el usuario actúa como buque receptor, lo que implica que deberá ejecutar una aproximación controlada y mantener una posición relativa estable respecto al buque proveedor durante un determinado periodo de tiempo.

Al inicio del ejercicio, ambas embarcaciones se encuentran navegando en condiciones de “Romeo a tope”, es decir, con la señalización correspondiente que indica que se está llevando a cabo una operación de aprovisionamiento. Esta referencia, habitual en el entorno naval, aporta realismo al simulador y sitúa al usuario dentro de un contexto operativo concreto.

La posición inicial de la lancha del usuario se establece por la popa del buque proveedor, lo que constituye el punto de partida para la maniobra de aproximación. A partir de esta situación inicial, el usuario deberá maniobrar su embarcación hasta aproximarse al costado de babor del buque proveedor, que permanece en movimiento constante dando avance.

Este aspecto introduce una dificultad adicional, ya que no se trata de aproximarse a un objeto estático, sino a una embarcación en movimiento, lo que obliga al usuario a igualar velocidad, rumbo y posición relativa de forma progresiva y controlada (Figura 3-16).



Figura 3-16 Fase de aproximación al buque proveedor (Elaboración propia)

Durante la aproximación, es fundamental que el usuario gestione adecuadamente la velocidad de su embarcación, evitando tanto una aproximación demasiado rápida, que podría provocar una colisión, como una aproximación excesivamente lenta, que dificultaría alcanzar la posición deseada.

Asimismo, deberá tener en cuenta posibles efectos como la inercia de la lancha o el abatimiento debido al viento, si este está presente en el escenario que se está practicando, lo que añade un valioso realismo a la maniobra.

Una vez que el usuario consigue posicionarse correctamente en el costado de babor del buque proveedor, comienza la fase principal del ejercicio. En esta etapa, el objetivo no es desplazarse, sino mantener una posición relativa constante respecto al buque proveedor.

Esto implica realizar pequeños ajustes continuos en la velocidad y en el rumbo para compensar cualquier desviación, reproduciendo así la dificultad real de mantener una formación estable entre dos embarcaciones en movimiento.

El ejercicio establece que el usuario debe permanecer en esta posición durante un periodo de dos minutos, tiempo durante el cual se simula la operación de aprovisionamiento, aunque en esta versión del simulador es aún sin estachas visibles.

De todos modos, este intervalo obliga sin ninguna duda al usuario a mantener la concentración en todo momento y a realizar correcciones constantes, ya que cualquier variación en la posición relativa puede hacer que la embarcación se desplace fuera de la zona deseada o acabe por colisionar contra el otro buque.

En caso de que la embarcación se aleje en exceso del buque proveedor o se produzca una situación de riesgo, el ejercicio acabará por considerarse incorrecto provocando que el cronómetro vuelva inmediatamente a cero debiendo repetirse desde cero, lo que refuerza la necesidad de precisión y control durante toda la maniobra.

Por el contrario, si el usuario logra mantener una posición estable durante el tiempo requerido, el simulador considera que la operación se ha realizado con éxito y da por finalizado el ejercicio en curso (Figura 3-17).



Figura 3-17 Buque receptor manteniendo posición a babor del proveedor (Elaboración propia)

En conjunto, este ejercicio permite trabajar aspectos clave de la navegación como el control fino de la velocidad, la coordinación con otra embarcación en movimiento y la estabilidad en maniobra, siendo especialmente útil para desarrollar habilidades relacionadas con la navegación en formación y operaciones conjuntas en el mar.

3.5.6 Ejercicio de canal dragada

El objetivo principal del ejercicio consiste en que el usuario mantenga su embarcación lo más próxima posible al eje de la canal, reproduciendo así una navegación segura dentro de los límites establecidos. Para ello, se ha definido un ancho de canal de 200 yardas, lo que implica que el usuario dispone de un margen lateral limitado para realizar la maniobra. Salirse de esta canal o aproximarse en exceso a los límites puede interpretarse como una navegación incorrecta, reforzando la necesidad de precisión durante todo el ejercicio.

Para facilitar la orientación, el usuario puede hacer uso de la alidada situada en el puente de mando, que permite tomar demoras a puntos notables de la costa o luces. Este procedimiento reproduce técnicas reales de navegación visual, en las que el oficial utiliza referencias externas para verificar su posición y alineación respecto a una derrota determinada. De esta manera, el simulador no solo plantea un ejercicio de control del barco, sino también de interpretación del entorno y aplicación de métodos tradicionales de navegación. Adicionalmente, el sistema incorpora una herramienta de apoyo que permite visualizar en cualquier momento la solución del ejercicio. Mediante la pulsación como siempre de la tecla Y, el usuario puede acceder a una representación del canal completo, así como de la ruta que está siguiendo en tiempo real (véase la Figura 3-18). Esta visualización puede resultar especialmente útil durante el aprendizaje, ya que permite identificar desviaciones respecto al eje ideal y corregir errores de forma inmediata.

A diferencia de otros ejercicios del simulador, este no finaliza automáticamente al alcanzar un punto concreto. En su lugar, el usuario puede continuar navegando dentro de la canal tanto tiempo como desee y decidir manualmente cuándo finalizar el ejercicio, regresando al menú principal. Este enfoque permite

utilizar el ejercicio de forma más flexible, adaptándolo tanto a sesiones de entrenamiento libre como a prácticas más estructuradas.

Uno de los aspectos más destacados de este ejercicio es su alto grado de personalización. El sistema permite ajustar el nivel de tráfico civil presente en el escenario, introduciendo así diferentes niveles de dificultad. La presencia de otras embarcaciones obliga al usuario a mantener su trayectoria dentro de la canal al mismo tiempo que gestiona posibles cruces o situaciones de tráfico, aumentando la complejidad de la maniobra como ocurre en entornos reales. Asimismo, es posible definir las coordenadas GPS de cada uno de los distintos puntos que conforman la canal, lo que permite construir rutas completamente personalizadas o recrear las que deseen los alumnos. Estos puntos actúan como referencias que definen el eje de la canal, y pueden adaptarse por completo.

En el caso de que no se utilicen todos los puntos disponibles, aquellos que no se necesiten deberán establecerse con valor cero, garantizando así el correcto funcionamiento del sistema.

Es importante destacar que el último punto de la canal debe corresponder siempre al punto X-ray, siguiendo una convención establecida dentro del propio diseño del ejercicio. Este punto actúa como referencia final de la ruta y permite estructurar correctamente la secuencia de navegación dentro del simulador.



Figura 3-18 Vista aérea de canal dragada. "Soluciones" activas (Elaboración propia)

Al igual que ocurre en otros ejercicios como el fondeo de precisión, esta capacidad de personalización permite que los alumnos puedan recrear ejercicios reales realizados en la mar, adaptándolos al entorno virtual del simulador.

De este modo, el sistema no solo sirve como herramienta de práctica general, sino también como un medio para preparar maniobras específicas en condiciones controladas, lo que refuerza su valor como instrumento de apoyo a la formación.

3.5.7 Ejercicio de formaciones

El ejercicio de formaciones está orientado a entrenar la capacidad del usuario para mantener posiciones relativas precisas respecto a un buque guía, una habilidad fundamental en operaciones navales donde varias embarcaciones deben navegar de forma coordinada.

Este tipo de maniobra exige no solo control de la embarcación, sino también una correcta interpretación de referencias angulares y de distancia, combinando navegación visual y uso de instrumentos.

El objetivo principal del ejercicio consiste en que el usuario sea capaz de ocupar lo antes posible una posición concreta dentro de una formación, definida en relación con un buque guía que actúa como referencia principal.

Para lograrlo, el usuario deberá emplear dos herramientas clave dentro del simulador. Por un lado, la alidada, que permite situarse en la demora adecuada respecto al buque guía, es decir, en el ángulo correcto medido desde el norte.

Por otro lado, se dispone de información de distancia radar, que se muestra en la esquina superior derecha de la pantalla y proporciona la separación exacta que debe mantenerse con el buque guía.

La combinación de ambos parámetros —demora y distancia— define de manera precisa la posición que el usuario debe ocupar dentro de la formación. Durante la fase de aproximación, será necesario realizar ajustes continuos en rumbo y velocidad para alcanzar esa posición, teniendo en cuenta además factores como la inercia de la embarcación o posibles efectos externos como el viento o la corriente. Este proceso reproduce de forma simplificada las condiciones reales en las que se llevan a cabo este tipo de maniobras.

Una vez que el usuario consigue posicionarse correctamente, comienza la fase de estabilización. En esta etapa, el objetivo es mantener la posición dentro de la formación durante un periodo de 20 segundos. Durante este tiempo, el usuario deberá realizar pequeñas correcciones para compensar cualquier desviación y conservar tanto la demora como la distancia respecto al buque guía (Figura 3-19).

Si en algún momento la embarcación abandona la posición establecida, el sistema reinicia automáticamente el contador, obligando al usuario a recuperar la posición y mantenerla nuevamente durante el tiempo requerido.

El ejercicio no se limita a una única posición, sino que establece como objetivo completar tres posiciones correctas dentro de la formación. Esto implica que, una vez completada una posición con éxito, el sistema puede requerir al usuario desplazarse a una nueva posición relativa, repitiendo el proceso de aproximación y estabilización.



Figura 3-19 Formación en línea de demora (Elaboración propia)

De esta manera, el ejercicio introduce una dinámica progresiva que permite trabajar diferentes configuraciones dentro de una misma sesión. Las formaciones empleadas en el simulador están basadas en las descritas en el ATP Volumen II, lo que aporta un respaldo doctrinal al diseño del ejercicio y garantiza que las posiciones y configuraciones utilizadas corresponden a prácticas reales dentro del ámbito naval. Esto refuerza el carácter formativo del simulador, permitiendo que los usuarios se familiaricen con procedimientos estandarizados.

En conjunto, este ejercicio permite desarrollar habilidades clave como el control preciso de la embarcación, la interpretación de referencias angulares y de distancia, y la capacidad de mantener una posición estable en relación con otro buque en movimiento.

Estas competencias son esenciales en operaciones de navegación en formación y convierten este ejercicio en una herramienta especialmente valiosa dentro del conjunto del simulador.

3.6 Sistemas adicionales del simulador

El apartado de sistemas adicionales del simulador recoge un conjunto de funcionalidades que, si bien no forman parte del núcleo inicial del desarrollo, han sido incorporadas en las fases finales del proyecto con el objetivo de enriquecer la experiencia de usuario, mejorar el realismo del entorno y ampliar el valor formativo del simulador.

Estas funcionalidades abarcan distintos aspectos, desde la interacción con el usuario y la representación del entorno, hasta la implementación de comportamientos adicionales que complementan el sistema principal de físicas y navegación. Debido a que han sido desarrolladas en gran medida durante las últimas semanas de trabajo, se ha optado por agruparlas en este bloque independiente dentro de la memoria, diferenciándolas así de las fases principales de modelado, programación y creación del entorno.

Esta organización permite presentar de forma estructurada un conjunto de mejoras que, aunque añadidas en una etapa avanzada del desarrollo, resultan fundamentales para dotar al simulador de mayor coherencia, profundidad y utilidad como herramienta de entrenamiento.

3.6.1 Sistema de ayudas visuales y análisis de maniobras

El simulador incorpora un sistema de ayudas visuales y herramientas de análisis diseñado para facilitar el aprendizaje y permitir al usuario comprender de manera clara su desempeño durante los distintos ejercicios.

Este sistema se activa mediante la pulsación de la tecla Y, que permite mostrar u ocultar en cualquier momento una serie de elementos gráficos dentro del entorno 3D, adaptados específicamente al tipo de ejercicio que se esté realizando.

Estas ayudas, también denominadas “soluciones”, consisten en representaciones visuales superpuestas sobre el entorno, que indican al usuario cuál sería la ejecución correcta del ejercicio.

Su implementación responde a una filosofía de aprendizaje progresivo: el usuario puede optar por utilizarlas como guía durante las primeras fases de práctica, o bien desactivarlas para realizar el ejercicio en condiciones más exigentes una vez que ha adquirido cierta experiencia.

Un ejemplo claro de este sistema se encuentra en el ejercicio de canal dragada, donde al activar las ayudas se muestra la canal sobre la que debe navegar la embarcación. Esta canal aparece representada de forma brillante y claramente visible sobre la superficie del agua, como si se tratase de una carretera (véase la Figura 3-20).

Este recurso visual permite al usuario identificar de manera inmediata la trayectoria correcta, generando una sensación que, aunque más propia de la conducción terrestre, resulta muy útil en las primeras fases de aprendizaje, donde la interpretación de referencias marítimas puede resultar más compleja.

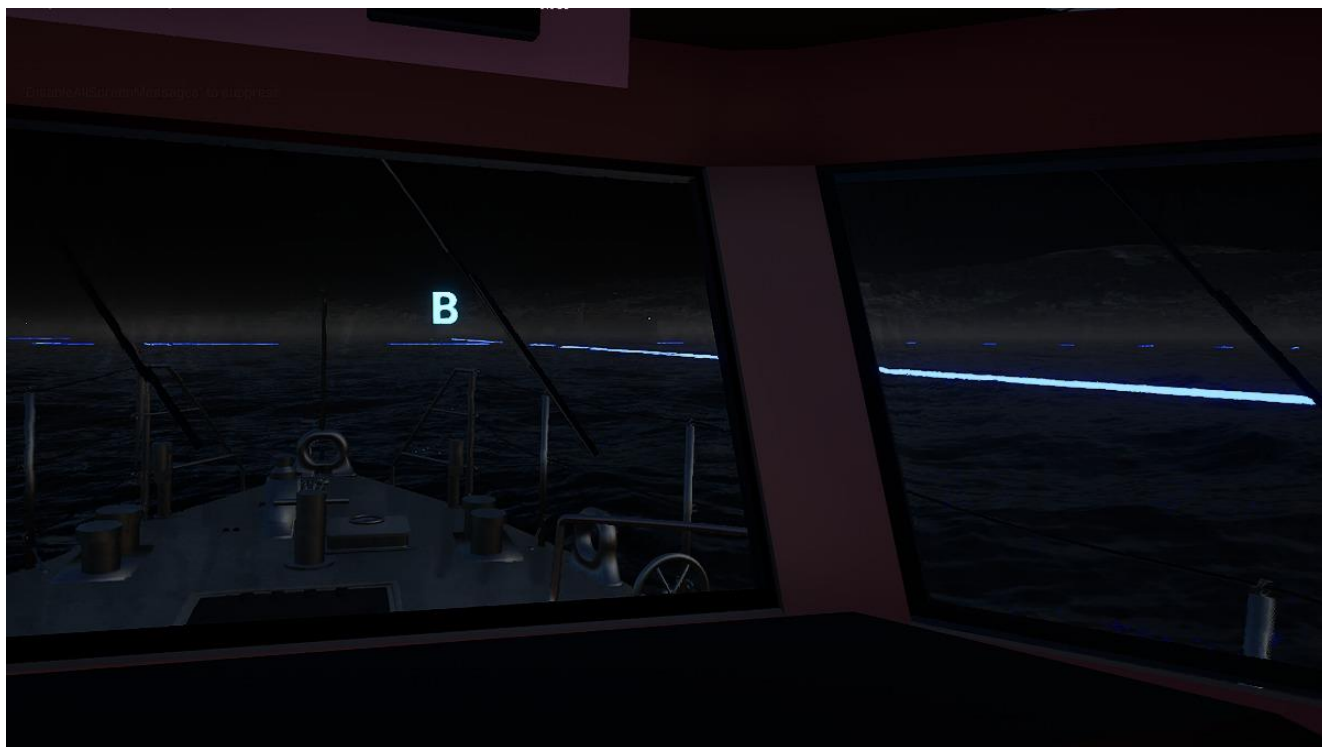


Figura 3-20 Canal dragada. "Soluciones" activas en primera persona (Elaboración propia)

Además de esta representación en primera persona desde puente, el sistema también permite visualizar la información desde una vista aérea, lo que proporciona una perspectiva más completa de la situación. Desde esta vista, el usuario puede observar no solo la canal ideal, sino también la trayectoria real que ha seguido con la embarcación, lo que facilita la identificación de desviaciones, errores de rumbo o zonas en las que se ha salido del eje correcto. Esta herramienta resulta especialmente útil para analizar el desempeño tras realizar una maniobra.

El mismo sistema de ayudas se adapta a otros ejercicios del simulador. En el caso del fondeo de precisión, permite visualizar tanto la derrota de aproximación ideal como el punto exacto de fondeo, facilitando la comprensión de cómo debería ejecutarse la maniobra. En el ejercicio de formaciones, se muestra una flecha o indicador visual que señala la posición que debe ocupar el usuario respecto al buque guía, ayudando a interpretar correctamente la demora y la distancia requeridas.

Otro elemento importante dentro de este sistema es la visualización de la estela de la embarcación, que permite observar de forma continua el recorrido que se ha llevado a cabo. Esta estela actúa como una referencia visual del movimiento pasado del barco, facilitando la evaluación de la maniobra en tiempo real y permitiendo al usuario corregir su trayectoria si detecta desviaciones o encontrar patrones incorrectos en su forma de navegar.

Es importante destacar que el uso de estas ayudas es completamente opcional. El usuario puede activarlas o desactivarlas en cualquier momento mediante la tecla Y, sin restricciones. Esto permite adaptar la experiencia del simulador a distintos niveles de dificultad: desde un modo asistido, orientado al aprendizaje y la comprensión de las maniobras, hasta un modo más realista, en el que el usuario debe desenvolverse únicamente con las herramientas propias de la navegación y en todo caso emplea este modo para comprobar el resultado final o en determinadas situaciones para salir de dudas o comprobar algo específico.

En conjunto, este sistema de ayudas y visualización aporta un valor significativo al simulador, ya que no solo facilita la ejecución de los ejercicios, sino que también permite al usuario analizar, comprender y mejorar su rendimiento de forma autónoma, reforzando así el carácter formativo del proyecto.

3.6.2 Implementación de fallos instrumentales: error de giroscópica

El apartado de error de giroscópica introduce dentro del simulador un primer acercamiento a la simulación de fallos mecánicos e instrumentales, ampliando así el alcance del proyecto más allá de una navegación idealizada. Hasta este punto, el comportamiento de los sistemas del simulador se había centrado en reproducir condiciones normales de operación; sin embargo, en la práctica real es fundamental que el oficial sea capaz de enfrentarse a situaciones en las que los instrumentos presentan desviaciones o errores. Por este motivo, se decidió incorporar este tipo de fenómeno como una funcionalidad adicional orientada al entrenamiento.

En concreto, se implementó el denominado error de giroscópica, que hace referencia a la desviación que puede presentar el rumbo indicado por la aguja giroscópica respecto al rumbo real de la embarcación, así como a cualquier demora que se tome a costa, luces o cualquier objeto del escenario. Este tipo de error es relativamente común en la navegación y puede deberse a múltiples factores, como desajustes del sistema, errores de calibración o condiciones externas.

A nivel formativo, resulta especialmente relevante, ya que obliga al usuario a ser consciente de la diferencia entre el rumbo indicado por los instrumentos y el rumbo verdadero.

Dentro del simulador, este efecto se ha implementado de forma que, en cualquier ejercicio que se realice, exista siempre un error aleatorio de giroscópica comprendido entre -15° y $+15^\circ$ y mostrado en un texto flotante sobre la alidada. Esto significa que el rumbo mostrado por el instrumento no coincide exactamente con el rumbo real de la embarcación, introduciendo así una discrepancia que el usuario debe tener en cuenta durante la navegación (véase la Figura 3-21, donde pese a mostrarse la demora 070, debido al error de -12° , la demora real observada sería en realidad 082).

La presencia de este error tiene un impacto directo en aspectos clave de la navegación dentro del simulador, especialmente en aquellos ejercicios donde intervienen demoras y rumbos, como el fondeo de precisión, las formaciones o la navegación en canal dragada.

El usuario debe realizar de manera continua las conversiones mentales necesarias para compensar la desviación de la giroscópica, ajustando sus decisiones en función de la diferencia entre el valor indicado y la realidad.



Figura 3-21 Error de giroscópica (Elaboración propia)

Este planteamiento introduce un nivel adicional de dificultad, ya que el usuario no puede limitarse a seguir las indicaciones del instrumento de forma literal, sino que debe interpretar la información y adaptarla a la situación real.

De esta manera, el simulador fomenta una navegación más consciente y menos dependiente de los instrumentos, reforzando habilidades fundamentales como la orientación, la interpretación de referencias externas y la capacidad de corrección de errores.

Además, al tratarse de un valor aleatorio en cada ejecución, el ejercicio no se repite nunca en condiciones exactamente iguales, lo que evita la mecanización de las maniobras y obliga al usuario a adaptarse continuamente a nuevas condiciones. Este enfoque incrementa el valor formativo del simulador, ya que reproduce de manera más fiel la variabilidad presente en situaciones reales.

En conjunto, la inclusión del error de giroscópica supone una primera aproximación al concepto de fallos dentro del simulador, abriendo la puerta a futuras ampliaciones en las que podrían incorporarse otros tipos de averías o anomalías.

Aunque se trata de un único fallo en la versión actual, su impacto en la experiencia del usuario es significativo, ya que introduce una capa adicional de realismo y obliga a aplicar conocimientos de navegación más allá del uso directo de los instrumentos.

3.6.3 Sistema de tráfico civil

El sistema de tráfico civil constituye un elemento clave dentro del simulador, ya que introduce un componente dinámico que incrementa significativamente el realismo y la dificultad de las maniobras. Hasta este punto, muchos de los ejercicios podían realizarse en un entorno relativamente controlado; sin embargo, en la navegación real es habitual encontrarse con otras embarcaciones que condicionan las decisiones del patrón.

Por este motivo, se decidió incorporar tráfico civil con el objetivo principal de interferir en las maniobras del usuario y obligarle a adaptarse a un entorno cambiante.

El comportamiento de estas embarcaciones se basa en patrones de rumbo y velocidad aleatorios, lo que significa que no siguen trayectorias completamente predecibles. Esto obliga al usuario a mantener una vigilancia constante del entorno, especialmente durante ejercicios como la canal dragada o el fondeo, donde la precisión en la maniobra es fundamental. La presencia de tráfico introduce así una capa adicional de complejidad, ya que el usuario no solo debe centrarse en su propia navegación, sino también en la interacción con otros buques.

Desde el punto de vista de la implementación, las embarcaciones civiles aparecen en el escenario mediante un sistema de puntos de aparición controlados. Estos puntos han sido diseñados de forma que la generación de tráfico se produzca de manera coherente, evitando situaciones poco realistas como la aparición de barcos demasiado cerca del usuario. De esta forma, se consigue que las embarcaciones entren en escena de manera progresiva y natural, simulando un entorno marítimo más creíble.

Además, se han empleado distintos assets, incorporado así diferentes tipos de embarcaciones a las que después se ha programado para imitar un comportamiento típico de dicha clase de buque (Figura 3-22). Cada una además con características propias que afectan a su visibilidad dentro del simulador. Entre ellas se incluyen:

Buques mercantes, de mayor tamaño y fácilmente visibles, que suelen representar obstáculos claros en la navegación.

Veleros, de menor tamaño, cuya detección puede resultar algo más compleja dependiendo de las condiciones.

Pesqueros, que presentan una visibilidad más reducida y pueden suponer un riesgo adicional si el usuario no mantiene una vigilancia adecuada.



Figura 3-22 Tres tipos de embarcaciones civiles (Elaboración propia)

Esta variedad de embarcaciones obliga al usuario a identificar correctamente cada tipo de buque y a anticipar su comportamiento, lo cual es una habilidad esencial en la navegación real.

Uno de los aspectos más relevantes de este sistema es que no solo añade dificultad desde el punto de vista de la maniobra, sino que también permite al usuario practicar de forma directa las normas del Reglamento Internacional para Prevenir Abordajes en la Mar (RIPAM), ya que la presencia de distintos tipos de embarcaciones obliga a aplicar criterios de prioridad de paso, teniendo en cuenta situaciones como la preferencia de los pesqueros faenando o de los veleros frente a embarcaciones a motor, entre otras. Este aspecto se vuelve aún más relevante en condiciones nocturnas, donde la identificación de las embarcaciones depende principalmente de la interpretación de sus luces de navegación (Figura 3-23).



Figura 3-23 Mercante, velero y pesquero en navegación nocturna (Elaboración propia)

El simulador reproduce este comportamiento de forma coherente, asignando a cada tipo de buque las luces correspondientes según la normativa. Por ejemplo, los pesqueros faenando muestran sus luces características (Figura 3-24), los buques mercantes y embarcaciones en navegación emplean las luces estándar de navegación, los veleros emplean luces sectoriales en lo alto del mástil y otros casos

particulares, como remolcadores o buques sin gobierno, incorporan también las luces específicas correspondientes.

La combinación de este sistema de iluminación con el resto de elementos del simulador permite que la navegación nocturna adquiera un nivel de realismo considerable.

En este contexto, el usuario no solo debe controlar su embarcación, sino también interpretar correctamente las señales luminosas del entorno, lo cual constituye una parte esencial del entrenamiento marítimo.

En conjunto, la inclusión del tráfico civil transforma el simulador en una herramienta mucho más completa. Ya no se limita únicamente a la ejecución de ejercicios aislados, sino que permite realizar una navegación continua en un entorno dinámico, donde el usuario debe aplicar conocimientos de maniobra, percepción del entorno y normativa marítima de forma simultánea.

Esto hace que incluso la navegación libre, especialmente en condiciones nocturnas, se convierta en un entrenamiento práctico del RIPAM, reforzando el valor formativo del proyecto.



Figura 3-24 Pesquero no de arrastre y mercante en navegación nocturna (Elaboración propia)

3.6.4 Sistema de iluminación dinámica y ciclo día/noche

El simulador incorpora un sistema de iluminación dinámica con ciclo día/noche, que permite reproducir distintas condiciones de visibilidad y adaptar los ejercicios a escenarios tanto diurnos como nocturnos.

Este sistema constituye un elemento clave dentro del proyecto, ya que en navegación real las condiciones de luz influyen de manera directa en la forma en que se percibe el entorno y en los procedimientos que debe seguir el usuario.

Una de las características principales de este sistema es la posibilidad de configurar manualmente la hora del día, lo que permite seleccionar el momento en el que se desea realizar cada ejercicio (véase la Figura 3-25).

De este modo, es posible ejecutar las maniobras en condiciones diurnas, donde predominan las referencias visuales directas, o en condiciones nocturnas, donde la navegación depende en gran medida de la interpretación de señales luminosas.



Figura 3-25 Simulación al atardecer. Ciclo día/noche (Elaboración propia)

Durante el día, el usuario puede orientarse empleando puntos notables de la costa, tales como accidentes geográficos, construcciones o cualquier referencia visible en el entorno. Este tipo de navegación visual resulta más intuitivo y permite trabajar aspectos como la identificación de referencias y el mantenimiento de la derrota mediante observación directa.

Sin embargo, es en la navegación nocturna donde el simulador adquiere una mayor profundidad desde el punto de vista formativo. En ausencia de luz natural, el usuario debe basarse en la interpretación de luces costeras, boyas, faros y marcas de navegación, así como en las luces emitidas por otras embarcaciones.

El simulador reproduce este comportamiento de manera coherente, permitiendo identificar distintos tipos de buques mediante sus configuraciones lumínicas. Este aspecto está directamente relacionado con la aplicación práctica del Reglamento Internacional para Prevenir Abordajes en la Mar, ya que el usuario debe reconocer correctamente cada situación para actuar en consecuencia.

Adicionalmente, el sistema incluye la opción de activar o desactivar la luz lunar, lo que introduce diferentes niveles de dificultad dentro de la navegación nocturna.

Cuando la luz de la luna está presente, el entorno conserva cierto nivel de iluminación que permite distinguir parcialmente la superficie del mar, el horizonte o incluso siluetas de la costa. Esto facilita la orientación, aunque sigue requiriendo atención a las luces de navegación.

Por el contrario, cuando se desactiva la luz lunar, el simulador entra en un escenario de noche cerrada, en el que no existe prácticamente ninguna iluminación ambiental. En estas condiciones, el usuario únicamente puede percibir el entorno a través de las luces artificiales, tanto las propias de la embarcación como las de otros buques o señales costeras. El interior del barco se mantiene iluminado mediante luces rojas, que son habituales en navegación nocturna para preservar la adaptación del ojo a la oscuridad.

Este modo representa sin duda alguna el nivel más exigente dentro del simulador, ya que obliga al usuario a depender completamente de su capacidad para interpretar señales luminosas y mantener la conciencia situacional en condiciones de visibilidad extremadamente reducida.

La navegación en estas circunstancias requiere una atención constante y una correcta aplicación de las normas del RIPAM, convirtiéndose en un entorno de entrenamiento especialmente útil.

En conjunto, la implementación del ciclo día/noche y de las distintas condiciones de iluminación permite ampliar considerablemente las posibilidades del simulador, ofreciendo un entorno en el que el usuario puede entrenar tanto en condiciones favorables como en situaciones más complejas, acercándose así a la variabilidad de escenarios que se pueden encontrar en la navegación real.

3.6.5 Recreación de la ría de Pontevedra y ayudas a la navegación reales

El simulador incorpora una recreación detallada del entorno marítimo de la Ría de Pontevedra, incluyendo tanto elementos de señalización marítima como infraestructuras portuarias, todo esto con el objetivo de proporcionar un escenario lo más realista posible para la práctica de la navegación.

Esta fase del desarrollo ha sido especialmente relevante, ya que permite trasladar los ejercicios a un entorno geográfico real, aumentando significativamente el valor formativo del simulador y permitiendo su uso en conjunto con cartas nauticas reales.

En primer lugar, se han incluido las principales ayudas a la navegación de la ría, tales como boyas, balizas y faros, respetando su ubicación y función dentro del entorno marítimo.

Estos elementos son fundamentales tanto en navegación diurna como nocturna, ya que permiten al usuario orientarse, identificar canales de navegación y reconocer zonas seguras o peligrosas. Durante la noche, estas ayudas adquieren aún mayor importancia, al convertirse en referencias luminosas que guían la navegación en ausencia de visibilidad directa de la costa.

No obstante, al trabajar con una base cartográfica procedente de datos como los de Google Maps integrados mediante Cesium, se detectó que algunos elementos del entorno, especialmente en zonas portuarias, no presentaban el nivel de detalle necesario para un simulador de estas características. En particular, se observaron casos en los que los muelles aparecían incompletos, mal definidos o directamente ausentes, lo que podía afectar tanto al realismo visual como a la funcionalidad del entorno. Para solucionar este problema, se procedió a realizar una fase de modelado manual de infraestructuras, en la que se añadieron mallas adicionales creadas específicamente para representar muelles y estructuras portuarias. Estas mallas se diseñaron utilizando materiales sencillos, como texturas de piedra y hormigón, suficientes para proporcionar una apariencia creíble sin comprometer el tiempo de desarrollo.

Este trabajo permitió reconstruir de forma básica aquellos puertos que no estaban correctamente representados, mejorando tanto la precisión visual como la utilidad práctica del entorno.

De forma similar, se identificaron ciertos elementos de señalización que no estaban presentes en la base cartográfica y que resultaban importantes desde el punto de vista de la navegación. Entre ellos se incluyen, por ejemplo, la baliza de Mourisca o el faro de Tenlo Chico entre otros, que fueron modelados manualmente durante la fase final del proyecto. Aunque estos modelos no presentan un nivel de detalle extremadamente alto, cumplen perfectamente su función dentro del simulador.

Estos elementos cumplen un doble propósito. Por un lado, durante la navegación nocturna, actúan como referencias luminosas, permitiendo al usuario orientarse y reconocer su posición relativa dentro de la ría. Por otro lado, durante el día, su propia estructura física funciona como un punto notable visible, que puede utilizarse para tomar demoras mediante la alidada, tal y como se haría en una situación real. De esta manera, se integran tanto en la navegación visual como en la navegación instrumental.

Es importante destacar que gran parte de este trabajo de ajuste y modelado manual se llevó a cabo en la fase final del proyecto, optimizando el tiempo disponible para incorporar aquellos elementos que resultaban más relevantes para la experiencia del usuario.

Aunque no se buscó una recreación completamente detallada de cada infraestructura, sí se priorizó la inclusión de aquellos puntos clave que aportan valor real al entrenamiento. En conjunto, la integración de las luces de la ría, recreando una por una todas las luces, faros y marcas principales, cada una con su propia frecuencia de destellos características, tanto en color como en tiempos. Esto junto con la mejora manual de puertos, muelles y ayudas a la navegación, permite al usuario realizar maniobras reales dentro

de un entorno reconocible, como entradas y salidas de puerto desde distintas posiciones reales (véase un ejemplo de ello en la Figura 3-26). Esto convierte al simulador en una herramienta especialmente útil para practicar situaciones que pueden encontrarse en la navegación real, reforzando su carácter formativo y acercando la experiencia virtual a condiciones operativas reales.

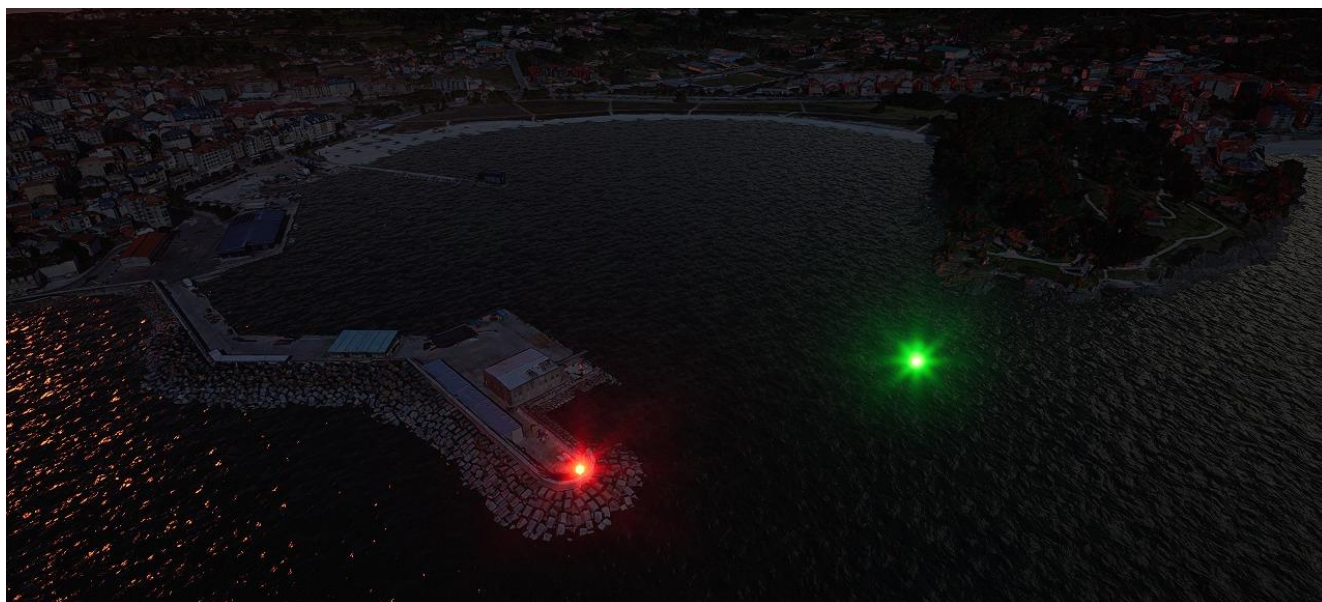


Figura 3-26 Puerto de Portonovo al anochecer (Elaboración propia)

3.6.6 Sistema de luces, marcas y banderas conforme al RIPAM

El apartado relativo a las luces, marcas y banderas conforme al RIPAM ha sido tratado dentro del simulador como un elemento de especial relevancia, hasta el punto de considerarse un tipo de “ejercicio adicional” presente en todos los ejercicios.

A diferencia de otras funcionalidades que se activan únicamente en situaciones concretas, este sistema está siempre activo en el entorno, permitiendo al usuario aprender de forma continua mediante la observación y la experiencia directa.

El objetivo principal de esta implementación es que el usuario pueda familiarizarse con la interpretación de señales marítimas de una manera natural, sin necesidad de recurrir únicamente a teoría.

A lo largo de cualquier ejercicio, el entorno presenta embarcaciones que emplean correctamente sus luces, marcas diurnas y banderas, lo que permite al usuario observar distintos casos prácticos en tiempo real. Este enfoque de aprendizaje por exposición e imitación resulta especialmente útil, ya que reproduce la forma en la que muchos conocimientos se adquieren en la práctica real.

En lo que respecta a las marcas diurnas, el simulador incluye representaciones coherentes de distintas situaciones operativas. Por ejemplo, un buque sin gobierno aparece correctamente señalizado mediante dos bolas negras izadas durante el día, lo que permite identificar inmediatamente su condición. Este mismo caso se traslada al entorno nocturno mediante el uso de dos luces rojas, tal y como establece el Reglamento Internacional para Prevenir Abordajes en la Mar. Este tipo de coherencia entre condiciones diurnas y nocturnas refuerza la comprensión del usuario sobre la equivalencia entre marcas y luces.

En cuanto al uso de banderas, también se han incorporado ejemplos representativos dentro de los distintos ejercicios. Un caso destacado es el empleo de la señal “Romeo” durante el ejercicio de aprovisionamiento, donde ambas embarcaciones indican que se está llevando a cabo una operación específica (Figura 3-27).



Figura 3-27 Aproximación para aprovisionamiento. Bandera "Romeo" (Elaboración propia)

La presencia de estas banderas no solo aporta realismo visual, sino que también permite al usuario identificar el tipo de operación que se está desarrollando, reforzando así su conocimiento de la señalización marítima.

Por otro lado, el simulador incluye una amplia variedad de luces de navegación correspondientes a distintos tipos de embarcaciones, como veleros, buques mercantes, pesqueros o embarcaciones en situaciones especiales. Cada una de ellas utiliza las configuraciones lumínicas adecuadas según su estado y tipo de navegación. Esto obliga al usuario a desarrollar la capacidad de identificar correctamente las embarcaciones únicamente a partir de sus luces, especialmente en condiciones nocturnas.

Este aspecto resulta fundamental, ya que en la navegación real muchas decisiones deben tomarse basándose únicamente en la interpretación de las luces de otros buques. Por ejemplo, el usuario debe ser capaz de distinguir si una embarcación que se aproxima es un velero o un buque a motor, determinar su rumbo relativo y decidir si es necesario modificar el propio rumbo para evitar una situación de riesgo o de colisión. De esta manera, el simulador no solo reproduce las señales de forma visual, sino que también obliga al usuario a aplicar activamente los conocimientos del RIPAM, integrándolos en la toma de decisiones durante la navegación. Este aprendizaje continuo se produce de forma implícita en todos los ejercicios, sin necesidad de crear un modo específico dedicado exclusivamente a este contenido.

En conjunto, la implementación de luces, marcas y banderas convierte el simulador en una herramienta especialmente útil para la comprensión práctica de la normativa marítima, permitiendo que el usuario aprenda a identificar situaciones reales y a reaccionar adecuadamente ante ellas. Esto refuerza el carácter formativo del proyecto y amplía su utilidad más allá de la simple ejecución de maniobras, integrando también aspectos fundamentales de la seguridad en la navegación.

3.6.7 Interfaz de usuario: menú principal interactivo

Se ha decidido incorporar un menú principal altamente interactivo y ajustable, diseñado no solo como una interfaz de selección de opciones, sino también como una herramienta visual que permite al usuario comprender de forma inmediata el efecto de los parámetros que está modificando.

Este menú ha sido desarrollado dentro de Unreal Engine 5 mediante el uso de widgets, que permiten crear interfaces gráficas integradas directamente en el entorno del simulador.

A diferencia de los menús tradicionales, que suelen presentarse como pantallas independientes o superpuestas, en este caso se ha optado por un enfoque más inmersivo. Los elementos del menú, como desplegados, botones y barras deslizantes (*sliders*), se encuentran superpuestos directamente sobre el escenario 3D del simulador, de manera que el usuario interactúa con la interfaz mientras observa el entorno en tiempo real. Esta decisión permite establecer una relación directa entre los parámetros configurados y su impacto visual inmediato en el simulador (véase la Figura 3-28).

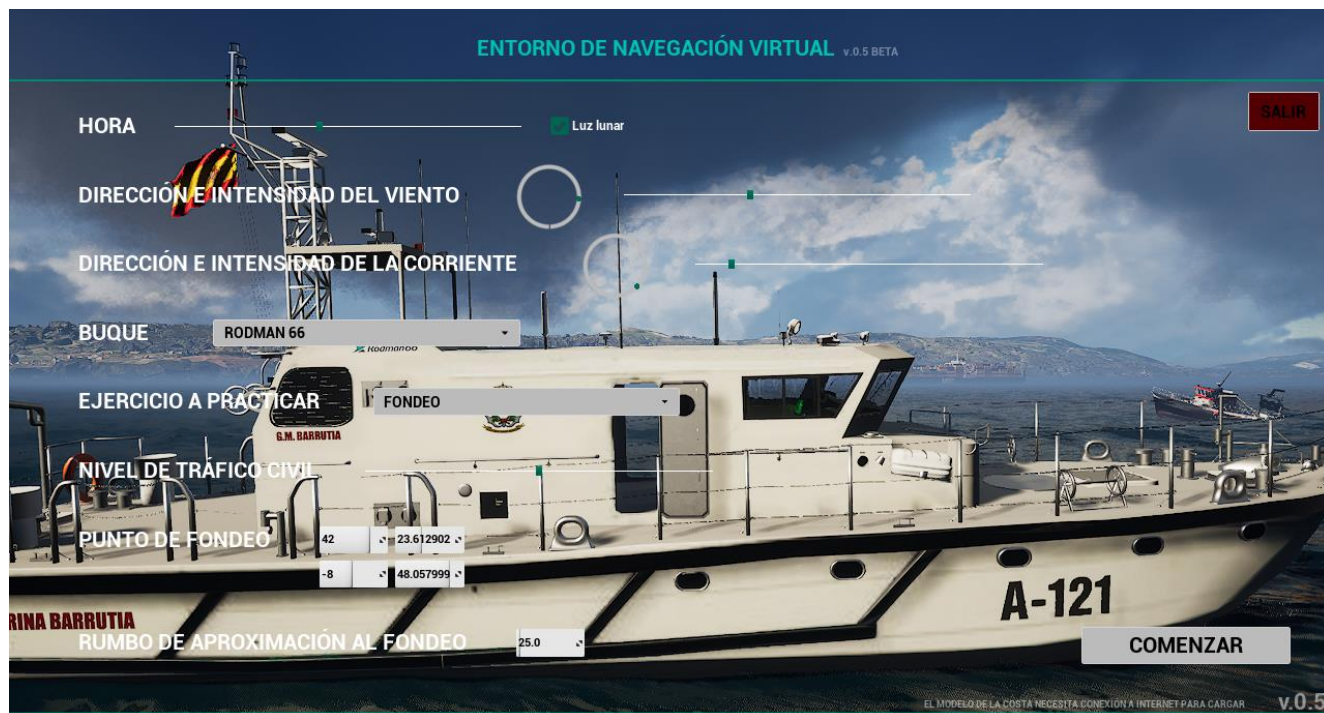


Figura 3-28 Menú principal del simulador (Elaboración propia)

El menú incluye diferentes opciones de configuración que permiten ajustar aspectos clave del entorno y de los ejercicios, como la hora del día, la intensidad y dirección del viento, la presencia de corriente, el tipo de embarcación o el ejercicio a realizar. Todos estos parámetros pueden modificarse mediante controles intuitivos, como barras deslizantes o menús desplegados, facilitando su uso incluso sin experiencia previa en el simulador. Además, uno de los aspectos más destacables de esta interfaz es su carácter dinámico, ya que los cambios realizados por el usuario se reflejan de forma inmediata en el entorno. Por ejemplo, al modificar el control correspondiente a la hora del día, el usuario puede observar cómo la iluminación del escenario cambia progresivamente, pasando de condiciones diurnas a un entorno nocturno en tiempo real. Este tipo de retroalimentación visual permite comprender de manera directa el efecto de cada parámetro sin necesidad de iniciar el ejercicio.

De forma similar, al seleccionar una determinada embarcación dentro del menú, esta aparece directamente en el escenario, permitiendo al usuario visualizarla antes de comenzar la simulación. Este detalle contribuye a reforzar la sensación de control y preparación previa al ejercicio.

Otro elemento interesante integrado en el menú es la presencia de una bandera visible dentro del escenario, cuya animación responde a los parámetros de viento definidos por el usuario. Al modificar la intensidad o la dirección del viento mediante los controles del menú, el usuario puede observar cómo la bandera cambia su forma de ondear en tiempo real. Este recurso no solo aporta un componente visual atractivo, sino que también permite comprender de manera intuitiva cómo afectan estos parámetros al entorno antes de iniciar el ejercicio.

En conjunto, este diseño de interfaz permite que el menú no sea únicamente un punto de configuración, sino una extensión del propio simulador, en la que el usuario puede experimentar y visualizar los cambios antes de aplicarlos. Esto mejora la usabilidad del sistema y facilita la preparación

de escenarios personalizados, adaptando las condiciones de la simulación a las necesidades específicas de cada ejercicio o sesión de entrenamiento.

3.6.8 Sistema de widgets e interfaz durante la simulación

El desarrollo de la interfaz de usuario dentro del simulador se ha llevado a cabo mediante el uso de widgets, integrados en el entorno de Unreal Engine 5, lo que ha permitido construir un sistema de información y control claro, accesible y adaptado a las necesidades del usuario durante la simulación. Estos widgets constituyen la base de todos los elementos visuales interactivos del simulador, abarcando desde los menús principales hasta la información mostrada durante los ejercicios.

En primer lugar, los widgets se han utilizado para la creación de los menús del sistema, incluyendo el menú principal, los menús de selección de ejercicios y las pantallas de configuración.

Gracias a esta herramienta, ha sido posible diseñar interfaces organizadas mediante botones, desplegables y otros elementos interactivos que permiten al usuario navegar por el simulador de forma intuitiva. Asimismo, los widgets también se han empleado para mostrar explicaciones iniciales de los controles, facilitando la comprensión del funcionamiento del simulador antes de comenzar cualquier ejercicio.

Durante la simulación, los widgets juegan un papel especialmente importante, ya que permiten mostrar información relevante de forma continua pero no intrusiva. Se ha optado por situar esta información en la parte superior de la pantalla, de manera que el usuario pueda consultarla rápidamente sin que interfiera con la visibilidad del entorno (Figura 3-29).

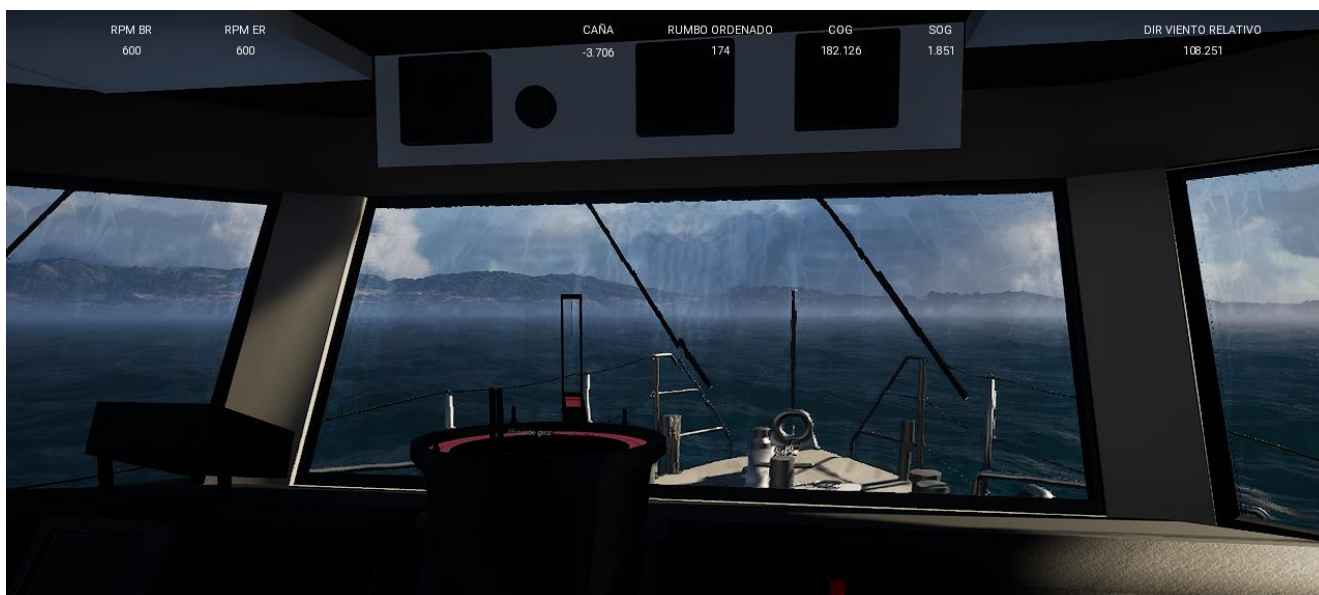


Figura 3-29 Imagen en primera persona con interfaz en la parte superior (Elaboración propia)

Entre los datos mostrados se incluyen parámetros fundamentales para la navegación, como el estado de las máquinas, la posición del timón, el rumbo ordenado, la dirección relativa del viento, así como el rumbo y la velocidad sobre el fondo. En algunos ejercicios, también se muestran datos adicionales como la distancia a otra unidad, lo cual resulta clave en maniobras de precisión o navegación en formación.

El diseño de estos elementos se ha realizado buscando un equilibrio entre claridad e inmersión, evitando sobrecargar la pantalla con información innecesaria. El objetivo es que el usuario disponga de los datos esenciales en todo momento, pero sin perder la sensación de estar dentro del entorno de navegación.

Por otro lado, se ha implementado un sistema de pausa accesible mediante la tecla ESC, que permite al usuario detener la simulación en cualquier momento. Este menú de pausa, también desarrollado mediante widgets, ofrece opciones como continuar el ejercicio, reiniciarlo o regresar al menú principal.

Esta funcionalidad resulta especialmente útil en un entorno de entrenamiento, donde el usuario puede necesitar detener la simulación para analizar una situación o ajustar parámetros.

Finalmente, los widgets también se emplean para mostrar los resultados al finalizar cada ejercicio. Una vez completada la maniobra, el simulador presenta un informe que resume el desempeño del usuario, evaluando aspectos como la precisión en la ejecución, el cumplimiento de los objetivos o posibles errores cometidos. Este sistema de retroalimentación permite al usuario analizar su actuación y mejorar en intentos posteriores, reforzando el carácter formativo del simulador.

En conjunto, el uso de widgets ha permitido construir una interfaz coherente y funcional, que acompaña al usuario en todas las fases del simulador: desde la configuración inicial, pasando por la ejecución de los ejercicios, hasta la evaluación final. Todo ello contribuye a una experiencia más completa, en la que la información está siempre disponible de manera clara y accesible.

3.6.9 Sistema de sonido y retroalimentación auditiva

El apartado de sonido y descripciones por audio constituye uno de los elementos más relevantes del simulador desde el punto de vista de la inmersión del usuario, ya que permite enriquecer la experiencia más allá de lo visual e introducir una dimensión sensorial adicional que aproxima el entorno virtual a una situación real de navegación.

En primer lugar, se ha prestado especial atención a la implementación de sonidos ambientales, entre los que destaca el sonido del mar, que aporta una base constante al entorno y refuerza la sensación de estar navegando. A este elemento se suman otros sonidos dinámicos, como el ruido de los motores de la embarcación, cuya intensidad y tono varían en función de las revoluciones ordenadas a las máquinas. Este detalle no solo mejora la percepción de realismo, sino que también proporciona al usuario una referencia auditiva sobre el comportamiento del barco, permitiendo intuir, por ejemplo, si se está aumentando o reduciendo la potencia sin necesidad de consultar instrumentos visuales.

Este tipo de retroalimentación sonora resulta especialmente útil en situaciones en las que el usuario debe mantener la atención en el entorno exterior o en la maniobra, ya que permite complementar la información visual con estímulos auditivos.

De esta manera, el sonido no se limita a ser un elemento decorativo que acompaña la experiencia, sino que cumple también una función informativa dentro del simulador haciéndonos entender la situación en la que estamos.

Por otro lado, se ha tomado la decisión de reducir al mínimo el uso de texto en pantalla, optando en su lugar por la implementación de un sistema de mensajes narrados por voz.

Este enfoque responde tanto a criterios de inmersión como de usabilidad. En lugar de mostrar instrucciones o avisos mediante texto, el simulador utiliza una voz que guía al usuario, explicando el funcionamiento de cada ejercicio o proporcionando indicaciones durante su desarrollo. Por ejemplo, en el ejercicio de remolque, el sistema puede emitir mensajes como *“estacha de remolque dada y afirmada en ambos buques, listos para dar adelante”*, reproduciendo así la forma en la que se comunicarían estas acciones en una situación real a bordo. Este tipo de mensajes contribuye a crear un entorno más creíble, en el que la información se transmite de manera similar a como ocurriría en la práctica real, donde las órdenes y confirmaciones se comunican verbalmente entre los miembros de la dotación.

Además, el uso de audio presenta una ventaja importante desde el punto de vista operativo: permite al usuario recibir información sin necesidad de apartar la vista del entorno ni interrumpir la maniobra para leer texto. En ejercicios que requieren atención constante, como los de navegación o aproximación, tener que leer instrucciones puede suponer una distracción significativa. Al utilizar mensajes de voz, el usuario puede mantenerse concentrado en la tarea que está realizando mientras recibe la información necesaria de forma natural.

En conjunto, la integración del sonido ambiental y de las descripciones por audio permite que el simulador ofrezca una experiencia mucho más completa, en la que el usuario no solo ve el entorno, sino que también lo percibe y lo interpreta a través del oído, acercándose así a las condiciones reales de navegación. Este enfoque refuerza tanto la inmersión como la eficacia del simulador como herramienta de entrenamiento.

3.6.10 Técnicas de optimización del rendimiento (LODs y Nanite)

En el desarrollo del simulador se ha prestado especial atención a los aspectos relacionados con el rendimiento y la optimización, ya que, al tratarse de un entorno amplio, con múltiples elementos en pantalla (embarcaciones, costa, señales marítimas, efectos de agua, etc.), resulta fundamental garantizar una ejecución fluida en todo momento. Para ello, se han empleado distintas técnicas disponibles en Unreal Engine 5, entre las que destacan el uso de niveles de detalle (LOD) y la tecnología Nanite.

Por un lado, los niveles de detalle o LOD (Level of Detail) consisten en la creación de varias versiones de un mismo modelo tridimensional con diferente complejidad geométrica. De este modo, cuando un objeto se encuentra cerca de la cámara, se utiliza una versión con mayor número de polígonos y, por tanto, mayor detalle. Sin embargo, a medida que el objeto se aleja, el sistema sustituye automáticamente esa versión por otras más simples, con menor número de vértices y caras. Este cambio es prácticamente imperceptible para el usuario, pero permite reducir de forma considerable la carga de procesamiento.

En el caso de este simulador, los LODs se han aplicado a numerosos elementos del entorno, como embarcaciones, estructuras portuarias, balizas o incluso ciertos elementos de la costa. Dado que en navegación es habitual tener una gran cantidad de objetos visibles a distintas distancias, el uso de LODs permite que el sistema solo dedique recursos a aquellos elementos que realmente requieren un alto nivel de detalle en cada momento. Esto contribuye a mantener una tasa de rendimiento estable, especialmente en situaciones donde el campo de visión es amplio. Por otro lado, también se ha hecho uso de la tecnología Nanite, una de las principales innovaciones introducidas en Unreal Engine 5. Nanite permite gestionar modelos con una gran cantidad de geometría de forma eficiente, automatizando en gran medida el proceso de optimización. En lugar de depender únicamente de versiones simplificadas del modelo, Nanite se encarga de mostrar en cada momento únicamente los detalles necesarios en función de la distancia y la visibilidad del objeto.

Esto resulta especialmente útil en elementos que pueden tener cierta complejidad geométrica, donde sería costoso gestionar manualmente múltiples niveles de detalle. Gracias a Nanite, estos modelos pueden mantener un buen nivel visual sin penalizar el rendimiento, ya que el propio sistema optimiza automáticamente qué partes del modelo deben renderizarse con mayor o menor detalle.

La combinación de ambas técnicas, LOD tradicionales y Nanite, permite alcanzar un equilibrio adecuado entre calidad visual y eficiencia, algo fundamental en un simulador de estas características. Mientras que los LODs ofrecen un control directo sobre la simplificación de modelos, Nanite aporta una solución más automatizada para la gestión de geometría compleja.

En conjunto, la utilización de estas tecnologías ha permitido que el simulador funcione de manera fluida incluso en escenarios con una elevada carga visual, garantizando una experiencia estable para el usuario sin comprometer en exceso el nivel de detalle del entorno.

3.6.11 Sistema de control del usuario y movimiento libre

3.6.11.1 Concepto de movimiento libre sobre la embarcación

En lo relativo al control de la embarcación, se ha desarrollado un sistema de control del usuario dentro de la embarcación, que permite al jugador desplazarse libremente por el interior y exterior del barco, añadiendo así una capa adicional de inmersión y realismo. A diferencia de otros simuladores más limitados a una única vista fija, en este caso se ha optado por ofrecer una experiencia más completa, en la que el usuario puede moverse por la cubierta y adoptar diferentes perspectivas durante la navegación.

Este sistema se ha desarrollado dentro de Unreal Engine 5, implementando un personaje controlable que se encuentra “embarcado” en la lancha. El usuario puede caminar libremente por distintas zonas, incluyendo el puente de mando, desde donde se controla la embarcación, así como por otras áreas de la cubierta, tanto interiores como exteriores. Esto permite, por ejemplo, salir al exterior para observar el entorno desde otro ángulo o comprobar visualmente la situación de la maniobra desde diferentes puntos del barco (véase esta mecánica en la Figura 3-30).



Figura 3-30 Caminando en primera persona. Exterior de la embarcación (Elaboración propia)

Además, el sistema permite que la embarcación pueda ser gobernada desde distintas posiciones, no limitándose exclusivamente al puesto del puente. Esto aporta flexibilidad al usuario y refuerza la sensación de estar dentro de un entorno interactivo real, donde no todo está restringido a una única cámara o punto de vista.

De forma complementaria, el simulador incluye la posibilidad de alternar en cualquier momento con una vista aérea, lo que permite al usuario obtener una perspectiva global de la situación.

Esta vista resulta especialmente útil en ejercicios de precisión o durante el aprendizaje, ya que facilita la comprensión de la posición relativa de la embarcación respecto al entorno o a otros elementos. El cambio entre vista en primera persona y vista aérea se realiza de manera fluida, permitiendo adaptarse a las necesidades de cada momento.

Por otro lado, se ha implementado un sistema de seguridad anticaída, pensado para evitar situaciones no deseadas derivadas del movimiento libre del personaje.

En condiciones normales, el usuario no puede caer al agua, ya que se han definido colisiones específicas en la geometría del barco que actúan como barreras invisibles, manteniendo al jugador dentro de la cubierta. Estas colisiones están diseñadas para “enjaular” al personaje dentro de los límites de la embarcación sin afectar negativamente a la experiencia de movimiento.

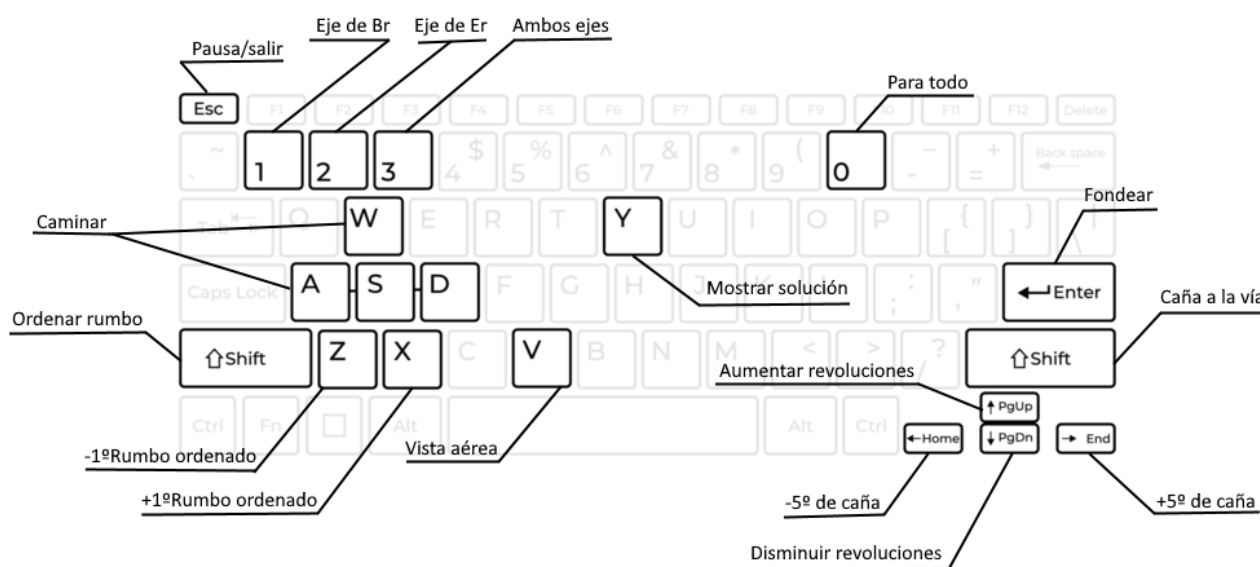
No obstante, como medida adicional de seguridad, se ha desarrollado un sistema que detecta si el usuario abandona involuntariamente la embarcación, ya sea por un fallo puntual o por una situación no prevista. En caso de que esto ocurra, el simulador reconoce que el personaje ha caído al agua y lo reposiciona automáticamente de forma inmediata sobre la embarcación, devolviéndolo a una zona

segura. Este mecanismo garantiza que la simulación no se vea interrumpida y que el usuario pueda continuar el ejercicio sin problemas.

En conjunto, este sistema de movimiento y control del personaje contribuye a mejorar significativamente la inmersión dentro del simulador, permitiendo una interacción más natural con el entorno y ofreciendo al usuario múltiples formas de observar y gestionar la navegación, al mismo tiempo que se mantienen mecanismos de seguridad que aseguran una experiencia estable.

3.6.11.2 Control de usuario y gobierno de la embarcación

El simulador incorpora un sistema completo de manejo del barco, control del personaje y movimiento libre, diseñado para ofrecer una experiencia que combine realismo operativo con accesibilidad, permitiendo al usuario interactuar con la embarcación de forma natural dentro del entorno de Unreal Engine 5. (Véase en la Figura 3-31, los distintos controles del programa).



(1/2/3 deberán permanecer pulsados mientras se pulsa UP/DOWN para aumentar o disminuir revoluciones)
 Para ordenar un rumbo se pulsará Shift mientras miramos por la cámara o alidada al rumbo deseado
 Click derecho mantenido para emplear los prismáticos
 Click izquierdo mantenido (sobre la alidada) para emplear la alidada

Figura 3-31 Controles del programa (Elaboración propia)

En primer lugar, el usuario controla su personaje mediante el esquema clásico de movimiento con las teclas W, A, S y D, lo que le permite desplazarse libremente por la cubierta de la embarcación. Este movimiento no está limitado al puente de mando, sino que permite recorrer distintas zonas del barco, incluso todos los exteriores, reforzando la sensación de presencia dentro del entorno.

En cuanto al control de la propulsión, el sistema se ha diseñado para simular el manejo de una embarcación con dos ejes (babor y estribor). Para ello, se han definido tres modos de control:

- Pulsando la tecla 1, cualquier orden afecta únicamente al eje de babor.
- Pulsando la tecla 2, las órdenes se aplican exclusivamente al eje de estribor.
- Pulsando la tecla 3, las órdenes afectan simultáneamente a ambos ejes.

Este sistema permite tanto un control conjunto como independiente de los motores, lo cual resulta especialmente útil en maniobras de precisión.

Las flechas arriba y abajo se emplean para aumentar o disminuir las revoluciones de los motores seleccionados, permitiendo controlar la potencia de la embarcación. El rango de funcionamiento se ha establecido entre -600 y 2100 revoluciones, mismos límites de la embarcación real, lo que incluye tanto marcha atrás como avance. Por su parte, la tecla 0 permite parar ambas máquinas de forma inmediata, simulando una orden directa de parada.

El control del timón se realiza mediante las flechas izquierda y derecha, que permiten modificar su ángulo en incrementos de 5 grados, dentro de un rango de -30 a +30 grados. Este sistema facilita un control progresivo del rumbo. Además, la tecla Shift derecho permite llevar el timón directamente a la posición de timón al medio o caña a la vía, lo cual resulta útil para estabilizar la navegación tras una maniobra.

El simulador incluye también accesos directos a distintas herramientas de apoyo. La tecla Y permite activar o desactivar las ayudas o soluciones visuales, mientras que la tecla V activa la vista aérea, proporcionando una perspectiva global del entorno.

Uno de los sistemas más interesantes es el de orden de rumbo al timonel. Para ello, el usuario debe mirar en la dirección deseada y pulsar la tecla Shift, lo que establece ese rumbo como rumbo ordenado. Este sistema resulta especialmente útil cuando se combina con la alidada, ya que permite visualizar previamente la dirección exacta antes de emitir la orden. De esta forma, se pueden realizar maniobras más precisas basadas en referencias reales.

Para ajustes finos, se han implementado las teclas Z y X, que permiten incrementar o disminuir el rumbo ordenado en pasos de 1 grado, facilitando microcorrecciones durante maniobras delicadas como el aprovisionamiento o las formaciones.

En ejercicios específicos, como el de fondeo, se utiliza la tecla ENTER para dar la orden de hacer fondo, integrando así los controles dentro de la lógica de cada maniobra.

En cuanto a la interacción con elementos del entorno, el uso del ratón se ha simplificado para centrarse en funciones concretas. El click izquierdo mantenido permite interactuar con objetos como la alidada, pudiendo rotarla libremente mediante el movimiento del ratón. Por otro lado, el click derecho mantenido activa un sistema de zoom tipo prismáticos, que permite observar el entorno con mayor detalle, facilitando la identificación de referencias o señales.

Finalmente, la tecla ESC abre el menú de pausa, desde donde el usuario puede salir de la simulación o consultar nuevamente los controles mediante un widget informativo.

En conjunto, este sistema de control combina movimiento libre, manejo detallado de la embarcación y herramientas de apoyo, permitiendo al usuario desenvolverse dentro del simulador de forma precisa y flexible, adaptándose tanto a maniobras complejas como a la navegación general.

3.6.12 Sistemas de colisiones

3.6.12.1 Colisiones entre embarcaciones

El simulador incorpora un sistema de colisiones entre embarcaciones diseñado para reforzar uno de los principios fundamentales de la navegación: la prevención de abordajes.

En el entorno desarrollado, todas las embarcaciones presentes, tanto la controlada por el usuario como el resto de tráfico civil o buques implicados en ejercicios, disponen de un sistema de colisión activo, basado en volúmenes (*colliders*) que representan su presencia física dentro del espacio de simulación en Unreal Engine 5. Esto implica que el usuario puede colisionar de forma real con cualquier otra embarcación presente en el entorno. No se trata únicamente de un efecto visual, sino de una

interacción física detectada por el sistema, que reconoce el contacto entre dos objetos dentro del mundo del simulador.

Este comportamiento es intencionado, ya que permite introducir consecuencias directas ante una mala gestión de la maniobra o una falta de atención al entorno.

En el momento en que se detecta una colisión, el simulador interpreta el evento como un fallo crítico en la ejecución del ejercicio. Como resultado, el ejercicio se da automáticamente por incorrecto y se detiene de inmediato, obligando al usuario a reiniciarlo si desea volver a intentarlo (véase la Figura 3-32, ejemplo de colisión con un pesquero). Esta decisión responde a un criterio claro: en navegación real, los abordajes constituyen una de las situaciones más peligrosas y deben evitarse en todo momento.

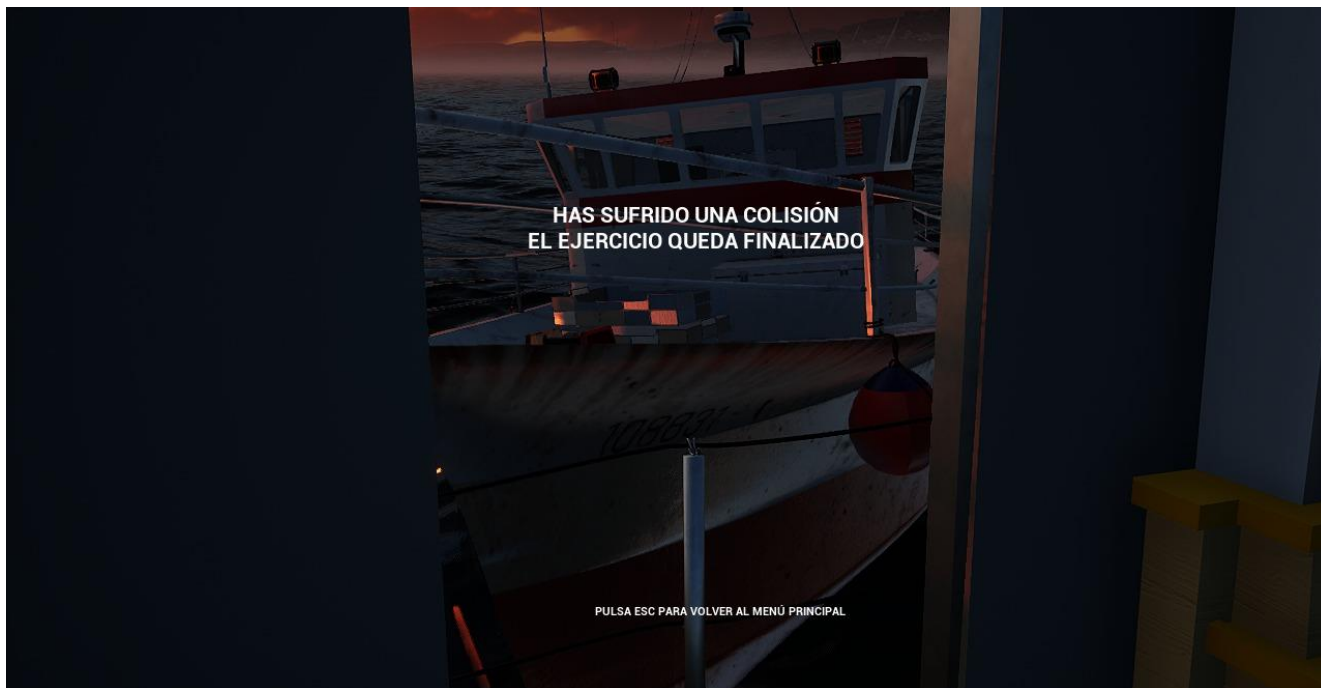


Figura 3-32 Imagen en primera persona de una colisión con un pesquero (Elaboración propia)

Desde el punto de vista formativo, este sistema tiene una función muy importante. No solo penaliza el error, sino que obliga al usuario a mantener una conciencia situacional constante, prestando atención a la posición, rumbo y velocidad de las demás embarcaciones. Esto resulta especialmente relevante en ejercicios donde interviene tráfico civil, navegación en canal o maniobras cercanas a otros buques.

Además, este enfoque refuerza la aplicación práctica del Reglamento Internacional para Prevenir Abordajes en la Mar, ya que el usuario debe anticipar posibles situaciones de abordaje y actuar en consecuencia para evitarlas.

La simulación no permite “atravesar” otras embarcaciones ni ignorar su presencia, lo que obliga a aplicar correctamente normas como la prioridad de paso, las maniobras de evasión o la reducción de velocidad en situaciones comprometidas. En conjunto, la implementación de colisiones entre barcos aporta un componente esencial de realismo al simulador, al mismo tiempo que introduce una disciplina estricta en la ejecución de las maniobras, alineada con los principios de seguridad marítima. Esto convierte cada ejercicio no solo en una práctica técnica, sino también en un entrenamiento en responsabilidad y prevención dentro del entorno de navegación.

3.6.12.2 Colisiones con costa y bajos

El simulador incorpora un sistema de colisiones con la costa y con bajos, diseñado para reproducir de forma realista uno de los riesgos más importantes en la navegación: la posibilidad de encallar o impactar contra tierra.

Este sistema no solo añade realismo al entorno, sino que también refuerza el carácter formativo del simulador, obligando al usuario a prestar atención constante a la profundidad y a su posición respecto a la costa.

A diferencia de una simple delimitación visual del terreno, las colisiones no se basan únicamente en la línea de costa visible, sino que han sido diseñadas y modeladas en tres dimensiones siguiendo una carta náutica real. Durante su implementación, se ha tenido en cuenta en todo momento la sonda (profundidad) indicada en la carta, reproduciendo de forma aproximada las zonas navegables y aquellas que representan un peligro para la embarcación (Figura 3-33, imagen visual de su desarrollo). Esto implica que no solo la costa firme constituye un obstáculo, sino también los bajos y zonas de poca profundidad, que en la realidad pueden resultar incluso más peligrosos por no ser siempre visibles.

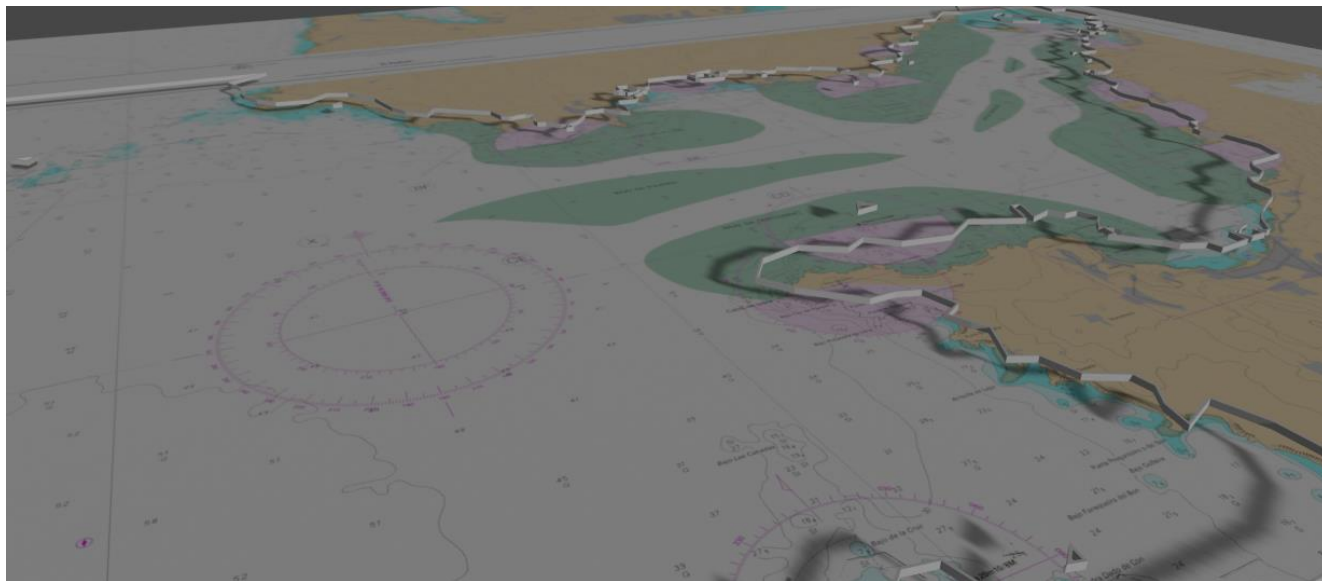


Figura 3-33 Colisiones de la costa sobre una carta de entrenamiento (Elaboración propia)

El proceso de modelado de estas zonas se realizó ajustando las colisiones en función de los valores de profundidad, estableciendo como límite aquellas áreas donde la sonda se considera insuficiente para una navegación segura.

De este modo, el simulador reproduce el efecto de encallar cuando la embarcación entra en una zona no navegable, incluso aunque visualmente no exista una costa evidente.

Como consecuencia, el usuario puede colisionar tanto contra tierra firme como contra fondos poco profundos o bajos, lo que introduce un elemento adicional de dificultad en ejercicios como la canal dragada, el fondeo o la navegación costera. Esta implementación obliga a mantener una vigilancia constante sobre la derrota y a interpretar correctamente el entorno, especialmente en situaciones donde la profundidad no es evidente a simple vista. En caso de producirse una colisión con la costa o con un bajo, el simulador considera que se ha producido un fallo grave de navegación, por lo que el ejercicio se da por finalizado de manera inmediata. Este comportamiento refleja la gravedad de este tipo de incidentes en la vida real, donde un encallamiento puede tener consecuencias importantes tanto para la embarcación como para la seguridad de la tripulación.

Debido a este nivel de realismo, se recomienda que el usuario utilice el simulador acompañado de una carta náutica real o equivalente en formato físico o digital, especialmente en ejercicios más complejos.

De esta forma, puede consultar las sondas, identificar zonas peligrosas y planificar su derrota de manera similar a como lo haría en una situación real. Esta recomendación refuerza el enfoque del simulador como herramienta de aprendizaje, integrando el uso de recursos tradicionales de navegación con un entorno virtual interactivo.

En conjunto, el sistema de colisiones con costa y bajos convierte la navegación dentro del simulador en una experiencia más exigente y realista, en la que el usuario debe aplicar criterios de seguridad y planificación, evitando zonas peligrosas y manteniendo en todo momento el control de su posición respecto al entorno.

4 RESULTADOS

4.1 Introducción general a los resultados

El simulador desarrollado se encuentra actualmente en una fase avanzada de pulido, en la que se están afinando los últimos detalles tanto a nivel de rendimiento como de comportamiento general del sistema.

A pesar de no tratarse todavía de una versión completamente final, el estado actual del proyecto permite considerarlo como un producto plenamente funcional y empaquetado, con un nivel de desarrollo suficiente para realizar pruebas reales en entornos controlados.

En lo relativo al rendimiento, el simulador ha sido probado con éxito en distintos equipos de sobremesa y dispositivos portátiles de gama alta, donde ha demostrado un funcionamiento fluido y estable, sin presentar problemas significativos ni caídas de rendimiento que afecten a la experiencia de usuario. Estos resultados permiten validar la correcta implementación de las técnicas de optimización empleadas durante el desarrollo. Como siguiente paso, se plantea su adaptación y prueba en dispositivos portátiles de gama media, con el objetivo de comprobar su comportamiento en entornos con menor capacidad de procesamiento. Se espera que, gracias a las optimizaciones realizadas, el simulador pueda ejecutarse correctamente también en este tipo de plataformas.

Desde un punto de vista global, los resultados obtenidos permiten afirmar que el sistema desarrollado cumple con los objetivos principales planteados al inicio del proyecto. El simulador permite gobernar la embarcación, interactuar con su entorno, reproducir distintas maniobras y ejercicios de navegación, así como operar en un escenario georreferenciado y visualmente coherente.

En este capítulo se presentan los principales resultados obtenidos, organizados en tres bloques: los resultados de modelado, los resultados de programación y los resultados de simulación e interacción con el sistema.

4.2 Resultados de modelado

4.2.1 Resultado final del modelo tridimensional de la embarcación

Uno de los principales resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto ha sido la creación de un modelo tridimensional funcional y visualmente representativo de la embarcación empleada como referencia, la Rodman 66 de la Armada. El modelo final de la lancha reproduce tanto la geometría general del casco como los elementos más característicos de su superestructura, cubierta e interiores, permitiendo identificar de manera clara sus distintas zonas y componentes principales. A pesar de las limitaciones temporales del proyecto, el nivel de detalle alcanzado puede considerarse elevado dentro del contexto de un simulador interactivo en tiempo real, especialmente si se tiene en cuenta que el

modelo no debía cumplir únicamente una función estética, sino también integrarse correctamente dentro del motor gráfico y del sistema de físicas. Por este motivo, durante el proceso de modelado se buscó en todo momento un equilibrio entre fidelidad visual, viabilidad temporal y rendimiento. A continuación, se muestran distintos renderizados del modelo final de la lancha, en los que puede apreciarse el grado de detalle alcanzado tanto en la geometría exterior como en algunos elementos secundarios incorporados durante la fase de detallado. (Véase: Figura 4-1, Figura 4-2 y Figura 4-3).

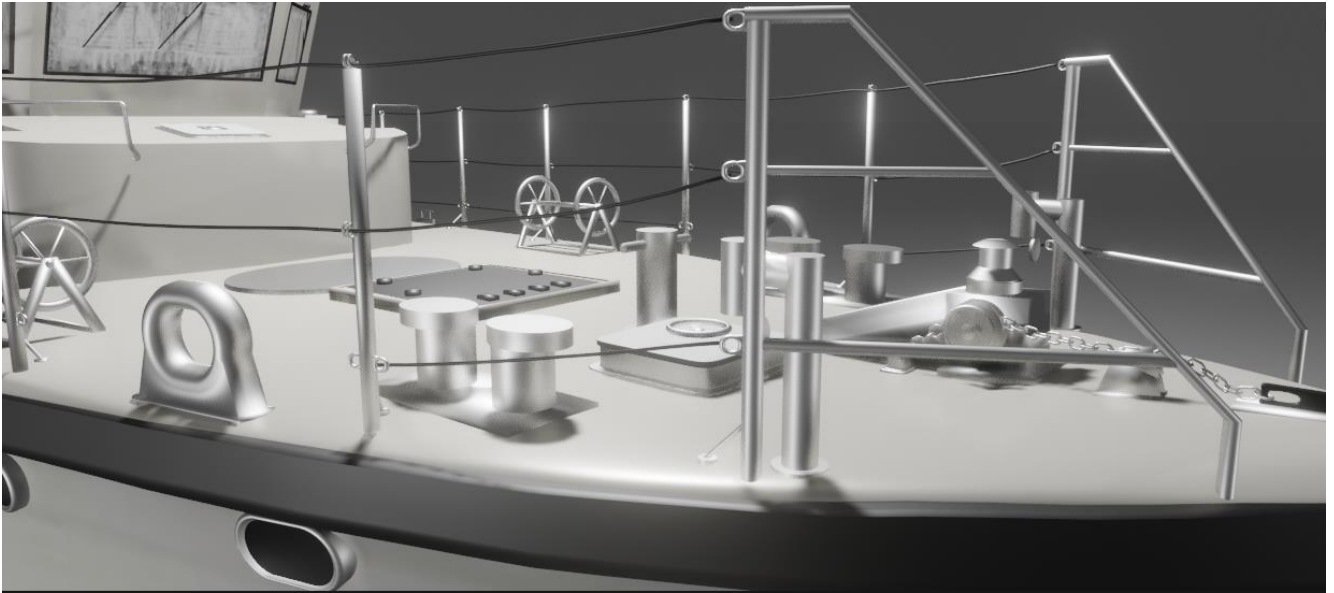


Figura 4-1 Detalles de castillo en Blender (Elaboración propia)



Figura 4-2 Detalles de toldilla en Blender (Elaboración propia)



Figura 4-3 Rodman 66 de la Armada en Blender (Elaboración propia)

4.2.2 Resultado del modelado interior y elementos funcionales

Además del modelado exterior, se desarrolló también una representación funcional del interior del puente de mando, con especial atención a aquellos elementos que debían tener una utilidad directa dentro de la simulación. Entre ellos destacan distintos instrumentos, paneles y, de forma particular, la alidada, cuya inclusión resulta relevante no solo desde el punto de vista visual, sino también operativo, al permitir la realización de demoras dentro de determinados ejercicios.

Este enfoque permitió que el modelado no se limitase a una mera representación visual de la embarcación, sino que pasase a formar parte activa del sistema de simulación y entrenamiento. En la Figura 4-4 se muestra una vista del interior del puente de mando y de algunos de los elementos instrumentales incorporados.



Figura 4-4 Interior de la Rodman 66 en Blender (Elaboración propia)

4.2.3 Resultado del entorno de simulación

Otro de los resultados destacables del proyecto ha sido la creación de un entorno navegable basado en la Ría de Pontevedra, complementado con elementos geográficos, ayudas a la navegación e infraestructuras portuarias que permiten situar el simulador en un escenario reconocible y útil desde el punto de vista formativo.

La integración del mapa costero, la atmósfera, el sistema de mar, las ayudas a la navegación y diversos elementos modelados manualmente ha permitido obtener un escenario visualmente coherente y suficientemente detallado para el desarrollo de maniobras y ejercicios. Este entorno no solo cumple una función estética, sino que constituye una parte esencial de la experiencia de navegación, ya que aporta referencias reales, puntos notables y limitaciones espaciales que condicionan la maniobra del usuario. En la Figura 4-5 y la Figura 4-6 se presentan distintas vistas del entorno de simulación, tanto en condiciones diurnas como nocturnas.



Figura 4-5 Ría de Pontevedra vista desde cubierta (Elaboración propia)



Figura 4-6 Imagen nocturna de un pesquero y una lancha (Elaboración propia)

4.3 Resultados de programación

4.3.1 Implementación funcional de los ejercicios

Desde el punto de vista de la programación, el resultado principal del proyecto ha sido la implementación de un conjunto de ejercicios navales interactivos plenamente funcionales, desarrollados sobre un sistema de físicas ajustado para reproducir de forma coherente el comportamiento dinámico de la embarcación.

Los ejercicios desarrollados permiten al usuario interactuar activamente con el simulador, tomar decisiones de maniobra y recibir una respuesta del sistema coherente con los parámetros físicos y ambientales definidos.

Este resultado constituye sin duda alguna uno de los aspectos más relevantes del proyecto, ya que transforma el entorno virtual en una herramienta con valor formativo real que permitirá al usuario ya no navegar, sino realizar complejas maniobras que sin duda alguna repercutirán en un notorio aprendizaje y mejora del oficial.

Entre los ejercicios implementados en la versión actual del simulador se encuentran el de hombre al agua, fondeo de precisión, remolque, aprovisionamiento en la mar, canal dragada y navegación en formaciones.

Cada uno de ellos incorpora objetivos, criterios de éxito o fallo, así como una lógica de funcionamiento específica adaptada al tipo de maniobra que se pretende entrenar.

4.3.2 Resultados visuales de los ejercicios implementados

A continuación, se muestran diferentes capturas correspondientes a varios de los ejercicios programados mientras se llevan a cabo en una sesión de simulación cotidiana, siendo esta no una sección de imágenes destacadas, sino cotidianas desde la perspectiva del usuario. (Véase: Figura 4-7, Figura 4-8, Figura 4-9, Figura 4-10 y Figura 4-11)



Figura 4-7 Ejercicio de hombre al agua. Abatiendo hacia el náufrago (Elaboración propia)



Figura 4-8 Ejercicio de fondeo. Fase final de aproximación (Elaboración propia)



Figura 4-9 Ejercicio de remolque nocturno (Elaboración propia)



Figura 4-10 (Ejercicio de formaciones durante el ocaso (Elaboración propia)



Figura 4-11 Ejercicio de canal dragada en condiciones nocturnas (Elaboración propia)

4.3.3 Secuencias de ejecución de maniobras

A continuación, la Figura 4-12 se muestra, a modo de ejemplo, una secuencia correspondiente al ejercicio de aprovisionamiento, donde puede apreciarse la progresión de la maniobra desde la fase inicial hasta su estabilización o resolución final.



Figura 4-12 Ejercicio de aprovisionamiento. Distintas fases del ejercicio (Elaboración propia)

4.4 Resultados de simulación e interacción con el sistema

4.4.1 Interfaz general del simulador

Uno de los resultados más relevantes del proyecto desde el punto de vista de la experiencia de usuario ha sido el desarrollo de una interfaz funcional e integrada en la simulación, capaz de proporcionar información útil sin interferir excesivamente con la visibilidad del entorno.

La interfaz del simulador muestra en tiempo real distintos parámetros relacionados con el estado de la embarcación y del ejercicio en curso, permitiendo al usuario tomar decisiones de maniobra con información contextual suficiente. Entre los datos visualizados se incluyen el estado de las máquinas, la posición del timón, el rumbo ordenado, el rumbo real, la velocidad y, en determinados ejercicios, información adicional como distancias relativas o ayudas específicas. En la Figura 4-13 se muestra una captura general de la interfaz durante una sesión de simulación.



Figura 4-13 Vista en 1ª persona con interfaz en pantalla (Elaboración propia)

4.4.2 Interacción del usuario con el simulador

La interacción con el sistema se ha diseñado de forma que el usuario pueda controlar tanto la embarcación como distintos elementos auxiliares del simulador de forma intuitiva. El sistema permite gobernar correctamente los ejes de propulsión de forma conjunta o independiente, actuar sobre el timón, ordenar rumbos, activar ayudas visuales, cambiar de vista e interactuar con instrumentos como la alidada.

De forma general, las principales acciones disponibles para el usuario son las siguientes:

- Control de máquinas: permite aumentar, disminuir o detener las revoluciones de los ejes seleccionados.
- Control del timón: permite modificar el ángulo de la pala para realizar maniobras de giro.
- Vista aérea y ayudas visuales: facilitan el análisis de maniobras y la comprensión de la solución ideal en determinados ejercicios.
- Interacción con instrumentos: como la alidada, empleada para la toma de demoras.

- Sistema de pausa y menús: permite reiniciar ejercicios, consultar opciones o regresar al menú principal.

Cada uno de estos elementos tiene una repercusión directa sobre la simulación, ya que modifica el comportamiento físico de la embarcación o la forma en que el usuario interpreta el entorno. De este modo, la interfaz no actúa únicamente como elemento visual, sino como parte activa del proceso de aprendizaje e interacción.

4.4.3 Repercusión de la configuración en la simulación

La interfaz de configuración inicial permite además modificar correctamente distintos parámetros del escenario antes de comenzar la simulación, como la hora del día, la presencia de viento, la corriente, el tipo de ejercicio o el tráfico civil. La posibilidad de alterar estas condiciones tiene una repercusión directa en el comportamiento de la simulación, permitiendo adaptar el nivel de dificultad y reproducir distintos escenarios operativos.

Este sistema convierte el simulador en una herramienta flexible, capaz de ajustarse a diferentes necesidades formativas y de permitir la repetición de una misma maniobra bajo condiciones variables, lo cual incrementa notablemente su valor como sistema de entrenamiento.

4.5 Validación del sistema y valoración global

Desde el punto de vista formativo, el simulador ha sido sometido a diversas revisiones por parte de personal con experiencia directa en el ámbito naval y en esta embarcación en particular, la Rodman 66, tras meses y años de realizar las mismas maniobras reales en el mismo escenario geográfico.

En concreto, ha sido evaluado por varios alféreces de fragata, así como por guardiamarinas de segundo, quienes han podido interactuar con el sistema, comparar y valorar su funcionamiento. La percepción general obtenida ha sido muy positiva, destacando especialmente su utilidad potencial como herramienta de apoyo en la formación de futuras promociones.

Los usuarios han señalado que el simulador permite comprender de forma práctica conceptos que, en muchas ocasiones, resultan más abstractos en su aprendizaje teórico, lo que refuerza su valor dentro del proceso formativo. Asimismo, se ha valorado especialmente la posibilidad de recrear ejercicios reales en un entorno virtual controlado y portátil, considerando esta capacidad como una ventaja significativa de cara a la preparación previa de maniobras reales.

A nivel global, se considera que el simulador se encuentra en una fase equivalente a una versión beta, en la que el sistema es completamente funcional pero aún susceptible de mejoras y ampliaciones. No obstante, el potencial de desarrollo que presenta es elevado, tanto en términos de ampliación de funcionalidades como de mejora del realismo y la interacción.

Resulta especialmente relevante destacar que la totalidad de este proyecto ha sido desarrollada en un periodo aproximado de dos meses y medio, y llevada a cabo íntegramente por una única persona. Este hecho pone en valor el alcance conseguido en un tiempo limitado y sugiere que, en caso de disponer de mayores recursos, ya sea en tiempo o en equipo de desarrollo, los resultados podrían evolucionar de forma muy significativa, dando lugar a una herramienta de entrenamiento aún más completa y robusta, adaptable no solo a este tipo de embarcación, sino también a cualquier otra clase de buque y a distintos escenarios operativos.

4.6 Video demostrativo del simulador

Como cierre del presente capítulo, se incluye a continuación un código QR que permite acceder a la galería de vídeos del simulador desarrollado. Aquí se mostrará de manera visual el funcionamiento general del sistema, así como distintos ejemplos de las maniobras, ejercicios y funcionalidades implementadas a lo largo del proyecto.

Este material audiovisual complementa la explicación técnica recogida en la memoria, permitiendo observar de forma directa el comportamiento del simulador en funcionamiento y facilitando una mejor valoración global del resultado alcanzado. Se puede acceder al video referido pulsando “[aquí](#)” o escaneando el código adjunto a continuación.

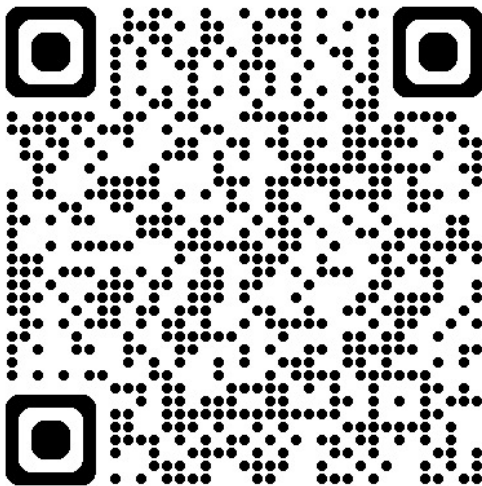


Figura 4-14 Código QR de galería de videos del simulador (Elaboración propia)

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

El desarrollo de este simulador ha permitido abordar de manera práctica la integración de múltiples disciplinas dentro de un único sistema, combinando modelado 3D, programación de físicas, diseño de interfaces e implementación de entornos realistas en tiempo real mediante Unreal Engine 5. A lo largo del proyecto, se ha conseguido construir una herramienta funcional capaz de reproducir, con un grado notable de fidelidad, el comportamiento de una embarcación tipo lancha Rodman 66 en distintos escenarios operativos.

Uno de los principales logros del proyecto ha sido la correcta implementación de un sistema de físicas coherente, ajustado a partir de datos y observaciones reales, lo que ha permitido reproducir maniobras complejas como la ciaboga, la navegación en marcha atrás o los desplazamientos laterales sin recurrir a soluciones predefinidas. Este enfoque ha dado lugar a un comportamiento emergente del sistema, en el que la respuesta de la embarcación depende directamente de las acciones del usuario, reforzando el realismo y el valor formativo del simulador. Asimismo, el proyecto ha incorporado un conjunto amplio de sistemas adicionales que enriquecen la experiencia global, como el tráfico civil, la implementación de normativa RIPAM mediante luces y marcas, el sistema de ayudas visuales, la interacción mediante widgets o el uso de sonido y retroalimentación auditiva. Todos estos elementos contribuyen a generar un entorno más completo, en el que el usuario no solo ejecuta maniobras, sino que también interpreta el entorno y toma decisiones en condiciones similares a las reales.

Desde el punto de vista formativo, el simulador ha demostrado tener un alto potencial como herramienta de apoyo, permitiendo reproducir ejercicios reales en un entorno controlado y repetible. La validación realizada por personal con experiencia directa en la navegación y en la propia embarcación confirma la utilidad del sistema, especialmente en lo relativo a la comprensión práctica de conceptos de maniobra y navegación.

El simulador se encuentra en un estado plenamente funcional, lo que permite considerarlo como una base sólida sobre la que seguir trabajando. En este sentido, el proyecto no debe entenderse como un producto cerrado, sino como una primera versión con un alto potencial de evolución.

En conjunto, se puede concluir que el simulador cumple los objetivos planteados, ofreciendo una herramienta técnica y formativa que combina realismo, interactividad y capacidad de ampliación, sentando las bases para desarrollos futuros de mayor alcance.

5.2 Líneas futuras de desarrollo

A pesar del nivel de desarrollo alcanzado, el simulador presenta un amplio margen de crecimiento, con múltiples posibilidades de ampliación tanto a nivel técnico como funcional.

En primer lugar, una de las líneas más claras de evolución es la incorporación de nuevos instrumentos y pantallas, como consolas manejables de radares, cartas digitales, pantallas GPS o incluso incorporar cartas tradicionales de papel que puedan desplegarse y manejarse dentro del propio simulador.

Por otro lado, otra de las líneas futuras más inmediatas podría consistir en la incorporación de nuevos entornos geográficos. Actualmente, el simulador se centra en la Ría de Pontevedra, pero gracias al uso de herramientas como Cesium, sería posible integrar otros mapas y escenarios de navegación, ampliando así el abanico de situaciones en las que el usuario puede entrenar.

Del mismo modo, el sistema está preparado para la incorporación de nuevas embarcaciones. Aunque el proyecto se ha desarrollado inicialmente como un simulador de lanchas, su estructura permite adaptarse a otros tipos de buques sin necesidad de rediseñar completamente el sistema, lo que abre la puerta a su expansión hacia simulaciones más complejas y variadas.

Otra posible línea de mejora es la ampliación del sistema de fallos, incorporando nuevas averías tanto a nivel mecánico como instrumental, lo que permitiría enriquecer aún más el componente formativo del simulador, obligando al usuario a enfrentarse a situaciones más exigentes. Además, se plantea la incorporación de nuevos ejercicios, aumentando la variedad de maniobras disponibles y cubriendo un mayor número de escenarios operativos. Esto permitiría adaptar el simulador a distintos niveles de formación y a diferentes necesidades de entrenamiento.

En el ámbito del entorno, también sería posible mejorar la representación de las condiciones meteorológicas y del estado de la mar, incorporando distintos tipos de oleaje, viento variable o condiciones adversas que afecten de manera más compleja al comportamiento de la embarcación.

En cuanto a la señalización marítima, aunque el simulador ya incluye todas las luces principales de la ría, se podría ampliar el nivel de detalle mediante la incorporación de luces costeras secundarias y otros elementos de ayuda a la navegación, reforzando aún más la fidelidad del entorno.

Por último, una de las líneas de desarrollo más interesantes sería la implementación de un modo multijugador, que permita a varios usuarios conectarse simultáneamente y operar distintas embarcaciones dentro del mismo entorno. Esto abriría la posibilidad de realizar maniobras conjuntas, ejercicios de formación en grupo o simulaciones más complejas que involucren la coordinación entre varias unidades, acercando aún más la experiencia a situaciones reales.

En conjunto, todas estas líneas futuras ponen de manifiesto que el simulador desarrollado no solo constituye una herramienta funcional en su estado actual, sino también una base sólida y escalable con un gran potencial de crecimiento en múltiples direcciones.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] T. Akenine-Möller, E. Haines y N. Hoffman, Real-time rendering, 4ª ed., CRC Press, 2018.
- [2] Audacity Team, Audacity manual, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://manual.audacityteam.org> [Último acceso: 29 febrero 2026].
- [3] T. T. Baldwin y J. K. Ford, “Transfer of training: A review and directions for future research,” *Personnel Psychology*, vol. 41, no. 1, pp. 63–105, 1988.
- [4] F. F. Bilotta, R. Caramia, F. P. Paoloni, R. Delfini y G. Rosa, “Impact and implementation of simulation-based training for safety,” *Critical Care Research and Practice*, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2013/805212> [Último acceso: 03 marzo 2026].
- [5] Blender Foundation, Blender documentation, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://docs.blender.org> [Último acceso: 03 marzo 2026].
- [6] D. A. Cook, R. Brydges, B. Zendejas, S. J. Hamstra y R. Hatala, “Technology-enhanced simulation for health professions education: A systematic review and meta-analysis,” *JAMA*, vol. 306, no. 9, pp. 978–988, 2011.
- [7] Epic Games, Unreal Engine documentation, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://docs.unrealengine.com> [Último acceso: 03 marzo 2026].
- [8] J. D. Fletcher, “Education and training technology in the military,” *Science*, vol. 323, no. 5910, pp. 72–75, 2009.
- [9] D. M. Gaba, “The future vision of simulation in health care,” *Quality and Safety in Health Care*, vol. 13, suppl. 1, pp. i2–i10, 2004. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.1136/qhc.13.suppl_1.i2 [Último acceso: 04 marzo 2026].
- [10] J. Gregory, Game engine architecture, 3ª ed., CRC Press, 2018.
- [11] R. T. Hays y M. J. Singer, Simulation fidelity in training system design, Springer, 1989.
- [12] M. Lewis y J. Jacobson, “Game engines in scientific research,” *Communications of the ACM*, vol. 45, no. 1, pp. 27–31, 2002.
- [13] D. Liu, C. Dede, R. Huang y J. Richards, Virtual, augmented, and mixed realities in education, Springer, 2017.
- [14] Ministerio de Defensa, Doctrina para la enseñanza en las Fuerzas Armadas, 2010.

- [15] P. L. Myers, A. W. Starr y B. Mullins, “Flight simulator fidelity, training transfer, and the role of instructors in optimizing learning,” *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, vol. 5, no. 1, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.15394/ijaaa.2018.1203> [Último acceso: 07 marzo 2026].
- [16] NATO, Allied tactical publication (ATP), Volume II, NATO Standardization Office, 2019.
- [17] NATO Science and Technology Organization, Modelling and simulation master plan, 2012.
- [18] NATO Science and Technology Organization, Virtual and augmented reality in defence, 2019.
- [19] Organización Marítima Internacional, Convenio sobre el reglamento internacional para prevenir los abordajes en la mar (RIPAM), 1972.
- [20] Organización Marítima Internacional, STCW convention and code (Standards of training, certification and watchkeeping), 2017.
- [21] J. Radianti, T. A. Majchrzak, J. Fromm y I. Wohlgenannt, “A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education,” *Computers & Education*, vol. 147, 2020.
- [22] J. M. Rolfe y K. J. Staples, *Flight simulation*, Cambridge University Press, 1986.
- [23] E. Salas, C. A. Bowers y L. Rhodenizer, “It is not how much you have but how you use it: Toward a rational use of simulation to support aviation training,” *The International Journal of Aviation Psychology*, vol. 8, no. 3, pp. 197–208, 1998.
- [24] E. Salas, J. L. Wildman y R. F. Piccolo, “Using simulation-based training to enhance management education,” *Academy of Management Learning & Education*, vol. 8, no. 4, pp. 559–573, 2009.
- [25] M. Slater y S. Wilbur, “A framework for immersive virtual environments (FIVE): Speculations on the role of presence in virtual environments,” *Presence*, vol. 6, no. 6, pp. 603–616, 1997.
- [26] M. Van Creveld, *Command in war*, Harvard University Press, 1985.
- [27] M. Zyda, “From visual simulation to virtual reality to games,” *Computer*, vol. 38, no. 9, pp. 25–32, 2005. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/MC.2005.297> [Último acceso: 07 marzo 2026]
- [28] Armada Española, Submarinos. Simuladores. Videos, s. f. [En línea]. Disponible en: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/multimedias/videos/prefLang-es/03submarinos> [Último acceso: 26 marzo 2026].
- [29] National Museum of the United States Air Force, Link Trainer, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.nationalmuseum.af.mil/Visit/Museum-Exhibits/Fact-Sheets/Display/Article/196852/link-trainer/> [Último acceso: 26 marzo 2026].
- [30] Eagle Dynamics, DCS: C-101 Aviojet por AvioDev, s. f. [En línea]. Disponible en: <https://www.digitalcombatsimulator.com/es/shop/modules/aviojet/> [Último acceso: 26 marzo 2026].
- [31] Ejército de Tierra, Simulador de torre “Leopardo”, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://ejercito.defensa.gob.es/multimedia/videos/2020/133-simulador-torre-leopardo.html> [Último acceso: 26 marzo 2026].
- [32] Meta, Meta Quest 3 se lanza este año + precios más bajos y mejoras para Quest 2, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://about.fb.com/es/news/2023/06/meta-quest-3-se-lanza-este-ano-precios-mas-bajos-y-mejoras-para-quest-2/> [Último acceso: 26 marzo 2026].
- [33] Epic Games, Logos & Brand Guidelines, s. f. [En línea]. Disponible en: <https://brand.epicgames.com/d/tq4oRCzEhhpK/logos-brand-guidelines#/logos/splash-screens> [Último acceso: 26 marzo 2026].

- [34] Blender Foundation, Logo, s. f. [En línea]. Disponible en: <https://www.blender.org/about/logo/> [Último acceso: 26 marzo 2026].
- [35] dotPDN LLC, Paint.NET, s. f. [En línea]. Disponible en: <https://www.getpaint.net/> [Último acceso: 26 marzo 2026].
- [36] Audacity Team, Audacity, s. f. [En línea]. Disponible en: <https://www.audacityteam.org/> [Último acceso: 26 marzo 2026].

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS, Y AMBIENTALES

El simulador desarrollado presenta implicaciones positivas desde el punto de vista social y formativo, al constituir una herramienta de apoyo que puede contribuir a mejorar el proceso de enseñanza y adiestramiento de los alumnos.

Su utilización permite reforzar la comprensión práctica de maniobras, procedimientos y situaciones operativas en un entorno controlado, facilitando una preparación progresiva antes de afrontar dichas tareas en condiciones reales.

Desde una perspectiva económica, el empleo de un simulador de estas características puede suponer una optimización de los recursos destinados al entrenamiento, especialmente en las fases iniciales del aprendizaje o en la repetición de ejercicios básicos. La posibilidad de practicar maniobras y procedimientos en un entorno virtual reduce la necesidad de emplear de forma continuada medios reales para tareas formativas elementales, lo que puede contribuir a un uso más eficiente del material disponible. En este sentido, el simulador se plantea como una herramienta complementaria que permite apoyar y reforzar la instrucción práctica.

En el ámbito ambiental, una de las principales ventajas del sistema desarrollado reside en que permite realizar actividades de entrenamiento sin necesidad de consumir combustible real ni operar embarcaciones físicas durante determinadas fases del aprendizaje.

Esto se traduce en una reducción del impacto ambiental asociado al uso de medios navales. Aun así, su función debe entenderse siempre como la de un recurso de apoyo dentro de un modelo de formación más amplio, en el que la práctica real sigue siendo esencial para alcanzar una preparación completa y ajustada a las exigencias del entorno operativo.

Conviene por tanto subrayar, que esta herramienta no pretende sustituir en ningún caso la experiencia adquirida a bordo de embarcaciones reales, sino actuar como un complemento útil dentro del proceso global de formación.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El uso de un simulador como el desarrollado en este proyecto plantea diversas consideraciones éticas y sociales, especialmente en relación con su papel dentro de la formación naval. Entre sus principales aportaciones se encuentra la posibilidad de entrenar maniobras, procedimientos y situaciones operativas en un entorno seguro y controlado, lo que permite al alumno adquirir soltura y familiaridad antes de enfrentarse a una situación real. Esto no solo favorece un aprendizaje más progresivo, sino que también puede contribuir a reducir errores en fases iniciales de instrucción.

Sin embargo, conviene señalar que el simulador no debe entenderse como una sustitución de la experiencia real, sino como una herramienta de apoyo complementaria. Por mucho realismo que pueda alcanzarse a nivel visual, dinámico o funcional, un entorno virtual nunca reproduce por completo todas las condiciones, imprevistos y exigencias del medio real.

Desde un punto de vista ético, resulta importante no generar una falsa sensación de dominio o preparación únicamente a partir de la práctica en simulación, siendo imprescindible mantener el contacto directo con la embarcación y el entorno operativo real.

En términos sociales, la integración de este tipo de tecnologías en la enseñanza representa una evolución positiva dentro del ámbito de la instrucción, al permitir métodos de aprendizaje más flexibles, accesibles y adaptados a las capacidades actuales.

Bien empleado, este tipo de sistema puede enriquecer notablemente el proceso formativo, siempre que se utilice como un añadido útil al entrenamiento convencional y no como un reemplazo de la experiencia práctica real.