



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Desarrollo de una herramienta de mensajería táctica sobre
LoRa-Meshtastic*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Alberto Torres Seara

DIRECTOR: Rubén Nocelo López

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Desarrollo de una herramienta de mensajería táctica sobre
LoRa-Meshtastic*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

Este Trabajo Fin de Grado estudia la viabilidad de emplear tecnología LoRa, mediante firmware Meshtastic, como base para una herramienta de mensajería táctica orientada a las lanchas de instrucción de la Escuela Naval Militar. El trabajo parte de la necesidad de disponer de un sistema de comunicaciones ligero, autónomo y sin dependencia de Internet, cobertura móvil ni infraestructura externa, capaz de mejorar la coordinación entre unidades durante ejercicios de navegación y adiestramiento.

Sobre una red LoRa-Meshtastic previamente validada, se desarrolla una aplicación en Python que integra mensajería rápida tipo chat, mensajería estructurada inspirada en la lógica de SACOMAR y representación cartográfica de las posiciones de las unidades. La validación del sistema se realiza de forma progresiva, desde pruebas básicas con nodos individuales hasta ensayos con varias lanchas en navegación, evaluando tanto el funcionamiento de la red como la utilidad práctica de la herramienta desarrollada. Los resultados obtenidos muestran que la solución propuesta constituye una alternativa funcional, de bajo coste y adecuada para el entorno docente, al permitir aproximar al alumnado a conceptos de mando y control, coordinación distribuida y mensajería naval estructurada en un contexto no clasificado.

PALABRAS CLAVE

LoRa-Meshtastic, Mando y Control (C2) naval, Lanchas de instrucción, Mensajería táctica, Redes *mesh*

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar agradeciendo al tutor de este trabajo, D. Rubén Nocelo, por toda la ayuda prestada durante el desarrollo de este. Por su plena disposición, implicación y rapidez en la contestación mostrada a lo largo de estos meses y sobre todo cuando tenía algún problema o duda. Gracias por haberme ayudado en esta última fase de cierre de una bonita etapa en la Escuela Naval Militar.

Aparte, me gustaría agradecer especialmente al TN Guillermo López Porto-Andión por todos los consejos, directrices y comentarios para ayudarme con la realización y puesta en marcha de este proyecto, sin los cuales no hubiera podido avanzar correctamente como me hubiera gustado. Siguiendo en esta línea, quiero dar las gracias también al TN Gonzalo María Delgado Franco por poner a mi disposición el uso de las lanchas de instrucción para la realización de diversas pruebas y por ayudarme también con la redacción del trabajo.

Se me hace necesario también agradecer a todos mis amigos y compañeros, tanto dentro como fuera de la escuela, que me han hecho sentir muy querido y me han ayudado a estar donde estoy. Gracias al Tercio del Rosario por estar ahí día tras día.

No puedo terminar sin antes agradecer a toda mi familia, especialmente a mis padres y a mis ocho hermanos, por todo el cariño que han mostrado a lo largo de mi vida, inculcándome los valores y la fe que me han formado hasta lo que soy ahora, y por apoyarme y seguirme en esta etapa en la Armada.

Finalmente, y más importante de todo, quiero dar gracias a Dios, por darme la vida y darle todo el sentido y felicidad. Gracias por haberme puesto donde estoy, gracias por tenerme cerca de ti y gracias por concederme todos los talentos que me has dado. Que este trabajo sirva para darte gloria.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	7
1 Introducción y objetivos	8
1.1 Introducción	8
1.2 Objetivos	9
1.2.1 Validación de la Red de Mando y Control	10
1.2.2 Desarrollo e Implementación de la Herramienta de Mensajería Táctica.....	10
1.2.3 Objetivo Formativo.....	11
1.3 Estructura del Trabajo de Fin de Grado	11
2 Estado del arte	13
2.1 Evolución histórica de las comunicaciones militares y navales.....	13
2.1.1 De las señales visuales a la telegrafía inalámbrica	13
2.1.2 La consolidación del HF y la era satelital.....	14
2.1.3 Digitalización y Guerra Centrada en Red (NCW)	14
2.1.4 Resiliencia en entornos degradados (DDIL).....	15
2.2 Redes de comunicación táctica sin infraestructuras.....	16
2.2.1 Tecnología LoRa y LP-WAN en aplicaciones de seguridad y defensa.....	17
2.2.2 Redes LoRa-Mesh y el ecosistema Meshtastic.....	18
2.2.3 Aplicaciones operativas y de seguridad.....	19
2.2.4 Oportunidades de mejora mediante mensajería avanzada y estructurada.....	21
2.3 Sistemas actuales de comunicaciones y mando y control en la Armada	22
2.3.1 Medios de transmisión y soporte de las comunicaciones navales	22
2.3.2 Herramientas y servicios de mensajería y mando y control	24
3 Diseño del sistema y uso de Meshtastic	28
3.1 Arquitectura de la red LoRa-Meshtastic	28
3.1.1 Fundamentos de la tecnología LoRa.....	28
3.1.2 Funcionamiento de Meshtastic	30
3.1.3 Roles de dispositivo	32
3.1.4 Canales y seguridad: PSK y cifrado AES-256	33
3.1.5 Configuración de red adoptada	33
3.1.6 Nodo hardware empleado: LilyGO T-Beam	38
3.2 Meshtastic como herramienta de mensajería táctica.....	39

3.2.1 Tipos de mensajes: canal común, mensajes privados y difusión.....	39
3.2.2 Gestión de nodos y usuarios	41
3.2.3 Interfaz de usuario: visualización en pantalla OLED de la placa LilyGO T-Beam	43
4 Implementación de la herramienta táctica	45
4.1 Entorno de desarrollo y herramientas utilizadas	45
4.2 Desarrollo de software de mensajería táctica.....	46
4.3 Integración con la placa LilyGO T-Beam y comunicación con dispositivos externos	48
4.4 Funcionalidades de la aplicación desarrollada.....	50
4.4.1 Estado de conexión y supervisión básica del sistema.....	51
4.4.2 Entorno SACOMAR: mensajería formal estructurada	51
4.4.3 Sistema de entrega y fiabilidad de mensajes estructurados	53
4.4.4 Entorno CHAT: mensajería rápida entre unidades	54
4.4.5 Gestión de nodos y presencia en red.....	55
4.4.6 Entorno MAPA: representación espacial de la red	55
4.4.7 Indicadores de actividad y persistencia de la información	57
4.4.8 Valor funcional del sistema desarrollado	57
4.5 Dificultades encontradas durante el desarrollo y soluciones adoptadas	58
4.5.1 Gestión de posiciones y nodos en la red	58
4.5.2 Difusión y actualización de posiciones entre unidades	59
4.5.3 Persistencia y presentación correcta de la información	59
4.5.4 Segmentación y reensamblado de mensajes estructurados.....	59
4.5.5 Confirmación de entrega y reintentos	60
4.5.6 Congestión de red y ajuste de temporizaciones	60
4.5.7 Indicadores de estado y usabilidad de la interfaz	60
4.5.8 Adaptación al contexto naval: unidades y herramientas cartográficas	60
4.5.9 Valor del proceso de resolución de problemas	61
5 Resultados y validación.....	62
5.1 Escenarios de pruebas definidos	62
5.2 Resultados y evaluación de la fiabilidad de la mensajería.....	63
5.3 Limitaciones observadas	71
5.4 Ejemplos de uso de la herramienta	74
5.4.1 Uso mínimo del nodo como terminal autónomo	74
5.4.2 Uso de la aplicación oficial de Meshtastic como herramienta básica de mando y control	76
5.4.3 Uso de la herramienta desarrollada para ejercicios de mayor entidad.....	76
5.4.4 Valor progresivo de los tres modos de uso	77

6 Conclusiones y líneas futuras	78
6.1 Conclusiones generales del trabajo	78
6.2 Aportaciones técnicas y operativas	79
6.3 Líneas de evolución futura del sistema	80
7 Bibliografía.....	82
Anexo I: Implicaciones sociales, económicas y ambientales	86
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	87
Anexo III: Manual de usuario del programa	88
Anexo IV: Propuesta de instalación en las lanchas de instrucción	97
Anexo V: Declaración de uso de herramientas de Inteligencia Artificial Generativa	99
1. Uso de IA en el desarrollo del software	99
2. Uso de IA en la generación de figuras	100
2.1 Figura 2-3 Línea temporal de la evolución de las comunicaciones (generada con IA).....	100
2.2 Figura 4-2 Arquitectura funcional del software de mensajería táctica (generada con IA)	100
2.3 Figura 4-3 Esquema de integración entre la aplicación de mensajería táctica, el nodo local LilyGO T-Beam y la red LoRa-Meshtastic (generada con IA).....	100
2.4 Figura 5-16 Ejemplo de mensaje que se podría consultar desde el dispositivo.....	101
3. Observación final	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Obama y su equipo analizando imágenes en directo de la operación que condujo a la muerte de Osama Bin Laden [1].	8
Figura 1-2 Lanchas de instrucción de la ENM realizando ejercicios en la Ría de Pontevedra [8].	9
Figura 1-3 Logo de la aplicación Meshtastic [10].	10
Figura 2-1 Telégrafo eléctrico [12].	13
Figura 2-2 Cantidad de satélites lanzados al espacio por año y sus usos [16].	14
Figura 2-3 Línea temporal de la evolución de las comunicaciones (generada con IA).	15
Figura 2-4 Sistemas de antenas para comunicaciones en las fragatas F100 [17].	16
Figura 2-5 Ejemplo típico de arquitectura de red LoRaWAN [20].	17
Figura 2-6 Operario del <i>Red Sea Project</i> con dispositivo LoRa [25].	20
Figura 2-7 Estación radionaval de Bermeja [30].	23
Figura 2-8 La fragata F101 Álvaro de Bazán realizando operaciones junto con el grupo de combate americano del portaaviones US Gerald R. Ford [33].	26
Figura 3-1 Factores de dispersión disponibles en LoRa [38].	29
Figura 3-2 Procedimiento que sigue la inundación gestionada para retransmitir mensajes [34].	31
Figura 3-3 Ejemplo de uso del parámetro Max Hops [35].	32
Figura 3-4 Comparación gráfica de las distintas configuraciones predeterminadas dadas por Meshtastic [41].	34
Figura 3-5 RSSI frente a distancia [7].	35
Figura 3-6 RSSI frente a SNR [7].	35
Figura 3-7 QR generado desde un nodo para compartir la configuración y clave.	36
Figura 3-8 Trayectoria de las lanchas de instrucción durante la prueba de alcance [7].	37
Figura 3-9 Nodo LilyGO T-Beam.	38
Figura 3-10 Visualización del canal común para instrucciones generales.	40
Figura 3-11 Visualización de los mensajes privados con los nodos que se encuentran en el mismo canal.	41
Figura 3-12 Visualización de la pestaña de Nodos conteniendo toda la información de la red.	42
Figura 3-13 Visualización del mapa donde se puede consultar la posición del resto de unidades.	43
Figura 3-14 Visualización de un mensaje en la pantalla OLED.	44
Figura 4-1 Entorno de desarrollo del software utilizando Visual Studio Code.	46
Figura 4-2 Arquitectura funcional del software de mensajería táctica (generada con IA).	47
Figura 4-3 Esquema de integración entre la aplicación de mensajería táctica, el nodo local LilyGO T-Beam y la red LoRa-Meshtastic (generada con IA).	49
Figura 4-4 Selección de lancha desde la que se opera.	50
Figura 4-5 Selección del puerto al que está conectado el nodo.	50

Figura 4-6 Estado de conexión del nodo.	51
Figura 4-7 Pestaña SACOMAR.	52
Figura 4-8 Ventana para crear/editar un mensaje SACOMAR.	52
Figura 4-9 Vista previa generada del mensaje antes de enviarlo o dejar como pendiente/borrador.	53
Figura 4-10 Pestaña CHAT.	54
Figura 4-11 Lista de nodos en línea.	55
Figura 4-12 Pestaña MAPA.	56
Figura 4-13 Pestaña de información sobre otra unidad.	56
Figura 4-14 Medición de distancias en el MAPA.	57
Figura 4-15 Señal de nuevo mensaje en el CHAT.	57
Figura 5-1 Mensaje de prueba enviado en la bandeja de salida de la GOD.	64
Figura 5-2 Mensaje de prueba recibido en la bandeja de entrada de CHE.	65
Figura 5-3 Mensaje de prueba recibido en la bandeja de entrada de la HER.	65
Figura 5-4 Bandeja de entrada de la RUL a la que no ha llegado ningún mensaje.	66
Figura 5-5 Todas las unidades mandan mensajes por ALL para coordinar la salida a la mar.	66
Figura 5-6 Chat directo entre GOD y HER.	67
Figura 5-7 Chat grupal entre SAL, GOD y HER para coordinar ejercicios.	67
Figura 5-8 Visualización de la pestaña MAPA en cuatro momentos distintos de la salida a la mar.	68
Figura 5-9 Alcance entre nodos donde se puede observar a la RUL a unas 3,5 millas náuticas de distancia.	68
Figura 5-10 Instalación provisional de la antena para las pruebas.	69
Figura 5-11 Prueba de alcance con la antena grande y sus RSSI (dB).	70
Figura 5-12 Alcance máximo en configuración <i>Medium Fast</i> y sus correspondientes RSSI (dB). .	71
Figura 5-13 Pantalla OLED del nodo que muestra el uso del canal.	72
Figura 5-14 Uso del canal al enviar un mensaje SACOMAR con la configuración <i>Medium Fast</i> . .	73
Figura 5-15 Alumnos de la ENM haciendo prácticas con la RHIB.	75
Figura 5-16 Ejemplo de mensaje que se podría consultar desde el dispositivo.	75
Figura A3-1 Carpeta desde la que abrir el programa.	88
Figura A3-2 Selección de lancha desde la que se opera.	88
Figura A3-3 Selección del puerto al que está conectado el nodo.	89
Figura A3-4 Estado de conexión del nodo.	89
Figura A3-5 Pestaña SACOMAR.	90
Figura A3-6 Ventana para crear/editar un mensaje SACOMAR.	91
Figura A3-7 Vista previa generada del mensaje antes de enviarlo o dejar como pendiente/borrador.	91

Figura A3-8 Pestaña CHAT.	92
Figura A3-9 Lista de conversaciones en el CHAT.....	93
Figura A3-10 Lista de nodos en línea.	93
Figura A3-11 Pestaña MAPA.....	94
Figura A3-12 Pestaña de información sobre otra unidad.	95
Figura A3-13 Información asociada a la posición del cursor desde la unidad propia.....	95
Figura A3-14 Medición de distancias en el MAPA.	95
Figura A4-1 Propuesta de encapsulado exterior del nodo LoRa-Meshtastic mediante caja estanca, orientada a una futura instalación embarcada en las lanchas de instrucción.	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Diferencias entre LoRaWAN y LoRa-Mesh.....	19
Tabla 2-2 Comparación entre comunicaciones HF tradicionales y redes LoRa.	22
Tabla 3-1 Principales configuraciones predeterminadas ofrecidas por Meshtastic [41].....	30
Tabla 3-2 Roles principales que se pueden atribuir a los nodos en Meshtastic [44].....	33
Tabla 3-3 Resumen de configuración de la red LoRa-Meshtastic empleada.	37
Tabla A3-1 Resumen de atajos y acciones rápidas.	96

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

El ejercicio del mando en el ámbito naval está intrínsecamente vinculado a la capacidad de establecer y mantener comunicaciones eficaces entre autoridades, centros de decisión y unidades desplegadas. En el medio marítimo, caracterizado por la dispersión geográfica, la movilidad constante y la separación física entre plataformas, las comunicaciones constituyen el elemento estructural que hace posible el sistema de Mando y Control (C2, *Command and Control*). Esta importancia queda demostrada casi diariamente cuando se llevan a cabo operaciones militares reales (como la de la Figura 1-1), donde el éxito de la misión radica en hacer llegar unas instrucciones al subordinado y que este las interprete correctamente y pueda interactuar con el superior.



Figura 1-1 Obama y su equipo analizando imágenes en directo de la operación que condujo a la muerte de Osama Bin Laden [1].

La doctrina naval establece que la finalidad de las comunicaciones militares es servir al mando, permitiendo ejercer control sobre una fuerza en un ámbito mayor del que sería posible sin ellas [2]. Este principio adquiere especial relevancia en el entorno naval cuando la coordinación entre unidades depende estrictamente de la transmisión segura, fiable y oportuna de la información. Para garantizar esta cohesión, publicaciones doctrinales como la ACP-121 [2] y la ACP-176 [3] regulan la organización y tramitación de las comunicaciones, estableciendo procedimientos de mensajería estructurada que aseguran la trazabilidad y el rigor en la cadena de órdenes.

En las últimas décadas, la digitalización de los sistemas de información y comunicaciones (CIS) ha transformado el entorno operativo mediante la integración de redes IP, sistemas satelitales y arquitecturas centradas en red que permiten compartir información en tiempo casi real [4]. Sin embargo,

esta evolución ha generado una dependencia crítica de infraestructuras complejas y potencialmente vulnerables. La persistencia de sistemas alternativos, como la radio de alta frecuencia (HF), incluso en la era satelital, evidencia la necesidad de resiliencia operativa y la capacidad de mantener el mando en entornos degradados o denegados [5], [6].

En el ámbito formativo de la Escuela Naval Militar, los alumnos desarrollan competencias clave de navegación y maniobra en lanchas de instrucción. Las lanchas de instrucción (Figura 1-2) permiten aproximar al alumno el funcionamiento de una unidad real de la Armada para poder aprender procedimientos, maniobras, etc. No obstante, existe una carencia de herramientas que permitan simular de forma realista los procedimientos de mensajería estructurada propios del entorno operativo sin recurrir a sistemas clasificados o infraestructuras costosas. Si bien trabajos previos han explorado el uso de redes *ad hoc* basadas en tecnología LoRa [7], no se ha desarrollado una herramienta completa orientada específicamente a la simulación doctrinal del mando naval mediante mensajería estructurada.



Figura 1-2 Lanchas de instrucción de la ENM realizando ejercicios en la Ría de Pontevedra [8].

La tecnología LoRa, bajo el protocolo de código abierto Meshtastic, permite establecer redes malladas autónomas, cifradas y sin dependencia de infraestructura externa [9]. Esta tecnología ofrece una oportunidad única para aproximar el entorno de instrucción a la realidad operativa.

En este contexto, resulta necesario analizar cómo pueden trasladarse al entorno académico los principios básicos del mando y control naval, especialmente en lo relativo a la mensajería estructurada y a la coordinación entre unidades. Aunque la Escuela Naval Militar no opera con los sistemas CIS completos presentes en las unidades de la Armada, sí es posible estudiar y desarrollar soluciones tecnológicas que permitan reproducir, a escala reducida y con medios no clasificados, la lógica operativa que subyace en dichos sistemas.

Por tanto, la importancia de las comunicaciones en el ámbito naval no se limita a su dimensión técnica, sino que afecta directamente a la formación de los futuros oficiales. Comprender cómo se estructura la información, cómo se transmite una orden y cómo se mantiene la cohesión entre unidades mediante redes de comunicación constituye una competencia esencial en el ejercicio del mando. Esta necesidad formativa justifica el estudio y desarrollo de herramientas que permitan integrar estos conceptos en el entorno de instrucción.

1.2 Objetivos

El presente Trabajo Fin de Grado tiene como finalidad el análisis, validación e implementación de una herramienta de mensajería táctica basada en tecnología LoRa y el protocolo Meshtastic, orientada a

su empleo en las lanchas de instrucción de la Escuela Naval Militar. El trabajo se articula en dos fases principales: una fase de validación de infraestructura y una fase de desarrollo e integración operativa.

1.2.1 Validación de la Red de Mando y Control

El primer objetivo fundamental consiste en verificar y consolidar el funcionamiento de los nodos LoRa y de la red mallada en condiciones reales de uso marino sin dependencia de infraestructuras externas. Para ello, se empleará la aplicación oficial de Meshtastic, ampliando pruebas previamente realizadas [7]. Esta fase se desglosa en los siguientes puntos clave:

- **Configuración y Estabilidad:** Confirmar que los dispositivos LilyGO T-Beam están correctamente configurados para el entorno naval, garantizando que la red mallada funcione de forma estable durante la navegación.
- **Análisis del Nodo como Terminal Autónomo:** Se comprobará la capacidad del sistema para funcionar en su estado más elemental sin necesidad de infraestructura externa ni acceso a la red de internet. Esto implica la posibilidad de que los nodos reciban y muestren órdenes directamente en su pantalla OLED, analizando esta opción como una solución crítica para embarcaciones con restricciones severas de espacio o que no puedan embarcar dispositivos portátiles.
- **Explotación de la Aplicación Oficial:** Se evaluará el uso de la aplicación de Meshtastic (Figura 1-3) desde dispositivos móviles (*tablets* o *smartphones*) por parte de todos los usuarios. El objetivo es explotar al máximo las funcionalidades nativas como la visualización de mensajes, estado de los nodos, posicionamiento GPS en tiempo real, para establecer una línea base de mejora en el intercambio de información.



Figura 1-3 Logo de la aplicación Meshtastic [10].

- **Autonomía e Independencia de Infraestructura:** Un pilar central de este trabajo es demostrar que el sistema puede operar de forma completamente autónoma, sin necesidad de conexión a Internet, routers, servidores externos ni infraestructura fija. Se analizarán aspectos críticos como el alcance efectivo entre lanchas, la estabilidad del enlace, la capacidad multisalto y la resiliencia de la red ante pérdidas temporales de conexión.

1.2.2 Desarrollo e Implementación de la Herramienta de Mensajería Táctica

Una vez validada la infraestructura, el segundo gran objetivo es la creación de una aplicación propia desarrollada en Python. Esta herramienta actuará como una capa superior sobre el protocolo Meshtastic, transformando una red de datos genérica en un sistema estructurado de Mando y Control (C2). Los objetivos específicos de este desarrollo son:

- **Simulación de Sistemas Reales:** El programa se diseñará para que su interfaz y lógica de funcionamiento se asemejen lo máximo posible a los sistemas C2 que operan actualmente en las unidades de la Armada, adaptándolos a las necesidades formativas de la Escuela Naval.

- **Gestión de Comunicaciones:** La aplicación deberá permitir la gestión organizada de la información mediante el envío de mensajes a canales comunes, mensajes privados entre unidades y, especialmente, un sistema de organización por carpetas que facilite la explotación de la información por parte del mando.
- **Mensajería Estructurada Doctrinal:** Se implementará un modelo de mensajes inspirado en los principios doctrinales de la Armada (siguiendo la lógica de las publicaciones ACP), permitiendo que la información se transmita en campos diferenciados para simular un entorno de transmisión formal de órdenes.
- **Gestión de Limitaciones Técnicas (Segmentación):** Debido a las restricciones de ancho de banda de la tecnología LoRa, la aplicación incorporará mecanismos para segmentar automáticamente mensajes de gran longitud y reconstruirlos en el receptor, asegurando la integridad del contenido sin saturar la red.

1.2.3 Objetivo Formativo

Como fin último, el trabajo persigue que la implementación de esta herramienta en las lanchas de instrucción permita a los alumnos familiarizarse con la lógica del mando distribuido y la mensajería estructurada. Al operar en un entorno sin infraestructuras externas, se refuerza la comprensión de sistemas resilientes y autónomos, competencias esenciales para los futuros oficiales en los escenarios operativos actuales.

1.3 Estructura del Trabajo de Fin de Grado

El presente documento se articula en siete capítulos principales, complementados por una sección de anexos, organizados de forma que se facilite la comprensión desde los fundamentos doctrinales hasta la validación técnica del sistema desarrollado:

- **Capítulo 1. Introducción y objetivos:** Se establece el marco general del trabajo, se justifica la importancia de las comunicaciones en el ejercicio del mando naval y se definen los objetivos del proyecto, tanto desde el punto de vista técnico como formativo.
- **Capítulo 2. Estado del arte:** Se realiza un análisis exhaustivo de la evolución de las comunicaciones navales, desde los medios visuales hasta los sistemas digitales modernos (SATCOM, IP, TDL). Se profundiza en la tecnología LoRa-Meshtastic y se revisa la evolución de las comunicaciones militares y navales, las redes tácticas sin infraestructura y los sistemas actuales de mando y control de la Armada, con el fin de situar el problema y justificar la propuesta desarrollada.
- **Capítulo 3. Diseño del sistema y uso de Meshtastic:** Se describe la arquitectura de la red LoRa-Meshtastic, la configuración adoptada, el hardware empleado y el uso de la propia aplicación Meshtastic como herramienta básica de mensajería táctica.
- **Capítulo 4. Implementación de la herramienta táctica:** Se expone el proceso de desarrollo de la aplicación, su integración con la red y las funcionalidades implementadas, incluyendo mensajería estructurada, chat, mapa y gestión de nodos, así como las principales dificultades encontradas durante el desarrollo.
- **Capítulo 5. Resultados y validación:** Se presentan los escenarios de prueba definidos, los resultados obtenidos y la evaluación del sistema en términos de fiabilidad, limitaciones observadas y ejemplos de uso en distintos niveles de complejidad.

- **Capítulo 6. Conclusiones y líneas futuras:** Se recogen las conclusiones generales del trabajo, las principales aportaciones técnicas y operativas, y las posibles líneas de evolución futura del sistema.
- **Capítulo 7. Bibliografía:** Recopilación de todas las fuentes documentales, publicaciones científicas, normativas técnicas y literatura académica consultadas para el desarrollo del trabajo.
- **Anexos:** Se incluye información complementaria relevante, como las implicaciones sociales, económicas y ambientales del trabajo, las reflexiones éticas y sociales del mismo, el manual de usuario del programa, una propuesta de instalación en las lanchas de instrucción y la explicación del uso que se le ha dado a la Inteligencia Artificial en este trabajo.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Evolución histórica de las comunicaciones militares y navales

La evolución de las comunicaciones militares ha estado íntimamente ligada al desarrollo tecnológico de cada época y a las necesidades estratégicas derivadas de los conflictos. Desde la Antigüedad hasta la era digital, la capacidad de transmitir información de forma rápida, fiable y segura ha condicionado la eficacia del mando y el resultado de las operaciones navales.

2.1.1 De las señales visuales a la telegrafía inalámbrica

En las civilizaciones clásicas, el ejercicio del mando dependía de mensajeros físicos y señales visuales. En el ámbito naval, la coordinación se realizaba mediante banderas, semáforos ópticos o disparos de cañón. Durante las guerras napoleónicas, las escuadras utilizaban complejos códigos de banderas para transmitir órdenes tácticas, aunque siempre limitados por la línea de visión (LOS - *Line of Sight*) y las condiciones meteorológicas. La batalla de Trafalgar (1805) representa el exponente máximo de la coordinación naval basada exclusivamente en medios visuales [11].

El siglo XIX marcó el primer gran salto tecnológico con la invención del telégrafo eléctrico (Figura 2-1) por Samuel Morse (1837). Durante la Guerra Civil estadounidense (1861-1865), el telégrafo permitió por primera vez a los mandos coordinar fuerzas a larga distancia en tiempo casi real, alterando profundamente la conducción estratégica. En el ámbito marítimo, la instalación de cables submarinos permitió enlazar continentes, aunque la comunicación con unidades en alta mar seguía siendo limitada.



Figura 2-1 Telégrafo eléctrico [12].

El siguiente gran hito fue la radiotelegrafía inalámbrica desarrollada por Guglielmo Marconi a finales del siglo XIX [13]. En 1899 se logró la primera transmisión inalámbrica a través del Canal de la Mancha y, en 1901, la primera transmisión transatlántica. Estas innovaciones permitieron establecer contacto con buques en navegación sin necesidad de soporte físico. Durante la Primera Guerra Mundial (1914-1918), la radio se convirtió en un elemento esencial para la coordinación de flotas y para la guerra de inteligencia. La interceptación del “Telegrama Zimmermann” en 1917, realizada gracias a la captación de comunicaciones inalámbricas, ilustra el impacto estratégico de las radiocomunicaciones [14].

2.1.2 La consolidación del HF y la era satelital

Durante la Segunda Guerra Mundial (1939-1945), las comunicaciones por radio en Alta Frecuencia (HF) se establecieron como el medio estratégico global por excelencia [15]. Su capacidad de propagación ionosférica permitió enlazar bases y flotas en teatros de operaciones remotos (BLOS - *Beyond Line Of Sight*). En este periodo, la dimensión electromagnética se convirtió en un dominio operacional crítico, naciendo técnicas avanzadas de criptografía (como el descifrado de la máquina Enigma) y guerra electrónica.

A finales de la década de 1950, el lanzamiento del Sputnik (1957) inició la era SATCOM. En los años 60 y 70, los satélites comenzaron a proporcionar enlaces más estables y de mayor ancho de banda, reduciendo la dependencia de las erráticas condiciones ionosféricas del HF y permitiendo, por primera vez, la transmisión masiva de datos digitales y voz de alta calidad. Como se ve en la Figura 2-2, el lanzamiento de satélites es cada vez mayor y el uso principal es el de las comunicaciones.

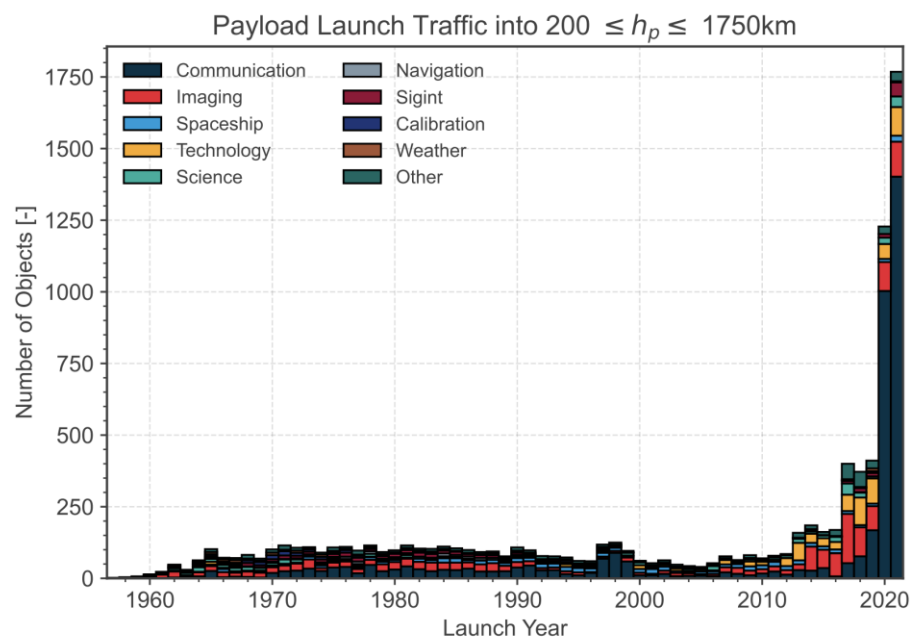


Figura 2-2 Cantidad de satélites lanzados al espacio por año y sus usos [16].

2.1.3 Digitalización y Guerra Centrada en Red (NCW)

En las décadas de 1980 y 1990, la incorporación de redes basadas en Protocolo de Internet (IP) inició una transformación estructural. Las plataformas navales integraron redes internas para conectar sensores y sistemas de armas. El concepto de *Network Centric Warfare* (NCW) definió que la superioridad militar reside en la capacidad de compartir información en red en tiempo real, reduciendo drásticamente el ciclo de decisión.

Este paradigma impulsó los enlaces tácticos de datos (Link-11, Link-16, Link-22) y, en el ámbito nacional, culminó en el Sistema de Mando y Control Nacional (SC2N), una arquitectura conjunta e

interoperable para la conducción de operaciones que representa la evolución hacia sistemas centralizados, interoperables y basados en infraestructuras digitales integradas [6].

2.1.4 Resiliencia en entornos degradados (DDIL)

A pesar de estos avances, la dependencia crítica de satélites y redes IP ha introducido vulnerabilidades ante interferencias (*jamming*), ciberataques o destrucción de infraestructura. Esta realidad ha reforzado la necesidad de medios alternativos resilientes. El Plan de Capacidades CIS/TIC 2024-2029 recoge la necesidad de modernizar e integrar los medios bajo una lógica de redundancia. En este escenario, el HF ha evolucionado hacia formas digitales, conviviendo con nuevas soluciones para entornos DDIL (*Denied, Disrupted, Intermittent and Limited bandwidth*). En paralelo, la digitalización embarcada y la valorización del dato como recurso estratégico han orientado los sistemas CIS hacia modelos cada vez más integrados, donde la información fluye entre nodos distribuidos y centros de decisión, reforzando el concepto de mando centrado en red [6]. En síntesis, la evolución histórica de las comunicaciones militares y navales puede estructurarse en cinco grandes etapas y representar gráficamente como en la Figura 2-3:

- **Señales visuales y mensajeros físicos:** limitados por la línea de visión.
- **Telégrafo eléctrico y cables submarinos:** primera conexión global física.
- **Radiocomunicaciones (HF):** primer enlace inalámbrico transoceánico (BLOS).
- **Comunicaciones por satélite (SATCOM):** estabilidad y alto ancho de banda.
- **Redes digitales IP y sistemas integrados de mando y control:** integración total y mando centrado en red.

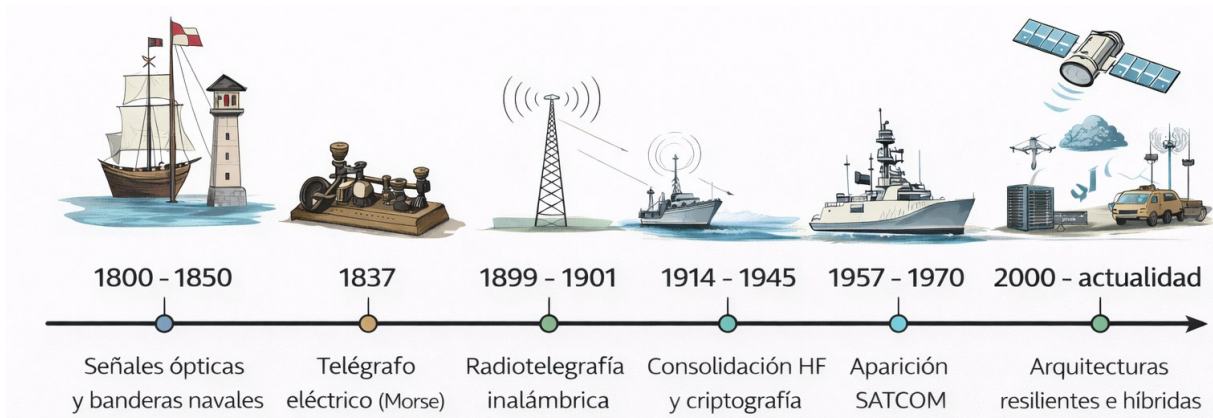


Figura 2-3 Línea temporal de la evolución de las comunicaciones (generada con IA).

La evolución histórica descrita evidencia una tendencia constante hacia la ampliación del alcance, la digitalización de los medios y la integración progresiva de sistemas bajo arquitecturas centradas en red. Sin embargo, este proceso también ha incrementado la dependencia de infraestructuras complejas y de capacidades satelitales o IP, introduciendo nuevas vulnerabilidades en entornos de degradación o negación del dominio electromagnético.

La tendencia contemporánea no busca eliminar tecnologías previas, sino integrarlas en arquitecturas híbridas. Es aquí donde las redes de bajo consumo y largo alcance (LP-WAN), como LoRa, surgen como una solución táctica para recuperar la autonomía y la resiliencia en el escalón local, permitiendo comunicaciones malladas y cifradas sin depender de ninguna infraestructura externa. El siguiente apartado examina el estado actual de estas tecnologías y sus aplicaciones en entornos de seguridad y defensa.

2.2 Redes de comunicación táctica sin infraestructuras

En el ámbito militar, y en particular en el entorno naval, el concepto de “comunicaciones sin infraestructura” define a aquellas redes capaces de establecer un enlace de datos sin depender de elementos externos fijos, tales como estaciones base terrestres, centros de conmutación, constelaciones satelitales o acceso a redes globales (Internet).

Este tipo de soluciones se encuadran dentro de las denominadas Redes Móviles Ad-hoc (MANET), cuya arquitectura se caracteriza por ser descentralizada, auto-configurable y dinámica. Su empleo es crítico en diferentes escenarios principales como pueden ser operaciones en áreas remotas donde la cobertura de infraestructuras convencionales es inexistente, en entornos de alta movilidad donde la topología de la red cambia constantemente debido al desplazamiento de las plataformas (lanchas de instrucción) o en entornos DDIL donde se busca mantener la capacidad de Mando y Control (C2) a pesar de la degradación o negación intencionada del dominio electromagnético [6].

En la práctica, las comunicaciones navales modernas no dependen de un único medio, sino que combinan sistemas estratégicos de gran ancho de banda (SATCOM y redes IP) con sistemas de respaldo resilientes. Como se puede observar en la Figura 2-4, las fragatas F100 integran múltiples sistemas y soportes de comunicaciones, lo que refleja un enfoque de redundancia de medios. La persistencia de la radio HF en la era digital es el mejor ejemplo de esta necesidad de redundancia estratégica [5]. Sin embargo, el HF presenta retos en cuanto a tamaño de antenas y complejidad de uso para pequeñas unidades. Es en este vacío operativo donde las redes LP-WAN (Low Power Wide Area Network), y específicamente la tecnología LoRa, ofrecen una solución viable ya que proporcionan autonomía total porque la red se crea y se desplaza con las propias unidades, baja firma electromagnética ya que su bajo consumo y técnicas de modulación dificultan su detección e interceptación (LPI/LPD, *Low Probability of Intercept/Low Probability of Detection*) y eficiencia en datos tácticos. Aunque no permiten la transmisión de voz o video, son óptimas para el intercambio de mensajes cortos estructurados, alertas y telemetría (posición GPS, estado de batería, etc.).



Figura 2-4 Sistemas de antenas para comunicaciones en las fragatas F100 [17].

En el marco del Plan de Capacidades CIS/TIC 2024-2029, la integración de estas arquitecturas ligeras y distribuidas responde a la necesidad de evitar duplicidades y asegurar la continuidad del mando en el escalón táctico más básico, como es el caso de las lanchas de instrucción de la Escuela Naval Militar.

2.2.1 Tecnología LoRa y LP-WAN en aplicaciones de seguridad y defensa

Las tecnologías LP-WAN constituyen un conjunto de soluciones diseñadas para enlazar dispositivos de bajo consumo energético y bajo caudal de datos a distancias significativamente superiores a las que permiten tecnologías de corto alcance como Bluetooth o ZigBee. A diferencia de las redes de banda ancha, como telefonía o Wi-Fi, cuya filosofía prioriza el ancho de banda y la velocidad de transmisión, las LP-WAN optimizan la eficiencia energética, la robustez del enlace y la cobertura frente a la tasa de transferencia [18].

Dentro de este ecosistema, la tecnología LoRa se ha consolidado como una de las soluciones más extendidas debido a su flexibilidad de despliegue en bandas libres (ISM), concretamente en 868 MHz en Europa. Esta característica permite la creación de redes privadas sin dependencia de operadores comerciales, aspecto particularmente relevante cuando se persigue autonomía operativa o reducción de costes.

Desde el punto de vista técnico, que será explicado en el apartado 3.1, LoRa confiere al sistema una elevada inmunidad frente a interferencias y una alta sensibilidad de recepción, permitiendo establecer enlaces a largas distancias con potencias de transmisión reducidas; y dificulta la detección e interceptación de información, otorgándole propiedades asociables a LPI/LPD, especialmente relevantes en entornos donde la discreción electromagnética resulta deseable [19]. El compromiso inherente a esta tecnología es que el aumento del alcance y la robustez se obtiene a costa de una menor tasa de transmisión, lo que limita su uso a datos de bajo caudal.

Conviene diferenciar claramente entre LoRa como tecnología de modulación física y LoRaWAN como arquitectura de red que opera sobre dicha modulación. LoRaWAN define el protocolo y la organización lógica de la red, estructurada en una topología denominada “estrella de estrellas”. En este modelo, los dispositivos finales (*end devices*) transmiten sus tramas LoRa a uno o varios *gateways*, que actúan como puentes transparentes hacia una infraestructura de servidores centrales, como se puede ver en el ejemplo de la Figura 2-5. Estos servidores, entre los que se incluyen el *Network Server*, el *Application Server* y el *Join Server*, gestionan la autenticación de dispositivos, la seguridad criptográfica, la eliminación de duplicados y la entrega de datos a las aplicaciones finales [20].

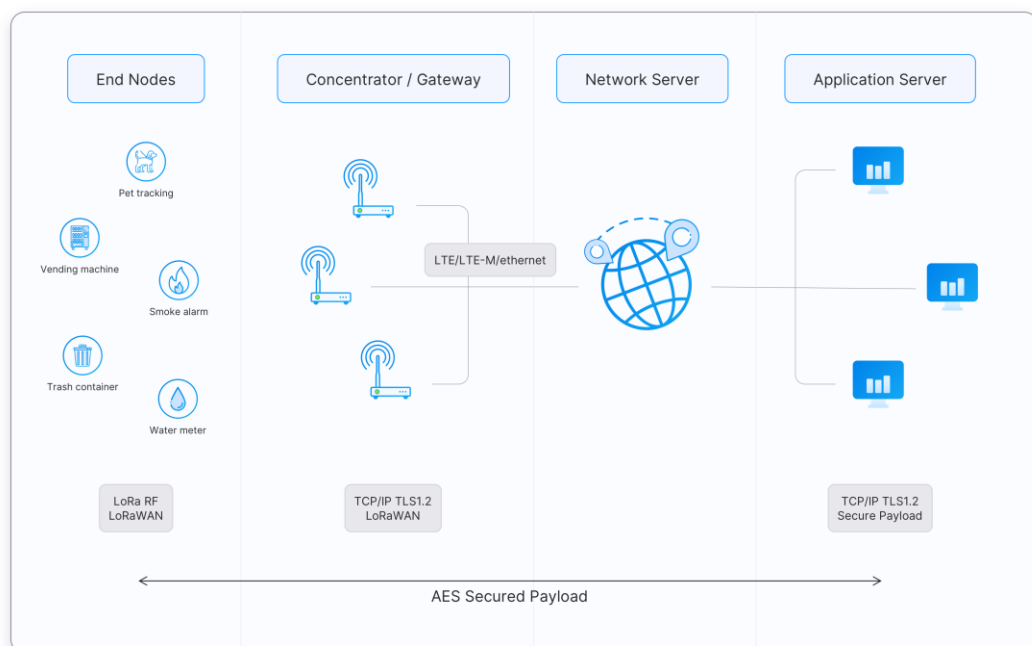


Figura 2-5 Ejemplo típico de arquitectura de red LoRaWAN [20].

Esta arquitectura centralizada permite gestionar despliegues de gran escala y facilita la integración con plataformas externas, siendo especialmente adecuada para aplicaciones de sensorización urbana, agricultura inteligente o logística industrial. Sin embargo, implica necesariamente la existencia de *gateways* con conectividad IP hacia un *backend*. Si el *gateway* deja de estar disponible o se pierde la conectividad con el servidor central, los dispositivos finales no pueden comunicarse directamente entre sí, ya que el modelo no contempla enlaces laterales entre nodos.

Esta dependencia estructural marca una diferencia fundamental respecto a las arquitecturas malladas basadas en LoRa. En entornos donde se busca autonomía total, ausencia de infraestructura fija y capacidad de comunicación directa entre unidades móviles, como puede ser el caso de pequeñas unidades navales en navegación, resulta más adecuado un modelo descentralizado en el que los propios nodos formen la red y participen en el encaminamiento de los mensajes.

2.2.2 Redes LoRa-Mesh y el ecosistema Meshtastic

Frente al modelo de red centralizado característico de las arquitecturas LoRaWAN, han surgido en los últimos años diferentes implementaciones que emplean la modulación LoRa dentro de arquitecturas completamente descentralizadas. Estas redes, conocidas habitualmente como LoRa-Mesh, eliminan la necesidad de infraestructuras externas como *gateways* o servidores centrales, permitiendo que los propios dispositivos desplegados en el terreno constituyan la red de comunicaciones.

En este tipo de arquitectura, cada nodo actúa simultáneamente como terminal de usuario y como elemento de retransmisión, permitiendo que los mensajes se propaguen entre múltiples dispositivos hasta alcanzar su destino final. Como consecuencia, la red puede formarse dinámicamente a partir de los nodos disponibles, sin depender de conectividad IP ni de servicios de *backend* centralizados. Esta característica resulta especialmente interesante en escenarios donde la infraestructura de telecomunicaciones no está disponible o puede verse degradada.

Una de las implementaciones más consolidadas dentro de este enfoque es Meshtastic, un proyecto de código abierto diseñado para construir redes de comunicaciones de largo alcance y bajo consumo energético utilizando transceptores LoRa comerciales. El proyecto proporciona tanto el firmware necesario para los dispositivos radio como las aplicaciones de usuario para su gestión desde teléfonos móviles u ordenadores.

Meshtastic integra diversos mecanismos que permiten la creación de redes autónomas de comunicaciones, incluyendo encaminamiento distribuido entre nodos, cifrado de mensajes y organización de la red mediante canales lógicos. Gracias a estas funcionalidades, es posible desplegar redes de comunicación completamente independientes de infraestructuras externas, lo que ha favorecido su utilización en ámbitos como la experimentación tecnológica, las comunicaciones de emergencia o el despliegue de redes temporales en entornos remotos.

Desde el punto de vista arquitectónico, Meshtastic adopta el paradigma de red mallada (*mesh network*). En este modelo, cada nodo puede recibir mensajes procedentes de otros dispositivos y reenviarlos automáticamente si es necesario para facilitar su propagación dentro de la red. Este mecanismo permite extender el alcance efectivo de las comunicaciones más allá de la línea de visión directa, siempre que existan nodos intermedios que actúen como saltos dentro de la red.

Otra característica relevante de Meshtastic es la organización de la red mediante canales lógicos. Cada canal se identifica mediante un nombre y una clave compartida entre los dispositivos que participan en él. Los mensajes transmitidos dentro de un canal se cifran mediante algoritmos criptográficos, garantizando un nivel básico de confidencialidad incluso en entornos de difusión radioeléctrica.

Además de la mensajería entre usuarios, Meshtastic permite la transmisión de información de telemetría y datos de posicionamiento. Muchos de los dispositivos compatibles integran receptores GPS, lo que permite compartir automáticamente la posición de los nodos dentro de la red. Esta funcionalidad

facilita la creación de representaciones cartográficas de la red y proporciona una forma elemental de conciencia situacional compartida entre los participantes.

No obstante, las redes LoRa-Mesh presentan también limitaciones inherentes a la propia tecnología LoRa. El ancho de banda disponible es reducido en comparación con otras tecnologías inalámbricas, lo que restringe el sistema a la transmisión de mensajes cortos y datos de baja tasa. Por este motivo, estas redes no están orientadas a aplicaciones que requieran transmisión continua de información o grandes volúmenes de datos.

A pesar de estas limitaciones, las redes LoRa-Mesh presentan ventajas significativas en escenarios donde se requiere autonomía de infraestructura, bajo consumo energético y capacidad de despliegue rápido. Estas características han despertado un interés creciente en aplicaciones relacionadas con comunicaciones de emergencia, redes experimentales y sistemas de comunicaciones distribuidos.

En este contexto, Meshtastic se ha consolidado como una de las plataformas más accesibles para la implementación de este tipo de redes, gracias a su naturaleza abierta y a la disponibilidad de dispositivos de bajo coste compatibles con la tecnología LoRa. A continuación, en la Tabla 2-1 se resumen las principales diferencias entre una red LoRaWAN y una red LoRa-Mesh.

Característica	LoRaWAN	LoRa-Mesh (Meshtastic)
Tipo de red	Centralizada	Descentralizada
Topología	Estrella de estrellas	Mallada
Infraestructura	Gateways y servidores	No requiere infraestructura
Comunicación entre nodos	A través del gateway	Directa entre nodos
Adecuación a redes tácticas móviles	Limitada	Alta

Tabla 2-1 Diferencias entre LoRaWAN y LoRa-Mesh.

2.2.3 Aplicaciones operativas y de seguridad

La utilidad de LoRa en el ámbito naval no reside en sustituir los medios estratégicos, sino en habilitar capas de resiliencia táctica en los siguientes ejes:

- **Vigilancia y Sensorización Perimetral:** En bases navales o recintos logísticos, permite monitorizar sensores de intrusión o vibración con una infraestructura mínima. Se destaca su robustez en nodos remotos que permanecen en reposo hasta detectar un evento, optimizando la autonomía energética [18]. A mayores, existen propuestas y arquitecturas de detección y notificación de intrusiones basadas en sensores LP-WAN, que se apoyan en la robustez de LoRaWAN para operar con nodos remotos de bajo consumo [21]. En este tipo de aplicaciones, el tráfico es típicamente esporádico (eventos), lo que se ajusta a la filosofía LP-WAN: el sistema permanece en reposo la mayor parte del tiempo y transmite solo cuando se detecta una condición de interés.
- **Seguimiento Logístico y Asset Tracking:** El uso de *trackers* LoRa como el de la Figura 2-6, permite la geolocalización de activos y personal en grandes áreas (como campos de maniobras) sin depender de redes 4G/5G. Casos como el *Red Sea Project* avalan la viabilidad de monitorizar miles de activos en tiempo real mediante esta tecnología [22], destacando la integración de infraestructura LoRaWAN y dispositivos de etiquetado [23]. En logística industrial, también existen soluciones empaquetadas por proveedores de geolocalización y cartografía para seguimiento basadas en LoRaWAN, como las iniciativas anunciadas por

HERE junto con Actility para gestión de activos industriales [24]. Este tipo de despliegues ilustra que, a escala real, LoRaWAN se utiliza no solo para telemetría fija, sino también para movilidad moderada, con actualizaciones periódicas o por evento según necesidades operativas.

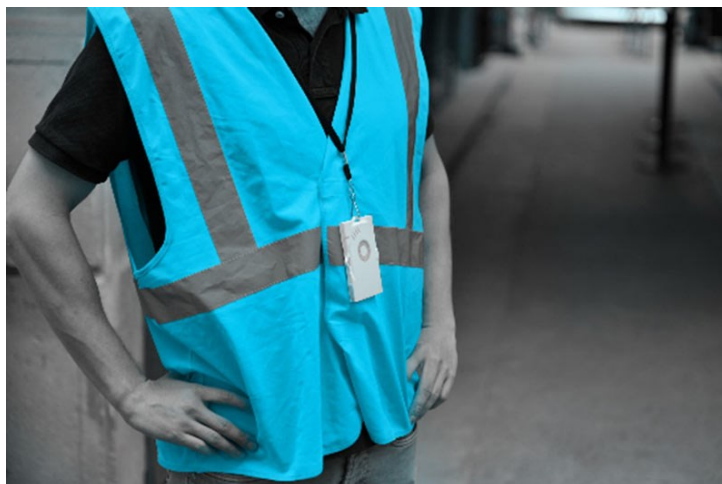


Figura 2-6 Operario del Red Sea Project con dispositivo LoRa [25].

- **Monitorización en Entornos Denegados (DDIL):** LoRaWAN y las redes LoRa privadas son la solución madura para zonas sin cobertura telefónica. Su capacidad de penetración radioeléctrica permite recoger datos en condiciones difíciles (estructuras metálicas de buques o zonas costeras abruptas), siendo directamente transferibles al control ambiental de bases o puntos logísticos remotos. Por ejemplo, existen documentos técnicos orientados a operadores de agua que describen el uso de LoRaWAN para lectura telemática y monitorización operativa, resaltando su capacidad de penetración y cobertura para recoger datos incluso en condiciones difíciles [26]. En agricultura, la LoRa Alliance publica casos de uso recientes donde se describen redes LoRaWAN para automatización, monitorización y sensorización distribuida de explotaciones, precisamente por su capacidad de cubrir amplias superficies con un número reducido de puntos de acceso [27]. Adicionalmente, existen plataformas basadas en LoRa para monitorización remota de grandes entornos agrícolas, integrando sensores distribuidos y transmisión de datos a larga distancia [28]. Aunque estos casos sean de sector civil, son directamente transferibles al ámbito de seguridad y defensa cuando el objetivo es instrumentar áreas extensas con autonomía energética, por ejemplo, en zonas de instrucción, control ambiental de bases, monitorización de puntos logísticos o estaciones remotas.

- **Comunicaciones de Contingencia y Mínima Conectividad:** Ante una degradación del sistema SATCOM o interferencias en HF, LoRa permite mantener una burbuja de conectividad local. Su bajísimo caudal es suficiente para transmitir mensajes de texto cifrados, estados operativos y posiciones GPS, garantizando que el Mando mantenga la conciencia situacional básica de sus unidades subordinadas. En el ámbito naval, la persistencia del HF como medio estratégico de respaldo se documenta explícitamente en trabajos recientes, donde se subraya su papel cuando el satélite puede fallar o ser anulado [5]. En ese escenario general, LoRa puede desempeñar un papel complementario de muy bajo caudal para mantener una “mínima” conectividad local (mensajes cortos, estados operativos, coordinación básica) entre unidades próximas, sin depender de satélite ni de infraestructura fija. No se trata de un sustituto de SATCOM o HF, sino de una opción adicional para determinados perfiles de tráfico, especialmente cuando se busca despliegue rápido, bajo consumo y simplicidad.

- **Sistemas Autónomos de Intercambio de Datos:** En escenarios tácticos, donde se conectan directamente con soluciones tipo *mesh* sobre LoRa (como Meshtastic). En estos casos, la utilidad se centra en establecer redes locales distribuidas para mensajería corta entre nodos, con capacidades de cifrado, y sin infraestructura externa. Este enfoque es especialmente relevante para contextos de instrucción, adiestramiento o experimentación tecnológica, donde se pretende simular coordinación distribuida sin desplegar medios complejos o clasificados.

2.2.4 Oportunidades de mejora mediante mensajería avanzada y estructurada

Las redes LoRa (y, en particular, las redes LoRa-Mesh tipo Meshtastic) proporcionan una infraestructura básica funcional, pero presentan un margen de desarrollo significativo en la capa de aplicación. En el contexto de las comunicaciones navales, la mensajería no es un intercambio de texto libre; es un proceso regulado que garantiza la unidad de acción y la trazabilidad del mando.

En el contexto de las comunicaciones militares, la mensajería no consiste en un intercambio informal de texto, sino que sigue estructuras formales que definen precedencias, destinatarios, clasificación y trazabilidad documental. La existencia de publicaciones doctrinales y de organización CIS muestra que la mensajería formal y los sistemas de explotación se diseñan para servir al mando con coherencia, seguridad y control documental. En el caso de la Armada, la ACP-121 establece normas y estructura organizativa vinculadas al ámbito CIS, incluyendo la orientación hacia procedimientos normalizados en comunicaciones [2]. Por su parte, la planificación de capacidades CIS/TIC 2024–2029 recoge explícitamente la coexistencia de programas heredados (como SACOMAR en evolución) y su transición hacia servicios conjuntos, manteniendo operatividad mientras se avanza hacia arquitecturas integradas [6]. Este marco doctrinal y de planificación define el “estado real” de cómo se conciben las comunicaciones y la mensajería en un sistema de mando y control.

En consecuencia, una oportunidad evidente en redes LoRa sin infraestructura es elevar la mensajería desde el nivel chat al nivel de mensajería estructurada, incorporando modelos de campos, tipos de mensaje y flujos de tramitación. Esto incluye, por ejemplo, la definición de plantillas con encabezados, identificación de emisor y destinatarios, y categorización del mensaje según su naturaleza (orden, informe, solicitud, aviso, etc.). En una herramienta de mensajería táctica orientada a instrucción, este enfoque permite aproximar la lógica operativa real sin necesidad de desplegar sistemas clasificados: se reproduce la estructura (forma) y los procedimientos (flujo) sobre un medio no clasificado y autónomo.

Otra línea de desarrollo consiste en la gestión operativa de nodos y usuarios. En sistemas reales, la identidad de cada unidad, su pertenencia a una organización y la relación jerárquica o funcional condicionan el tráfico de información. En una red LoRa-Mesh, esto puede reflejarse mediante identificación estable de nodos (nombre largo/corto), listas de contactos, grupos operativos y control de canales. La herramienta de aplicación puede incorporar libreta de nodos, roles y mecanismos de organización del tráfico (carpetas o bandejas de entrada/salida/pendiente/archivado), reproduciendo la disciplina documental propia de sistemas formales, aunque adaptada al ámbito académico.

En el plano técnico, una oportunidad clave es gestionar las limitaciones de tamaño de mensaje propias de LoRa. Las cargas útiles son reducidas y, en la práctica, mensajes largos pueden requerir segmentación y reensamblado a nivel de aplicación. Este punto es particularmente importante si se pretende transmitir mensajes estructurados con varios campos, ya que el tamaño puede exceder rápidamente el máximo práctico por paquete. La implementación de segmentación robusta (con numeración de fragmentos, control de integridad y confirmaciones) permite convertir un medio de bajo caudal en un soporte viable para mensajes más ricos, siempre dentro de límites razonables.

Adicionalmente, la mensajería avanzada puede integrar metadatos operativos (posición, hora, estado, etiquetas de ejercicio), construyendo una capa de conciencia situacional mínima. En el entorno naval, donde la posición y la coordinación de maniobras son esenciales, la posibilidad de asociar

mensajes a coordenadas (cuando existe GPS) habilita registros de eventos y seguimiento básico. Esto es coherente con la tendencia general hacia la valorización del dato y la integración de información en sistemas CIS modernos, que se describen en literatura profesional sobre evolución de CIS y digitalización en plataformas navales [4]. Sin entrar en análisis, se puede constatar que la dirección general de los sistemas reales es hacia integración, trazabilidad y explotación del dato; por tanto, una herramienta académica puede alinearse conceptualmente con esa orientación.

Finalmente, en términos de seguridad, Meshtastic ya incorpora cifrado de *payload* con AES-256 por canal [29], lo que constituye una base para privacidad y compartimentación (canales con claves diferentes). Sobre esta base, pueden añadirse medidas de “operación” como rotación de claves por ejercicios, separación de redes por canales, y procedimientos de distribución controlada de PSK entre participantes. De nuevo, esto permite aproximar prácticas reales de compartimentación de información, sin necesidad de entrar en entornos clasificados.

Las tecnologías LP-WAN y las arquitecturas LoRa-Mesh constituyen, por tanto, una base tecnológica viable para habilitar comunicaciones tácticas autónomas en escenarios limitados o de instrucción (ver Tabla 2-2 donde se comparan las principales características de una comunicación en HF y en redes LoRa). No obstante, para comprender el encaje real de estas soluciones en el ecosistema naval español, es necesario analizar previamente cómo se estructuran actualmente los sistemas de comunicaciones y mando y control en la Armada.

El siguiente apartado examina el estado actual de los medios de transmisión, redes y herramientas de mensajería empleados por la Armada, proporcionando el marco institucional y tecnológico en el que se inserta la propuesta desarrollada en este trabajo.

Parámetro	HF tradicional	LoRa / LoRa-Mesh
Alcance	Muy alto (cientos o miles de km)	Regional (varios km)
Consumo energético	Alto	Muy bajo
Potencia de transmisión	Elevada	Baja
Discreción radioeléctrica (LPI/LPD)	Limitada	Mayor discreción relativa
Infraestructura necesaria	Equipos radio dedicados	Nodos compactos y autónomos
Facilidad de despliegue	Media / requiere planificación	Muy alta

Tabla 2-2 Comparación entre comunicaciones HF tradicionales y redes LoRa.

2.3 Sistemas actuales de comunicaciones y mando y control en la Armada

El ecosistema de comunicaciones y mando y control (C2) de la Armada se articula en una arquitectura de capas donde es preciso diferenciar el segmento de transporte (el portador físico del dato) de la capa de aplicación (la herramienta que gestiona la información). Esta distinción resulta fundamental para comprender el sistema en su conjunto, ya que herramientas como SACOMAR o el chat del Sistema de Mando y Control Nacional no constituyen el medio físico de comunicación, sino aplicaciones que se apoyan en infraestructuras como HF, satélites o redes IP.

2.3.1 Medios de transmisión y soporte de las comunicaciones navales

La banda de HF constituye históricamente el principal medio de comunicación más allá de línea de vista (BLOS) sin necesidad de infraestructura satelital, gracias a la propagación ionosférica. En el ámbito de la Armada, este medio se materializa principalmente en el sistema BRASS (*Broadcast and Ship-*

Shore System), orientado a proporcionar comunicaciones en HF tanto en modalidad de radiodifusión como en enlaces buque-tierra.

Aunque las comunicaciones por satélite han incrementado enormemente la capacidad de transmisión de datos, la HF mantiene una relevancia estratégica, especialmente en escenarios DDIL, donde el acceso al satélite puede verse degradado o denegado. En este contexto, la HF se consolida como elemento de resiliencia y continuidad operativa [5]. La Armada dispone de distintas estaciones radio repartidas por el territorio español, como la de la Figura 2-7, que aseguran el mantenimiento de la capacidad de comunicarse mediante HF.



Figura 2-7 Estación radionaval de Bermeja [30].

La evolución tecnológica de este medio se refleja en la transición hacia BREITA, entendida como modernización del sistema BRASS para permitir conmutación de paquetes e integración con redes basadas en Protocolo de Internet (IP). La documentación técnica describe que esta evolución incorpora estándares OTAN (por ejemplo, STANAG asociados a IP sobre HF) y permite transportar servicios digitales, como mensajería y transferencia de datos, sobre un medio de baja capacidad pero elevada robustez [5], [31]. Esta transición no implica la sustitución de la HF por SATCOM, sino su adaptación a arquitecturas modernas, manteniendo su papel como respaldo estratégico en entornos degradados.

Las Comunicaciones por Satélite (SATCOM, *Satellite Communications*) constituyen el principal medio de transmisión de datos de alta capacidad para unidades navales desplegadas. El Plan de Capacidades CIS/TIC 2024–2029 identifica el programa SECOMSAT (Sistema Español de Comunicaciones por Satélite) como uno de los pilares del ámbito conjunto, incluyendo terminales satélite, nodos de interconexión y sistemas de gestión de red [6].

El mismo plan recoge la transición hacia los satélites SPAINSAT NG (*Next Generation*), con previsión de lanzamiento en 2025–2026 y disponibilidad de bandas X, Ka y UHF SATCOM. Esta evolución refuerza la soberanía tecnológica y amplía las capacidades de transmisión de datos seguros, consolidando el satélite como principal soporte para sostener servicios IP y aplicaciones de mando y control en la mar [6]. La transición hacia SPAINSAT NG constituye un cambio real en el medio satelital, orientado a aumentar capacidad, seguridad y continuidad operativa.

La I3D (Infraestructura Integral de Información para la Defensa) constituye la columna vertebral conjunta basada en redes IP que integra sistemas de información y telecomunicaciones del Ministerio de Defensa. El plan distingue entre la Red de Transporte y los componentes de Acceso y Frontera, que habilitan conectividad segura en cada nodo [6], siendo todo gestionado por el CESTIC.

Para la Armada, resulta especialmente relevante la necesidad de considerar a los buques como nodos móviles que requieren conectividad segura tanto en puerto como en la mar, lo que implica integración

con SATCOM y otros medios para garantizar acceso a I3D desde unidades desplegadas [6]. La implantación progresiva de I3D representa una consolidación estructural de la infraestructura IP conjunta, aunque no supone sustitución de medios radio o satelitales, sino su integración.

Los Enlaces Tácticos de Datos (TDL, *Tactical Data Links*) como Link-11, Link-16 y Link-22 constituyen medios específicos para intercambio de información táctica entre plataformas navales. La literatura profesional los sitúa como parte integrante del ecosistema CIS embarcado [32].

El Plan CIS/TIC identifica una transición relevante en la arquitectura nacional de distribución mediante JREAP (*Joint Range Extension Applications Protocol*), señalando la necesidad de rediseñar la arquitectura para diferenciar claramente entre nivel táctico (plataformas) y nivel operacional/estratégico (nodos del Sistema de Mando y Control Nacional). Este rediseño busca mejorar control y gobernanza del flujo de información táctica [6].

2.3.2 Herramientas y servicios de mensajería y mando y control

En la actualidad, la Armada Española dispone de un conjunto de herramientas de mensajería y sistemas de mando y control que operan sobre los distintos medios de transmisión disponibles (HF, comunicaciones por satélite, redes IP y enlaces tácticos). Estas herramientas permiten la transmisión estructurada de órdenes, la coordinación operativa en tiempo real y la generación de la imagen operativa común en los distintos niveles de conducción de las operaciones. El ecosistema vigente distingue entre sistemas de ámbito nacional y sistemas de ámbito multinacional, en función del marco de autoridad bajo el que se desarrollen las operaciones.

El SACOMAR (Sistema Automático de Conmutación de Mensajes de la Armada) constituye el sistema de mensajería formal empleado en la Armada para la transmisión de mensajes estructurados conforme a normativa OTAN, especialmente bajo el marco del protocolo ACP-127 [3]. Cabe recalcar que el SACOMAR como tal ha caído en desuso y ha evolucionado por necesidades tecnológicas hacia otras aplicaciones (SUSE, MEFO), que prestan los mismos servicios y funcionan igual.

Estas herramientas permiten la elaboración, transmisión, recepción, registro y archivo de mensajes con encabezamientos normalizados, precedencias, trazabilidad y control formal del flujo de información. Operan sobre distintos medios de transmisión, incluyendo Alta Frecuencia, comunicaciones por satélite y redes IP, lo que posibilita su empleo tanto en puerto como en la mar [3].

Desde el punto de vista tecnológico, SACOMAR ha evolucionado hacia plataformas basadas en sistemas operativos Linux (SACOMAR SUSE), manteniendo su funcionalidad doctrinal mientras se adapta a entornos IP actuales. El planeamiento de capacidades contempla su integración progresiva en el marco del Sistema de Mando y Control Nacional, manteniéndose actualmente operativo como sistema de mensajería formal en la Armada [6]. También se ha desarrollado MEFO, que es una evolución del antiguo SACOMAR, pero solo usado en el ámbito nacional. SACOMAR será uno de los sistemas principales en el que se inspira el desarrollo de la herramienta de mensajería que se explicará a lo largo del trabajo.

El Sistema de Mando Naval (SMN), ya extinguido, ha constituido el entorno IP propio de la Armada para la prestación de servicios de mando y control en el ámbito nacional. Se trataba de una red basada en arquitectura TCP/IP con nivel de clasificación hasta RESERVADO, sobre la que se implementaban servicios de correo electrónico, aplicaciones web, herramientas colaborativas y mensajería interna. Proporcionaba conectividad a unidades en puerto y en la mar mediante su integración con los medios de transmisión disponibles. Sus aplicaciones han estado orientadas al apoyo al mando naval y a la gestión de información en el ámbito específico de la Armada. En el contexto actual, las capacidades del SMN se encuentran integradas progresivamente en el marco conjunto definido por el Sistema de Mando y Control Nacional.

El Sistema de Mando y Control Nacional (SC2N) constituye el sistema conjunto de mando y control de las Fuerzas Armadas españolas. Sustituye al anterior Sistema de Información del JEMAD (SIJE) y

establece un entorno unificado para la conducción de operaciones bajo responsabilidad nacional. Se implantó inicialmente como sistema federado, permitiendo la integración de capacidades específicas de cada ejército dentro de una arquitectura común. En la Armada, esta integración incorpora aplicaciones propias del dominio marítimo, como el *Maritime Command and Control Information System* (MCCIS). Posteriormente, el sistema evoluciona hacia una arquitectura más centralizada, orientada a la convergencia tecnológica y a la unificación de servicios.

Entre los servicios integrados en el SC2N se encuentran:

- Sistemas de chat operativo nacional.
- MCCIS en el segmento marítimo.
- Herramientas de videoconferencia.
- Telefonía IP.
- Plataformas colaborativas y de gestión documental.
- Aplicaciones logísticas y administrativas clasificadas.

El SC2N opera sobre infraestructuras nacionales de red, incluyendo la Infraestructura Integral de Información para la Defensa (I3D) y los medios de comunicación disponibles para unidades desplegadas.

Siguiendo dentro de los sistemas nacionales, encontramos el ENCOMAR (Entorno Colaborativo Marítimo de la Armada). Es una herramienta del COVAM que, en la práctica, funciona también como una especie de chat operativo para facilitar el intercambio ágil de información y la coordinación entre la Armada y otros organismos del ámbito marítimo. Por ello, constituye una referencia actual en el empleo de plataformas digitales de apoyo al mando y control en el entorno marítimo.

En el ámbito multinacional, una de las herramientas de mensajería operativa ampliamente empleadas es JChat (*Joint Chat*). Se trata de un sistema de mensajería táctica en tiempo casi real utilizado por fuerzas armadas de diversos países aliados, especialmente en el marco de operaciones OTAN y de coalición lideradas por Estados Unidos. JChat constituye una evolución de los sistemas de chat táctico desarrollados a finales de los años noventa para proporcionar un canal de coordinación rápida entre mandos, centros de operaciones y unidades desplegadas.

JChat se integra sobre redes clasificadas e infraestructuras de coalición, permitiendo la comunicación entre participantes autorizados dentro de un dominio específico de operación. A diferencia de los sistemas formales de mensajería estructurada (como los basados en ACP-127), JChat está orientado a la coordinación dinámica y a la transmisión de información operativa inmediata, facilitando la creación de múltiples salas de chat organizadas por funciones, áreas geográficas o grupos de misión. Desde el punto de vista funcional, JChat permite:

- Creación de salas temáticas permanentes o temporales.
- Mensajería punto a punto entre usuarios.
- Registro y archivo automático de conversaciones.
- Gestión de listas de distribución.
- Integración con otros sistemas C2 para intercambio de información operativa.

En operaciones multinacionales, JChat se ha consolidado como herramienta esencial para la coordinación táctica diaria, especialmente en entornos de alta interacción entre unidades de distintos países. Su empleo es habitual en centros de operaciones combinados, mandos de componente y estructuras OTAN, donde complementa a los sistemas formales de mensajería estructurada y a las herramientas de gestión de información operativa. Esta es la segunda herramienta en la que se inspira la aplicación de mensajería a desarrollar en este proyecto, un chat que conecte a todas las unidades de una fuerza mediante el cual se puedan coordinar ejercicios de manera sencilla e instantánea y pudiendo gestionar las conversaciones según lo requieran las circunstancias operacionales.

En el caso de la Armada Española, cuando participa en operaciones bajo autoridad OTAN o en coaliciones internacionales (Figura 2-8), el acceso a JChat se realiza a través de las redes correspondientes (NSWAN, CENTRIXS o redes de misión específicas), integrándose en el ecosistema multinacional de mando y control. Su función no sustituye a los sistemas nacionales de mensajería formal, sino que proporciona un canal ágil para la coordinación operativa inmediata y el intercambio de información en tiempo real dentro del marco autorizado de la operación.

De este modo, JChat representa actualmente uno de los instrumentos de mensajería táctica más extendidos en el entorno aliado, configurando junto con los sistemas nacionales (SACOMAR, plataformas SC2N, herramientas colaborativas del SMN) el conjunto de herramientas disponibles para la conducción de operaciones en el ámbito marítimo nacional y multinacional.



Figura 2-8 La fragata F101 Álvaro de Bazán realizando operaciones junto con el grupo de combate americano del portaaviones US Gerald R. Ford [33].

La *NATO Secret Wide Area Network* (NSWAN) constituye el principal sistema de mando y control de la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN). Se trata de una red aliada empleada en operaciones bajo estructura OTAN y utilizada por los países miembros para la conducción y coordinación de operaciones multinacionales. Integra servicios como correo electrónico, plataformas colaborativas, videoconferencia, telefonía IP y sistemas de información operativa propios del entorno OTAN. Su arquitectura, normativa y niveles de clasificación responden al marco aliado y no al ámbito nacional español. Cuando una unidad de la Armada participa en una operación bajo autoridad OTAN, puede operar en el entorno NSWAN de forma paralela al entorno nacional.

CENTRIXS es una red empleada en entornos de coalición, especialmente en operaciones lideradas por Estados Unidos. Permite el intercambio de información clasificada a nivel de coalición y se despliega en unidades integradas en grupos de combate multinacionales o en operaciones específicas. Su empleo depende del marco operativo concreto y se activa durante el periodo de participación en la operación correspondiente.

La *Atalanta Classified Mission Network* (ACMN) constituye la red clasificada empleada en la operación ATALANTA bajo marco de la Unión Europea. Proporciona servicios de comunicación, chat, videoconferencia y herramientas colaborativas específicas para dicha operación, y su activación está vinculada al despliegue en el marco de la misión europea. De forma similar, la MEDCMN se emplea como red segura de comunicaciones en el entorno de EUNAVFOR MED, orientada al intercambio protegido de información y a la coordinación operativa entre los participantes de la misión en el Mediterráneo.

La *Mission Secret Wide Area Network* (MSWAN) es una red empleada en determinadas operaciones OTAN que incluyen la participación de países no aliados formales. Facilita la interoperabilidad en entornos multinacionales ampliados y se activa en función de los requisitos específicos de cada misión.

El entorno actual de mando y control de la Armada Española se caracteriza por la coexistencia e integración de sistemas nacionales y multinacionales que permiten operar tanto bajo autoridad nacional como en marcos aliados. En el ámbito nacional, el Sistema de Mando y Control Nacional (SC2N) constituye el sistema conjunto de referencia para las Fuerzas Armadas, integrando de forma progresiva las capacidades específicas de cada ejército, incluido el dominio marítimo, y proporcionando un entorno unificado para la conducción de operaciones y la gestión de la información operativa.

En el ámbito multinacional, la interoperabilidad se articula a través de redes aliadas como la *NATO Secret Wide Area Network* (NSWAN) y otras redes de misión específicas tales como CENTRIXS, ACMN o MSWAN, que habilitan el intercambio de información clasificada y la coordinación en operaciones OTAN, de la Unión Europea o de coalición. Sobre estas infraestructuras se emplean herramientas colaborativas y de mensajería operativa como JChat, ampliamente utilizada en entornos aliados para la coordinación táctica en tiempo casi real entre mandos, centros de operaciones y unidades desplegadas, complementando así los sistemas nacionales de mensajería formal y estructurada.

3 DISEÑO DEL SISTEMA Y USO DE MESHTASTIC

3.1 Arquitectura de la red LoRa-Meshtastic

La red de comunicaciones desarrollada en este trabajo se apoya en la combinación de LoRa como soporte radio y Meshtastic como firmware de red y servicios, conformando una red mallada (*mesh*) capaz de operar sin infraestructura externa. Esta arquitectura permite que las unidades participantes intercambien información sin depender de estaciones base, *gateways*, redes celulares o conectividad IP, manteniendo la capacidad de mensajería en escenarios de baja disponibilidad de comunicaciones convencionales o de desconexión deliberada [34].

Desde el punto de vista de diseño, el sistema se estructura en tres capas:

- Capa física y de enlace basada en LoRa, responsable del alcance, robustez y ocupación del canal.
- Capa de red mallada implementada por Meshtastic, responsable de propagar paquetes en multi-salto.
- Capa de servicios (mensajería, telemetría y posicionamiento), que utiliza la red para transportar información de aplicación.

Esta separación es importante porque permite justificar de forma ordenada las decisiones de configuración: cualquier ajuste sobre parámetros como el factor de ensanchado (SF, *Spreading Factor*), el ancho de banda (BW, *Band Width*) y la tasa de codificación (CR, *Coding Rate*) afectará al rendimiento radio; cualquier ajuste sobre el número de saltos (*hop limit*) y roles afecta a la carga de la malla; y cualquier ajuste sobre canales/cifrado afecta a la seguridad y compartimentación del tráfico [35].

En el contexto específico de este trabajo, la red se despliega sobre nodos LoRa embarcados, operando permanentemente en EU868 (868 MHz) y configurados siempre en modo *Client*. Esta decisión no busca optimizar el sistema desde cero, ya que la elección y validación de un perfil operativo fue objeto de un trabajo previo, sino establecer una arquitectura estable y coherente sobre la que se construye la herramienta de mensajería táctica y su lógica de funcionamiento [7].

3.1.1 Fundamentos de la tecnología LoRa

La tecnología LoRa fue desarrollada por la empresa Semtech y, como se ha explicado en el estado del arte, se emplea principalmente en redes de tipo LP-WAN orientadas a aplicaciones de sensores distribuidos y comunicaciones de baja tasa de datos [36]. El funcionamiento de LoRa se basa en una técnica de modulación denominada *Chirp Spread Spectrum* (CSS). En este método, la información se transmite mediante señales cuya frecuencia varía progresivamente dentro de un determinado ancho de banda (Figura 3-1). Esta técnica proporciona una gran robustez frente al ruido y a las interferencias,

permitiendo que el receptor pueda detectar la señal incluso aunque su potencia se encuentra por debajo del nivel de ruido del canal [37], es decir, aunque la SNR sea negativa.

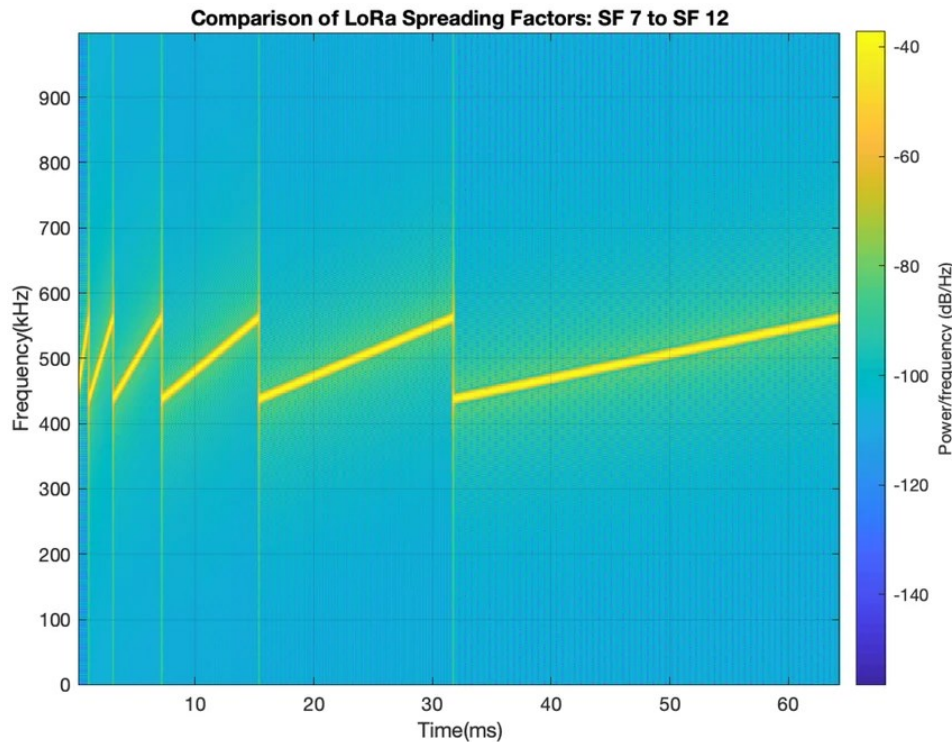


Figura 3-1 Factores de dispersión disponibles en LoRa [38].

LoRa define la modulación y parámetros radio que determinan el rendimiento del enlace. En Meshtastic, estos parámetros, junto con potencia de transmisión y parámetros regionales, se exponen como:

- Factor de ensanchado (SF): define el número de símbolos utilizados para representar cada bit transmitido. Valores elevados de SF aumentan la sensibilidad del receptor y permiten alcanzar mayores distancias de comunicación, aunque incrementan el tiempo necesario para transmitir cada paquete.
- Ancho de banda (BW): determina el rango de frecuencias utilizado para transmitir la señal. Un ancho de banda mayor permite aumentar la velocidad de transmisión, pero reduce ligeramente la sensibilidad del sistema.
- *Coding Rate* (CR): indica el nivel de corrección de errores aplicado durante la transmisión. Una mayor redundancia permite mejorar la fiabilidad del enlace en presencia de ruido o interferencias, a costa de una reducción en la velocidad efectiva de transmisión.

Esta configuración no es un detalle menor: en un medio de baja tasa como LoRa, el factor crítico de operación es el tiempo en aire (*time-on-air*), es decir, cuánto tiempo ocupa cada transmisión el canal compartido. En redes *mesh*, donde un mismo paquete puede retransmitirse varias veces, el tiempo en aire se convierte en un multiplicador directo de la carga total y, por tanto, del riesgo de colisiones y degradación del servicio [35]. La combinación de estos parámetros determina el equilibrio entre alcance, robustez del enlace y velocidad de transmisión, por lo que su selección resulta crítica para el correcto funcionamiento de la red [39].

Gracias a estas características, LoRa permite alcanzar distancias de comunicación de varios kilómetros utilizando potencias de transmisión relativamente bajas. En entornos abiertos se han documentado alcances superiores a 10 km, mientras que en entornos con obstáculos el alcance suele situarse entre varios cientos de metros y algunos kilómetros dependiendo de la configuración de la señal y de las condiciones del entorno radioeléctrico [36].

Meshtastic aborda esta complejidad proponiendo configuraciones predeterminadas que agrupan SF/BW/CR en perfiles con significado práctico (“más rápido”, “más alcance”, etc.). La configuración LoRa del dispositivo incluye, entre otros, región, *modem preset* y *max hops*, y que estos parámetros deben ser consistentes en toda la malla para asegurar interoperabilidad [40]. En la Tabla 3-1 se reflejan las prestaciones de cada configuración predeterminada.

Radio Preset	Preset Name	Data-Rate (kbps)	SF / Symbols	Coding Rate	Bandwidth (kHz)	Link Budget (dB)
Short Range / Turbo	Short Turbo	21.88	7 / 128	4/5	500	140
Short Range / Fast	Short Fast	10.94	7 / 128	4/5	250	143
Short Range / Slow	Short Slow	6.25	8 / 256	4/5	250	145.5
Medium Range / Fast	Medium Fast	3.52	9 / 512	4/5	250	148
Medium Range / Slow	Medium Slow	1.95	10 / 1024	4/5	250	150.5
Long Range / Turbo	Long Turbo	1.34	11 / 2048	4/8	500	150
Long Range / Fast	Long Fast	1.07	11 / 2048	4/5	250	153
Long Range / Moderate	Long Moderate	0.34	11 / 2048	4/8	125	156
Long Range / Slow	Long Slow	0.18	12 / 4096	4/8	125	158.5

Tabla 3-1 Principales configuraciones predeterminadas ofrecidas por Meshtastic [41].

En Europa, operar en EU868 implica además compatibilidad con el marco regulatorio aplicable a dispositivos SRD (*Short Range Devices*), que establece límites técnicos y restricciones de ocupación del canal (*duty cycle*) en determinadas bandas y sub-bandas. La normativa europea recoge que el *duty cycle* a la frecuencia de operación no debe exceder los valores definidos para la banda escogida. Este punto es relevante porque, incluso si la aplicación es local y de baja potencia, el diseño responsable debe asumir que la red debe funcionar dentro del marco de limitaciones de emisión y ocupación del espectro en EU868 [42].

3.1.2 Funcionamiento de Meshtastic

En la arquitectura de Meshtastic, cada nodo puede transmitir mensajes propios y, al mismo tiempo, reenviar automáticamente mensajes recibidos desde otros nodos. Este mecanismo permite que la

información se propague a través de múltiples saltos dentro de la red, extendiendo el alcance efectivo del sistema más allá de la distancia directa entre dos dispositivos.

En concreto, el mecanismo de encaminamiento es descrito como una inundación gestionada (*managed flood routing*). La idea central es que los mensajes se difunden a través de la red mediante retransmisiones controladas (como se ve gráficamente en la Figura 3-2): un nodo que recibe un paquete decide si debe reenviarlo, aplicando un límite de saltos y un control de duplicados para evitar retransmisiones infinitas [34].

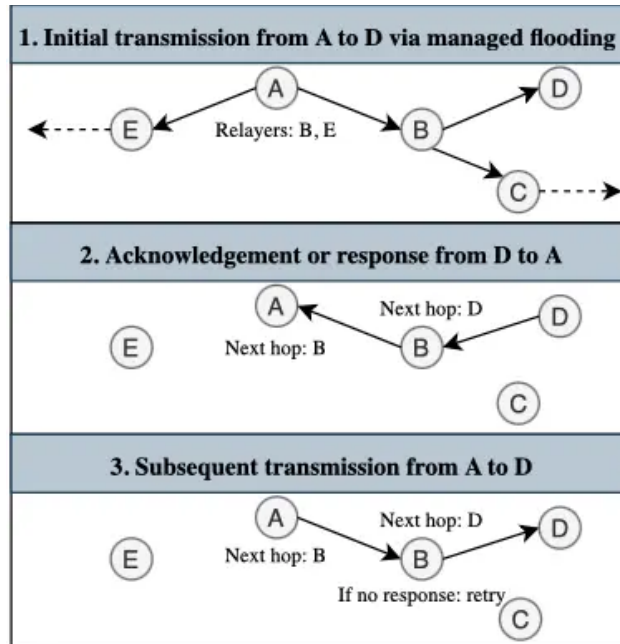


Figura 3-2 Procedimiento que sigue la inundación gestionada para retransmitir mensajes [34].

La documentación técnica y el propio blog del proyecto explican que, aunque el *flooding* es la estrategia más simple para una malla de baja capacidad, Meshtastic incorpora optimizaciones para reducir colisiones: antes de retransmitir, el nodo espera un intervalo y escucha si otro nodo ya está retransmitiendo, lo que disminuye el tráfico redundante y mejora la eficiencia global [43].

En términos de diseño de red, el parámetro *Max Hops* se convierte en una variable estructural: valores pequeños limitan el alcance multi-salto; valores grandes aumentan la probabilidad de entrega en redes dispersas, pero incrementan tráfico, consumo de batería y probabilidad de colisión. Por ello, en una malla táctica de baja tasa, *Max Hops* debe considerarse un “presupuesto de retransmisión” y no una forma indiscriminada de extender alcance [34].

El encaminamiento de los mensajes se basa en un mecanismo de retransmisión controlada en el que cada paquete incluye un contador de saltos. Como se representa en la Figura 3-3, este contador se decrementa en cada retransmisión, evitando que los paquetes circulen indefinidamente dentro de la red. Este enfoque simplifica el funcionamiento del sistema y evita la necesidad de mantener tablas de rutas complejas, lo que resulta adecuado para redes de baja tasa de datos y dispositivos con recursos limitados.

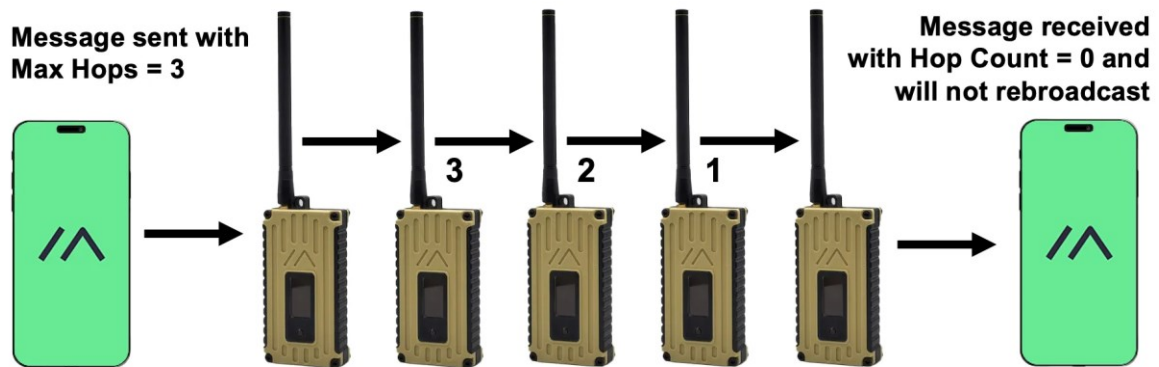


Figura 3-3 Ejemplo de uso del parámetro Max Hops [35].

Además de la mensajería entre usuarios, Meshtastic permite la transmisión de distintos tipos de información, entre los que destacan:

- Mensajes de texto entre nodos
- Información de estado de los dispositivos
- Datos de telemetría
- Posiciones GPS de los nodos

Los dispositivos utilizados en este trabajo integran receptores GNSS que permiten compartir periódicamente la posición de cada nodo dentro de la red. Esta información puede visualizarse posteriormente en aplicaciones externas, proporcionando una representación geográfica del despliegue de nodos.

Para garantizar la seguridad de las comunicaciones, los mensajes transmitidos dentro de la red pueden cifrarse mediante AES-256, proporcionando confidencialidad básica en entornos de difusión radioeléctrica [9], como será explicado en la sección 3.1.4.

3.1.3 Roles de dispositivo

Meshtastic ofrece diferentes roles (*Client*, *Router*, *Repeater*, etc.) para adaptar el comportamiento del nodo a su función. En este trabajo, la decisión es explícita: todos los nodos operan en modo *Client*, lo que homogeneiza el comportamiento de la red y evita introducir dependencias funcionales de nodos “preferentes” o fijos.

La propia documentación de Meshtastic describe los roles y su efecto sobre la retransmisión de tráfico, distinguiendo modos que retransmiten más o menos tipos de mensajes y que están pensados para nodos estratégicamente colocados [44]. Además, el proyecto recomienda evitar el uso innecesario de roles como *ROUTER* o *REPEATER* porque pueden generar problemas de red (más colisiones, peores tasas de entrega y consumo innecesario de saltos), lo cual es coherente con una red de nodos móviles y comparables en capacidades [45]. La Tabla 3-2 resume los diferentes tipos de roles definidos en Meshtastic.

Desde la lógica del sistema, la operación en *Client* en todos los nodos respalda dos objetivos: simplicidad operativa, ya que el despliegue no requiere identificar nodos privilegiados; y robustez, ya que la red no “depende” de un router fijo que, al perderse, degrade significativamente la conectividad. Este enfoque es especialmente coherente cuando todos los nodos son plataformas móviles y ninguna unidad actúa como infraestructura persistente.

Rol	Función principal	Uso típico
CLIENT	Nodo estándar que envía, recibe y puede retransmitir mensajes.	Dispositivos de usuario en la red.
CLIENT_MUTE	Nodo que no retransmite paquetes de otros nodos.	Dispositivos que solo participan como terminales.
CLIENT_HIDDEN	Nodo con emisiones reducidas para minimizar tráfico o visibilidad.	Despliegues con restricciones de energía o señalización.
CLIENT_BASE	Nodo que retransmite activamente tráfico de la red.	Estaciones base o nodos con buena cobertura.
ROUTER	Nodo de infraestructura para ampliar la cobertura de la red.	Puntos estratégicos de la malla.
REPEATER	Nodo dedicado a retransmitir paquetes automáticamente.	Extensión de cobertura en zonas sin enlace directo.

Tabla 3-2 Roles principales que se pueden atribuir a los nodos en Meshtastic [44].

3.1.4 Canales y seguridad: PSK y cifrado AES-256

La organización lógica de la red se realiza mediante canales. En Meshtastic, cada canal se asocia a una clave precompartida (PSK), y el contenido de los mensajes se cifra a nivel de *payload*. La documentación oficial especifica que Meshtastic proporciona AES256-CTR para el *payload*, usando una clave diferente por canal, y que la cabecera se transmite sin cifrar para permitir el reenrutamiento por nodos que no puedan descifrar el contenido [29].

Este punto es crucial desde el punto de vista arquitectónico: el cifrado protege el contenido, pero no impide que la red funcione como malla, ya que el encaminamiento se basa en cabeceras no cifradas. A la vez, el propio proyecto documenta limitaciones asociadas a este modelo de cifrado por PSK, señalando que, al basarse en clave compartida, cualquier participante con la PSK puede inyectar mensajes como otro nodo si no se aplican mecanismos adicionales de autenticación a nivel [46]. En un escenario de adiestramiento controlado, esto resulta aceptable como punto de partida, pero es relevante dejar constancia de la limitación porque afecta a la interpretación de “seguridad” como confidencialidad vs autenticación.

En la práctica del sistema de mensajería que se desarrolla en el trabajo, esta arquitectura de seguridad se traduce en una necesidad operativa clara: todos los nodos deben compartir la misma configuración de canal/PSK para poder leer mensajes del canal común, y, si se crean canales segregados (por rol o tipo de tráfico), esa segregación se fundamenta en la gestión de PSKs [29].

3.1.5 Configuración de red adoptada

Una vez descritos los fundamentos de la tecnología LoRa y el funcionamiento de la red mallada implementada por Meshtastic, es necesario definir la configuración concreta de los parámetros de red sobre la que se construye el sistema desarrollado en este trabajo. A diferencia de otros proyectos en los que la selección de dichos parámetros forma parte del propio proceso de diseño, en el presente trabajo la configuración radio de la red no se determina desde cero, sino que se adopta a partir de una configuración previamente validada experimentalmente en el mismo entorno operativo [7].

En particular, en [7] se llevó a cabo un estudio detallado del comportamiento de diferentes configuraciones LoRa utilizando nodos Meshtastic desplegados en las lanchas de instrucción de la Escuela Naval Militar. Durante este trabajo se realizaron pruebas de alcance y estabilidad de enlace

mediante la herramienta *Range Test*, evaluando distintos perfiles de modulación y analizando métricas radio como la intensidad de señal recibida (RSSI) y la relación señal-ruido (SNR) a lo largo de diferentes trayectorias de navegación. Meshtastic ya da una comparación general de las distintas configuraciones como se puede ver en la Figura 3-4.

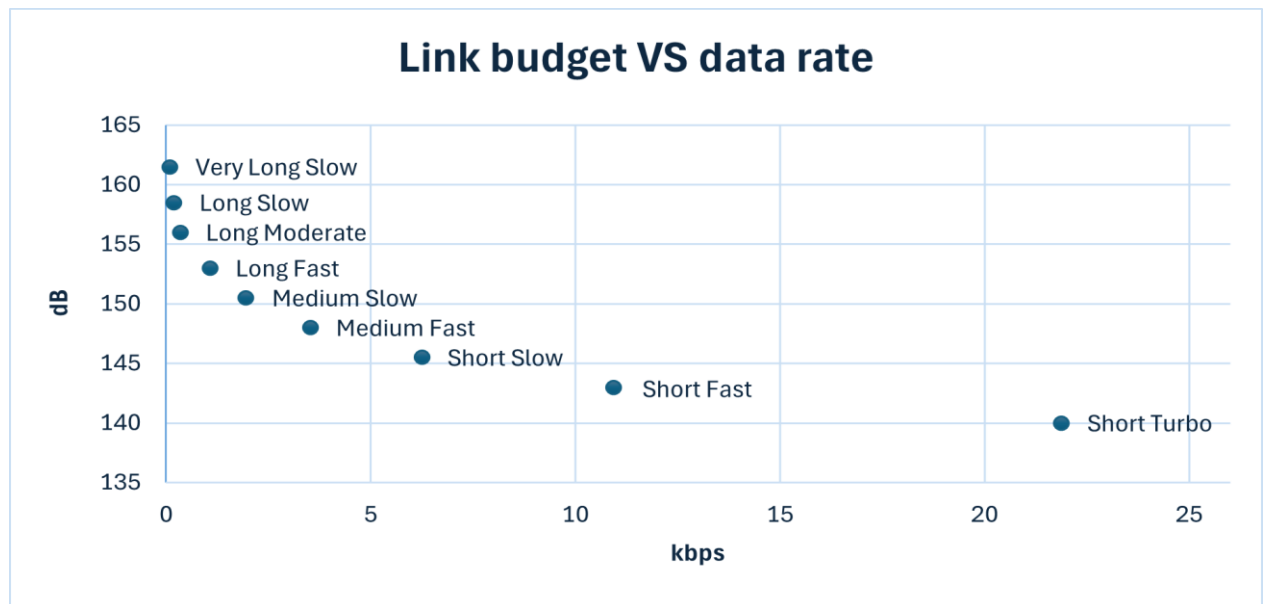


Figura 3-4 Comparación gráfica de las distintas configuraciones predeterminadas dadas por Meshtastic [41].

Las pruebas realizadas comparaban distintos perfiles de señal disponibles en Meshtastic, entre ellos *Short Fast*, *Long Fast* y *Long Moderate*, con el objetivo de analizar el compromiso existente entre alcance, robustez del enlace y velocidad de transmisión. Los resultados obtenidos muestran que los perfiles con *Spreading Factor* bajo, como *Short Fast* ($SF = 7$), presentan una menor sensibilidad del receptor y, por tanto, una mayor probabilidad de pérdida de paquetes cuando aumenta la distancia entre nodos. Específicamente, en [7] se señala que los paquetes transmitidos con $SF = 7$ “tienen menos sensibilidad que los demás, por lo que la probabilidad de pérdida de paquetes es mayor”, lo que se refleja en una degradación más rápida del enlace al aumentar la distancia entre dispositivos.

Del mismo modo, el análisis de los resultados de las pruebas de alcance muestra que el perfil *Short Fast* pierde una proporción importante de los paquetes en distancias cercanas a los 4 km, mientras que configuraciones con *Spreading Factor* más elevado, como *Long Fast* o *Long Moderate*, mantienen niveles de recepción significativamente más estables en ese mismo rango de distancias. Este comportamiento se observa claramente en las gráficas de evolución de RSSI (Figura 3-5) y SNR (Figura 3-6), donde las configuraciones con SF mayor conservan la capacidad de comunicación incluso cuando el enlace comienza a degradarse.

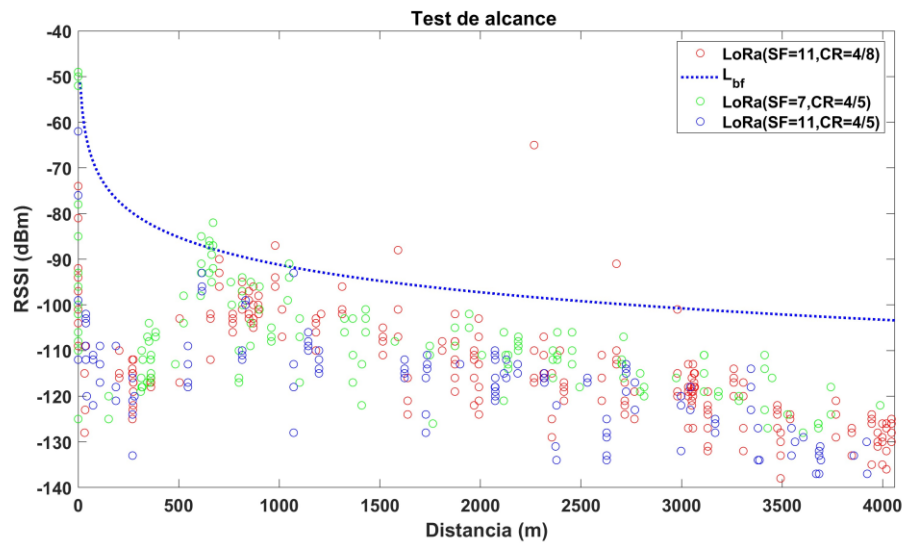


Figura 3-5 RSSI frente a distancia [7].

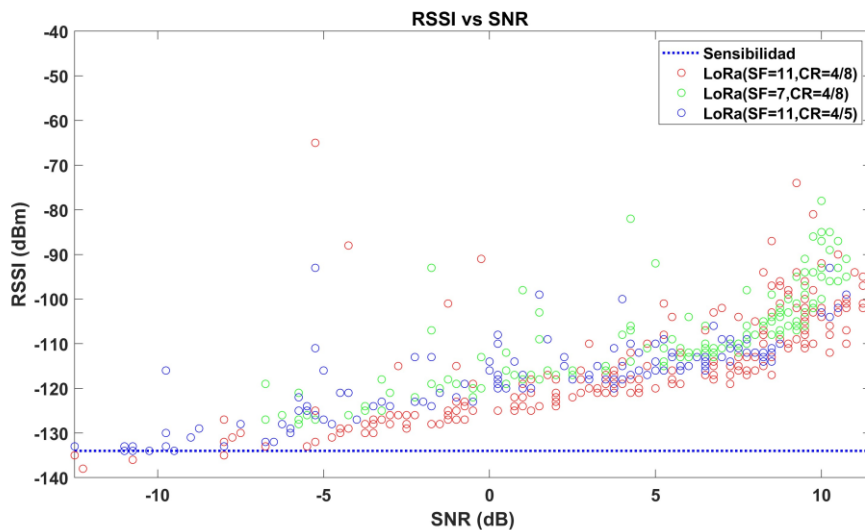


Figura 3-6 RSSI frente a SNR [7].

A partir de estos resultados experimentales, en [7] se establece el *preset Long Fast* como aquella configuración operativa final que mejor se adapta a nuestro entorno, seleccionándolo por ofrecer un equilibrio adecuado entre alcance efectivo del enlace y velocidad de transmisión. Según se describe en el apartado de configuración de la red, este perfil proporciona una combinación satisfactoria de rapidez, fiabilidad y robustez, permitiendo mantener comunicaciones estables entre las diferentes lanchas durante las pruebas de navegación realizadas.

Sobre esta base, el sistema se configuró con una serie de parámetros operativos que definen el comportamiento de la red desplegada. En primer lugar, la red opera en la región EU868, correspondiente a la banda de 868 MHz utilizada en Europa para dispositivos de corto alcance. Asimismo, todos los nodos se configuran utilizando el *preset Long Fast*, lo que garantiza que todos los dispositivos operen con los mismos parámetros de modulación y puedan formar parte de la misma red mallada.

El parámetro *Max Hops* se fija en un valor de 3, permitiendo que los mensajes se propaguen a través de la red mediante hasta tres saltos entre nodos. Este valor proporciona un compromiso adecuado entre extensión del alcance efectivo de la red y control del tráfico de retransmisiones dentro de la malla.

En cuanto al comportamiento de los nodos, todos los dispositivos se configuran en modo *Client*, lo que implica que cada nodo puede enviar, recibir y retransmitir mensajes de forma homogénea sin depender de nodos de infraestructura dedicados. Esta decisión resulta especialmente adecuada en una red formada por plataformas móviles, como es el caso de las lanchas de instrucción, donde la topología de la red puede variar constantemente durante la navegación.

La organización lógica de la red se realiza mediante la creación de un canal de comunicación específico, protegido mediante una clave precompartida que permite cifrar el contenido de los mensajes transmitidos. En este trabajo se establece una clave de 256 bits, proporcionando un nivel básico de confidencialidad en las comunicaciones dentro de la red.

Además, los nodos transmiten periódicamente su posición GPS con un intervalo aproximado de un minuto (configurable a intervalos menores si fuese necesario), permitiendo mantener una representación actualizada de la posición de cada unidad dentro de la red durante la navegación. Para facilitar la identificación operativa de cada nodo, se asigna como nombre del dispositivo el nombre de la lancha correspondiente.

Finalmente, la configuración completa de la red puede transferirse fácilmente entre dispositivos mediante el uso de códigos QR generados por la aplicación Meshtastic (ver Figura 3-7), lo que permite replicar de forma rápida y homogénea la configuración en todos los nodos antes de cada despliegue operativo.

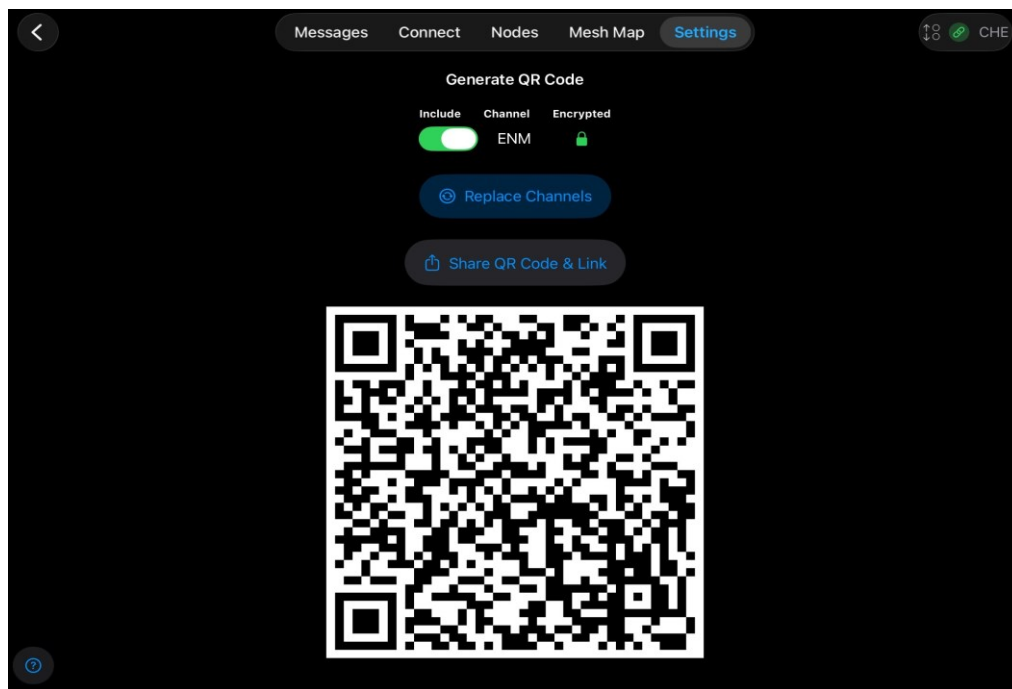


Figura 3-7 QR generado desde un nodo para compartir la configuración y clave.

La eficacia de esta configuración fue comprobada durante diferentes pruebas de navegación realizadas, siguiendo la trayectoria descrita en la Figura 3-8, con una red formada por tres nodos en lanchas y un nodo en tierra, manteniendo la conectividad entre unidades incluso a distancias del orden de varios kilómetros. En uno de los puntos de mayor separación entre nodos, con aproximadamente 8,8 km de distancia, se registraron valores de SNR de -4.5 dB y RSSI de -137 dBm, lo que confirma la capacidad del sistema para mantener comunicaciones operativas en el escenario considerado [7].

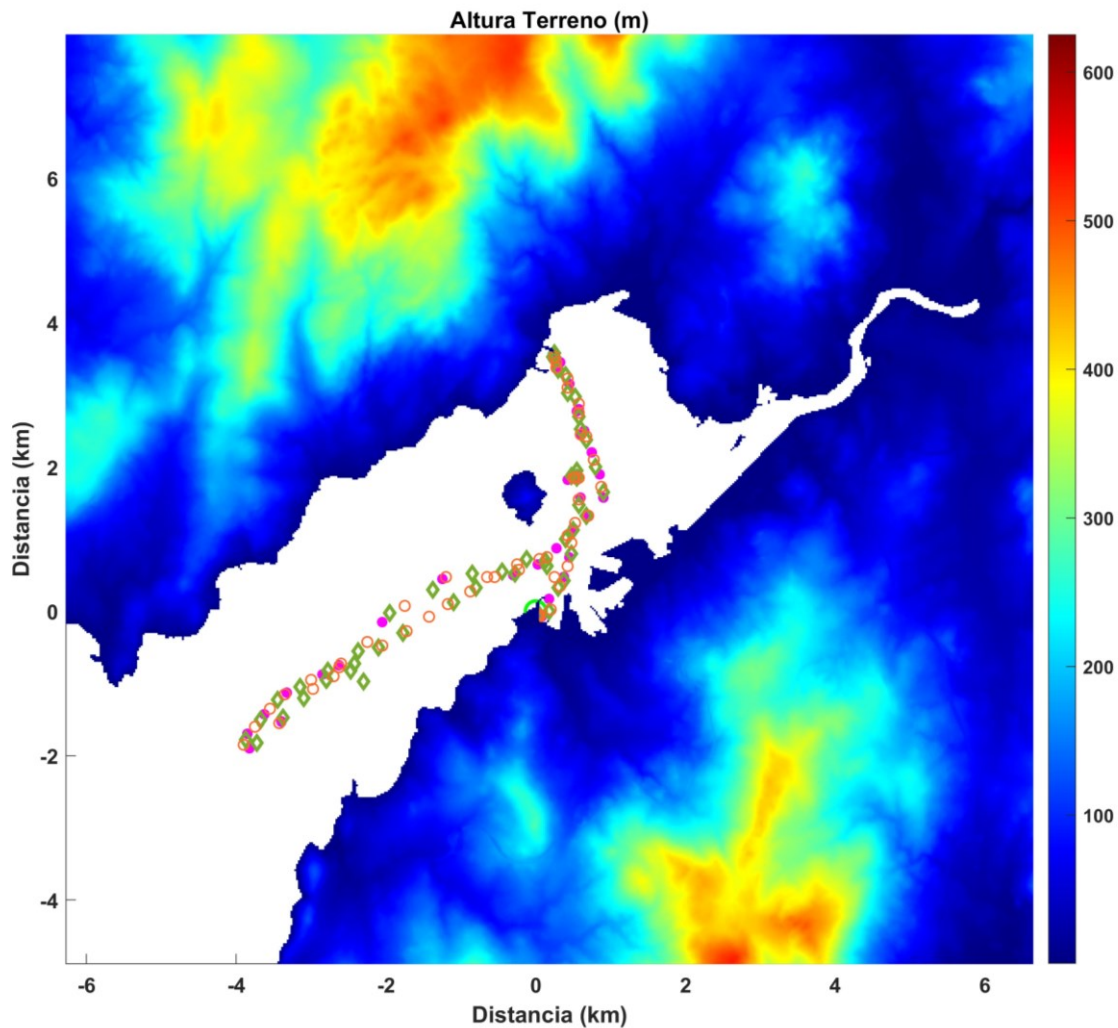


Figura 3-8 Trayectoria de las lanchas de instrucción durante la prueba de alcance [7].

Por todo ello, se adopta esta misma configuración mostrada en la Tabla 3-3 como configuración base de la red LoRa-Meshtastic, centrando el desarrollo del trabajo en el objetivo principal del proyecto: el diseño e implementación de una herramienta de mensajería táctica que utilice esta infraestructura de comunicaciones como soporte.

Parámetro	Valor
Región	EU868
Preset de radio	Long Fast
Número máximo de saltos (<i>Max Hops</i>)	3
Rol de los nodos	Client
Cifrado	AES-256
Intervalo de transmisión GPS	60 s
Canal de comunicación	Canal único protegido mediante PSK

Tabla 3-3 Resumen de configuración de la red LoRa-Meshtastic empleada.

3.1.6 Nodo hardware empleado: LilyGO T-Beam

Como soporte físico de la red LoRa-Meshtastic empleada en este trabajo se ha utilizado la placa LilyGO T-Beam, un dispositivo compacto que integra en un único conjunto los elementos necesarios para formar parte de la red de comunicaciones (Figura 3-9).

La T-Beam incorpora, en primer lugar, un microcontrolador ESP32, que actúa como unidad de procesamiento del dispositivo. Sobre este microcontrolador se ejecuta el firmware Meshtastic, encargado de gestionar las funciones de comunicación, identificación del nodo y transmisión de datos dentro de la red.

Además, la placa dispone de un transceptor LoRa, que constituye el elemento responsable de la comunicación radio entre nodos. Gracias a este módulo, cada dispositivo puede enviar y recibir mensajes a través de la red LoRa, participando en la malla de comunicaciones establecida entre las distintas lanchas. Como se explicará más adelante, esta antena puede ser intercambiada por otras de mejores prestaciones.

Otro elemento importante de la T-Beam es su receptor GPS/GNSS, que permite obtener la posición geográfica del nodo. Esta funcionalidad resulta especialmente útil en el contexto de este trabajo, ya que no solo permite conocer la ubicación de cada unidad, sino también representarla posteriormente en la aplicación desarrollada y en la propia aplicación Meshtastic.

La placa incorpora también una pantalla OLED de pequeño tamaño, que permite visualizar información básica del nodo, como su estado, mensajes breves o datos de posicionamiento. Aunque sus posibilidades de interacción son limitadas en comparación con la aplicación ejecutada en ordenador o en dispositivo móvil, esta pantalla proporciona una solución mínima de operación local directamente sobre el dispositivo.

Por último, la T-Beam dispone de conexión USB, que permite tanto alimentar la placa como conectarla a un ordenador para su configuración o para utilizarla como interfaz entre la aplicación desarrollada y la red LoRa. De este modo, el nodo puede actuar como punto de acceso local a la red, permitiendo que el software intercambie información con el resto de dispositivos.

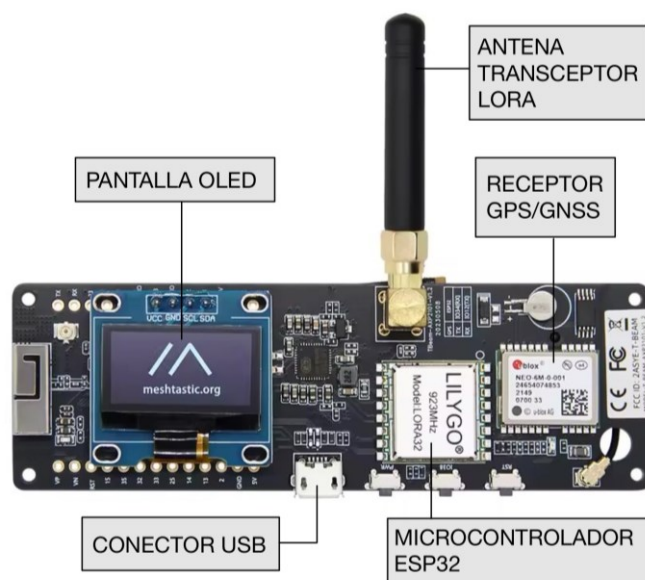


Figura 3-9 Nodo LilyGO T-Beam.

La elección de esta placa resulta adecuada para el presente trabajo porque reúne en un único dispositivo las funciones de procesamiento, comunicación LoRa, posicionamiento y visualización básica, simplificando notablemente el despliegue del sistema en las lanchas de instrucción.

3.2 Meshtastic como herramienta de mensajería táctica

Una vez descrita la arquitectura de la red LoRa-Meshtastic y la configuración adoptada para su despliegue en las lanchas de instrucción, resulta necesario analizar las capacidades que ofrece la propia plataforma Meshtastic como herramienta de comunicación entre unidades. Aunque Meshtastic se concibió inicialmente como un sistema de mensajería descentralizada para redes LoRa de bajo consumo, sus funcionalidades permiten utilizarlo como un sistema básico de intercambio de información entre nodos dentro de una red táctica distribuida.

La aplicación oficial de Meshtastic proporciona una interfaz de usuario que permite interactuar con los nodos de la red, visualizar su estado y enviar mensajes entre dispositivos. Estas aplicaciones están disponibles para distintos entornos, incluyendo dispositivos móviles y ordenadores personales, y se comunican con los nodos LoRa mediante interfaces como Bluetooth, USB o conexión serie. De este modo, cada nodo puede actuar como un terminal de comunicaciones que permite al usuario enviar y recibir información dentro de la red mallada.

Desde el punto de vista funcional, la aplicación permite establecer distintos tipos de comunicación entre nodos. En primer lugar, es posible enviar mensajes al canal común de la red, lo que permite que todos los nodos conectados reciban la información transmitida. Este tipo de comunicación resulta adecuado para avisos generales, coordinación entre unidades o intercambio de información de carácter colectivo.

Además, Meshtastic permite el envío de mensajes privados entre nodos específicos. En este caso, el mensaje se dirige a un identificador concreto dentro de la red, de modo que únicamente el nodo destinatario podrá descifrar y visualizar el contenido transmitido. Esta funcionalidad permite establecer comunicaciones directas entre unidades sin necesidad de saturar el canal común.

Otra capacidad relevante de la aplicación es la difusión automática de información de estado de los nodos. Los dispositivos Meshtastic transmiten periódicamente datos como el nivel de batería, la calidad del enlace o la posición GPS cuando el hardware lo permite. Esta información puede visualizarse en la aplicación, proporcionando al usuario una representación básica de la red y del estado de cada nodo participante.

En conjunto, estas funcionalidades permiten utilizar Meshtastic como un sistema elemental de mensajería táctica en redes de pequeña escala. Aunque su diseño original no está orientado específicamente al entorno militar, la posibilidad de enviar mensajes entre unidades, compartir información de posicionamiento y operar sin dependencia de infraestructuras externas lo convierte en una plataforma adecuada para entornos de instrucción donde se busca simular comunicaciones distribuidas.

No obstante, el uso directo de la aplicación Meshtastic presenta ciertas limitaciones desde el punto de vista de la gestión de la información. Los mensajes se transmiten principalmente como texto libre y la organización de la información es reducida, lo que dificulta su explotación cuando el volumen de mensajes aumenta o cuando se requiere una estructura formal de mensajería. Esta limitación resulta especialmente relevante si se pretende aproximar el funcionamiento del sistema a los procedimientos de comunicación estructurada empleados en el ámbito naval.

Por este motivo, aunque la aplicación Meshtastic permite realizar funciones básicas de mensajería entre nodos, el presente trabajo plantea posteriormente el desarrollo de una herramienta adicional que permita estructurar la información transmitida y organizar el flujo de mensajes de forma más acorde con los principios de las comunicaciones navales.

3.2.1 Tipos de mensajes: canal común, mensajes privados y difusión

La aplicación Meshtastic permite el intercambio de información entre los nodos de la red mediante distintos tipos de mensajes. Estas formas de comunicación determinan el alcance de la información

transmitida y permiten adaptar el flujo de mensajes según el destinatario o el propósito de la comunicación.

Dentro de una red Meshtastic, todos los nodos que comparten la misma configuración de canal pueden intercambiar mensajes a través de la aplicación. Desde el punto de vista del usuario, el sistema permite principalmente dos formas de comunicación: mensajes enviados al canal común de la red y mensajes dirigidos a nodos específicos. A estas capacidades se añade la transmisión automática de información de estado de los dispositivos.

El canal común constituye el mecanismo principal de comunicación dentro de la red. Cuando un usuario envía un mensaje al canal, este se distribuye a todos los nodos que forman parte del mismo canal de comunicación. En la interfaz de la aplicación, estos mensajes aparecen en un único flujo de conversación compartido por todos los participantes (ver Figura 3-10).

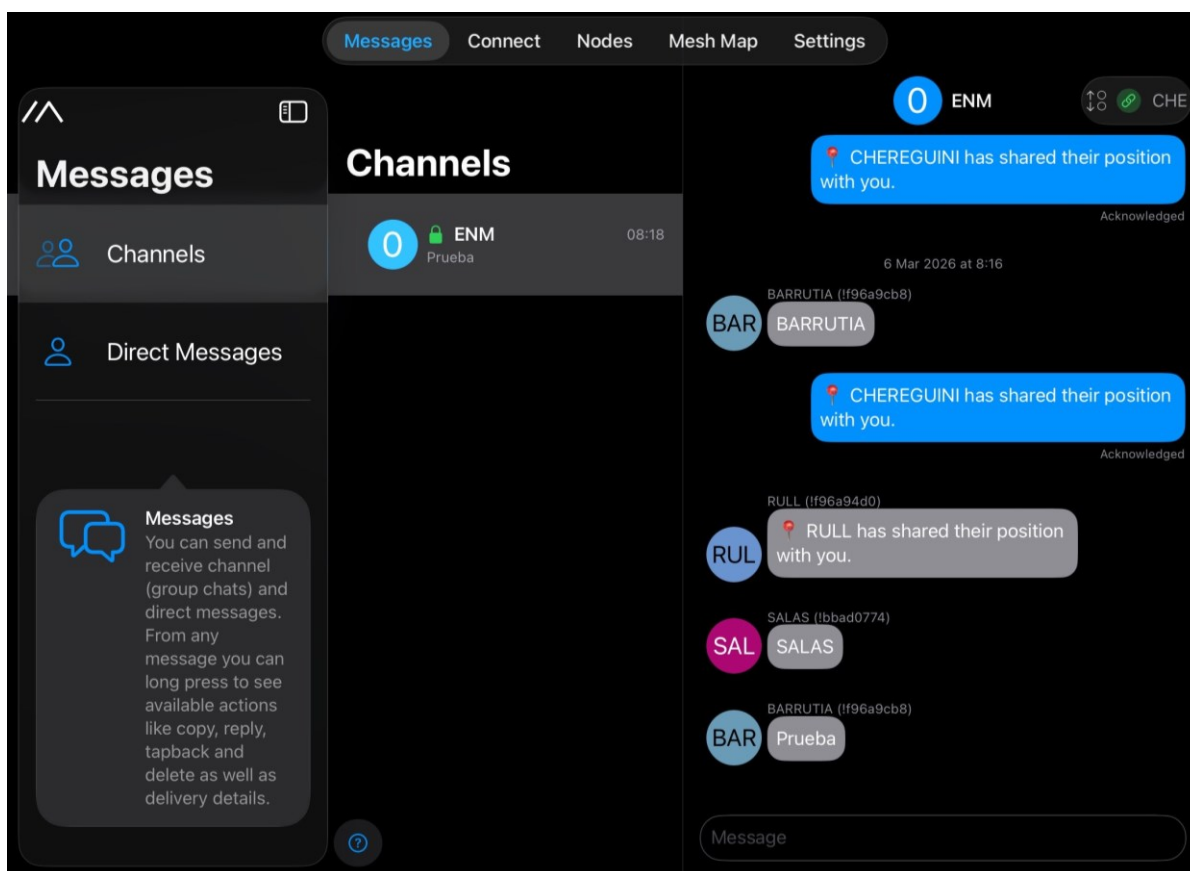


Figura 3-10 Visualización del canal común para instrucciones generales.

Este tipo de comunicación resulta especialmente adecuado para la transmisión de información de interés general, como avisos, coordinación entre unidades o intercambio de información relevante para todos los participantes de la red. En el contexto de las lanchas de instrucción, el canal común permite establecer un canal de comunicación colectivo entre todas las embarcaciones participantes en un ejercicio.

Además del canal común, la aplicación permite enviar mensajes privados entre nodos específicos de la red. Para ello, el usuario puede seleccionar uno de los dispositivos detectados en la lista de nodos disponibles y establecer una conversación directa con ese dispositivo (Figura 3-11).

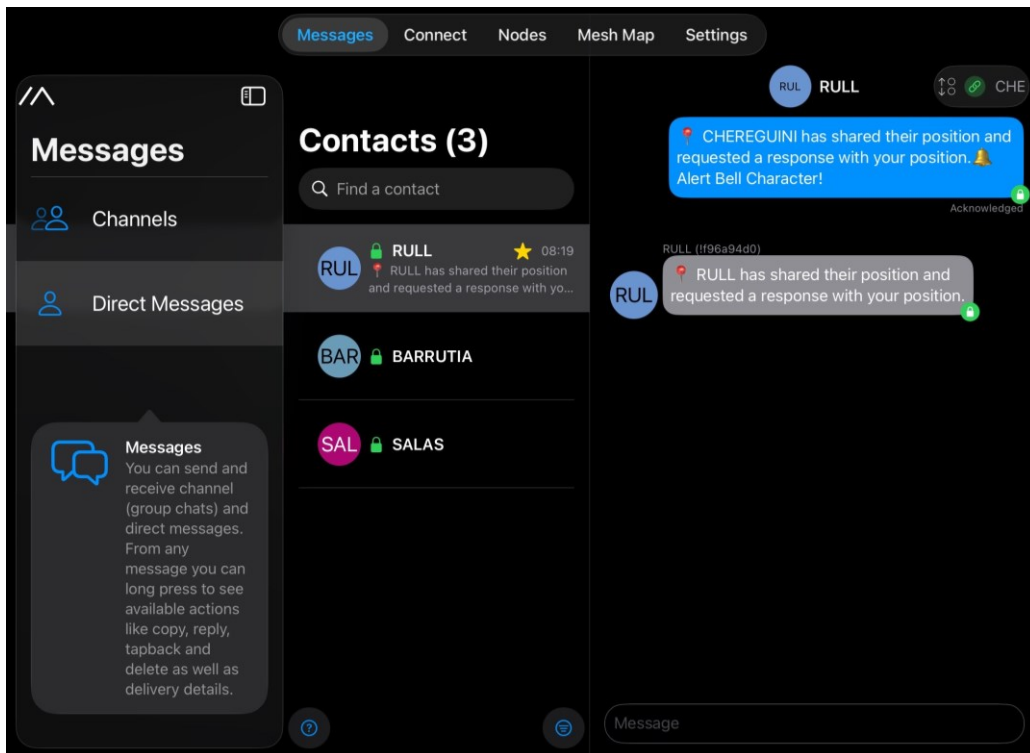


Figura 3-11 Visualización de los mensajes privados con los nodos que se encuentran en el mismo canal.

En este caso, el mensaje se dirige únicamente al nodo seleccionado, apareciendo en una conversación independiente dentro de la aplicación. Esta funcionalidad permite establecer comunicaciones más discretas entre dos unidades concretas sin necesidad de transmitir la información al resto de la red.

Desde el punto de vista operativo, los mensajes privados resultan útiles cuando se requiere coordinar acciones entre dos unidades específicas o transmitir información que no necesita ser conocida por todos los participantes.

Además de las funcionalidades de mensajería descritas anteriormente, la aplicación Meshtastic permite operar sobre canales de comunicación protegidos. Como se ha explicado en el apartado anterior, todos los nodos que participan en un canal deben compartir la misma clave de acceso, lo que permite restringir la participación en la red únicamente a los dispositivos que disponen de dicha configuración. De esta forma, la mensajería intercambiada dentro del canal queda limitada a los nodos autorizados que forman parte de la red.

En la práctica, esto significa que los mensajes transmitidos a través de la aplicación se intercambian dentro de un entorno de comunicación protegido, en el que únicamente los dispositivos que comparten el canal pueden interpretar el contenido de la información transmitida. Para el escenario de adiestramiento considerado en este trabajo, este mecanismo proporciona un nivel adecuado de protección para las comunicaciones entre las lanchas participantes, evitando que dispositivos externos puedan acceder fácilmente al contenido de los mensajes intercambiados dentro de la red.

3.2.2 Gestión de nodos y usuarios

La aplicación Meshtastic incorpora una serie de herramientas destinadas a la gestión y supervisión de los nodos que forman parte de la red. Estas funcionalidades permiten al usuario identificar los dispositivos conectados, consultar información técnica sobre cada nodo y visualizar su posición geográfica cuando los dispositivos disponen de receptor GNSS. De este modo, la aplicación no solo actúa como interfaz de mensajería, sino también como una herramienta básica de monitorización de la red.

Dentro de la aplicación existe una pestaña específica dedicada a la visualización de los nodos detectados en la red (Figura 3-12). En esta sección se muestra una lista con los dispositivos que han intercambiado información recientemente con el nodo al que está conectado el usuario. Cada nodo aparece identificado mediante su nombre configurado, acompañado de distintos indicadores que permiten conocer su estado y la calidad de la comunicación.

En el contexto de este trabajo, los nodos han sido configurados utilizando como identificadores los nombres de las lanchas de instrucción de la Escuela Naval Militar. De esta forma, cada dispositivo puede asociarse directamente con la unidad a la que pertenece, lo que facilita la identificación de las embarcaciones participantes en la red durante los ejercicios de navegación.

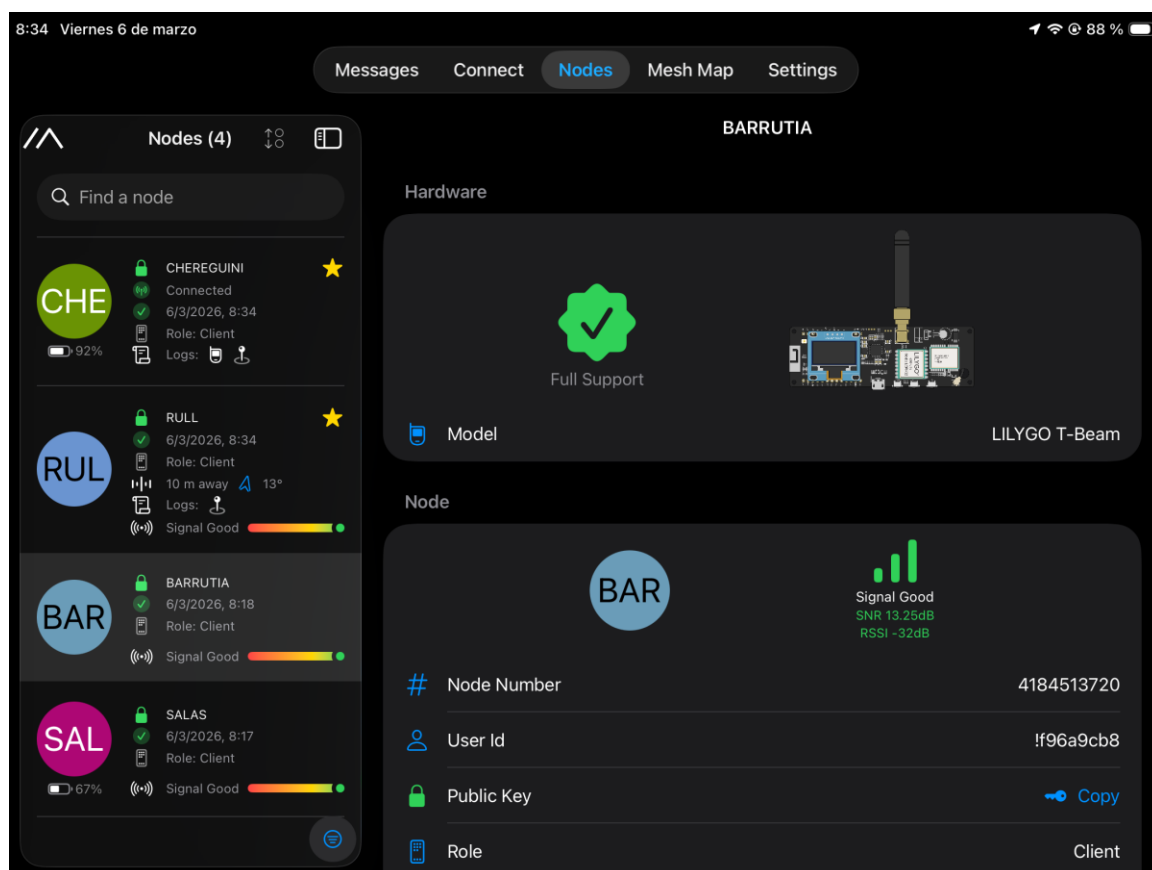


Figura 3-12 Visualización de la pestaña de Nodos conteniendo toda la información de la red.

Además de la identificación del nodo, la aplicación muestra diversos parámetros relacionados con su funcionamiento. Entre ellos se incluyen indicadores de calidad del enlace radio, como los valores de RSSI y SNR, que permiten estimar la intensidad de la señal recibida y la relación entre la señal útil y el ruido del canal. Estos parámetros proporcionan una referencia aproximada sobre la calidad de la comunicación entre nodos y pueden resultar útiles para interpretar el comportamiento de la red durante las pruebas de alcance.

La pantalla de información detallada de cada nodo también permite consultar otros datos relevantes del dispositivo, como el modelo de hardware utilizado, el identificador interno del nodo dentro de la red, el rol configurado o el estado energético del dispositivo, normalmente expresado mediante el voltaje de la batería. Esta información facilita la supervisión del estado operativo de los nodos desplegados y permite detectar posibles incidencias relacionadas con el funcionamiento de los dispositivos.

Además de la lista de nodos, la aplicación Meshtastic incluye una pestaña denominada Mesh Map, que permite visualizar sobre un mapa la posición geográfica de los nodos que transmiten información de posicionamiento (Figura 3-13). Cuando los dispositivos disponen de receptor GNSS, su ubicación se

transmite periódicamente dentro de la red y puede representarse gráficamente en la interfaz de la aplicación.

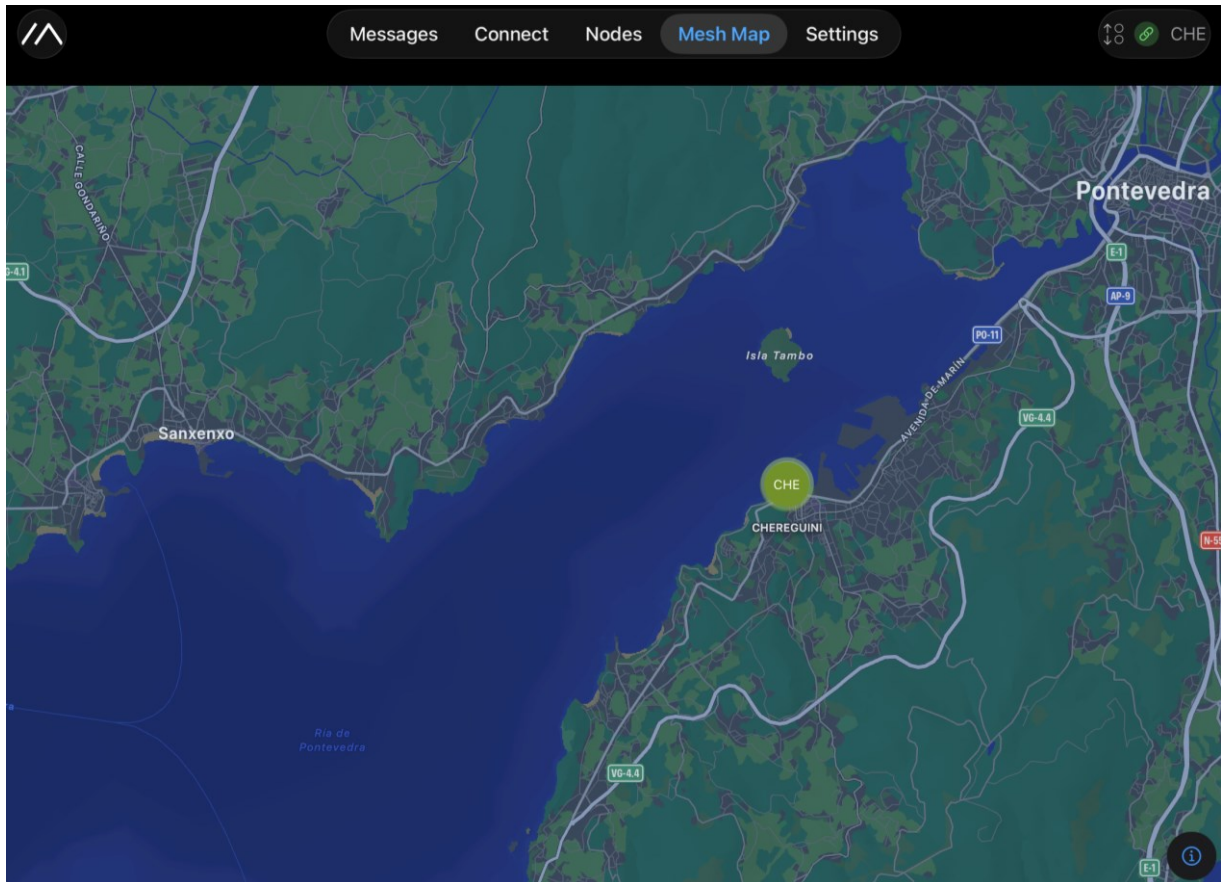


Figura 3-13 Visualización del mapa donde se puede consultar la posición del resto de unidades.

Esta funcionalidad proporciona una representación visual de la distribución de los nodos dentro del área de operación. En el contexto de las lanchas de instrucción, el mapa permite observar la posición aproximada de las distintas embarcaciones que participan en la red, ofreciendo una referencia espacial sencilla que facilita la coordinación entre unidades durante los ejercicios.

Aunque esta representación cartográfica no constituye un sistema completo de conciencia situacional, sí proporciona una forma básica de visualizar la ubicación de los nodos y de interpretar la distribución de las unidades dentro del entorno de navegación. En conjunto, las herramientas de gestión de nodos proporcionadas por la aplicación Meshtastic permiten supervisar el estado general de la red, identificar los dispositivos participantes y visualizar su posición aproximada. Estas capacidades resultan suficientes para realizar un seguimiento básico del funcionamiento de la red durante las pruebas realizadas en el marco de este trabajo.

3.2.3 Interfaz de usuario: visualización en pantalla OLED de la placa LilyGO T-Beam

Este presente trabajo tiene como uno de los objetivos demostrar que se puede utilizar la tecnología de LoRa-Meshtastic como herramienta de mando y control sin prácticamente ninguna necesidad de infraestructura externa. Ya se ha descrito como funcionaría la propia aplicación de Meshtastic y que se le podría dar uso para transmitir y recibir órdenes y para monitorizar la posición y el estado de las distintas unidades. En este caso, tan solo hace falta disponer de un dispositivo portátil tipo teléfono móvil o Tablet, ni siquiera hace falta un ordenador portátil. Hoy en día cualquier persona tiene este tipo de dispositivos y los utiliza en su día a día, así que utilizar la aplicación de Meshtastic en las lanchas de instrucción sería algo totalmente viable y cómodo.

Además, el propio nodo LilyGO T-Beam dispone de una pantalla OLED donde aparece diversa información y se pueden recibir mensajes y consultar el estado del resto de nodos. Si se quisiera reducir al máximo la infraestructura utilizada, con tan solo las antenas ya podríamos establecer una especie de primitivo sistema de mando y control, limitado por la nula capacidad de respuesta que tienen los nodos al recibir órdenes. Cabe recalcar que para disfrutar de estas funcionalidades no hace falta hacer ningún cambio al firmware de Meshtastic que tiene el nodo. La pantalla tiene una pestaña principal donde aparece información sobre los nodos online en la red, la cantidad de satélites que están proporcionando la posición al nodo, la utilización que se está haciendo del canal y la batería.

Además, lo más útil que podemos encontrar utilizando solo el nodo, sería la pantalla en la que se encierran los mensajes. Cada vez que llega un mensaje nos va a aparecer en la pantalla un aviso, y si vamos a la parte de mensajes nos aparece ahí el mensaje que queremos ver, como se comprueba en la Figura 3-14. Esta modalidad de uso es perfecta cuando no se puede disponer ni siquiera de teléfono móvil o Tablet. Hay situaciones en las que es necesario contar con un sistema de este tipo para recibir órdenes, aunque no podamos contestar al mando. De esta manera el mando podrá tener localizada y podrá mandar mensajes desde, por ejemplo, la aplicación de Meshtastic al resto de nodos; y la unidad subordinada podrá tener capacidad para ver los mandatos del superior y otra información que le ayude a cumplir con su misión.

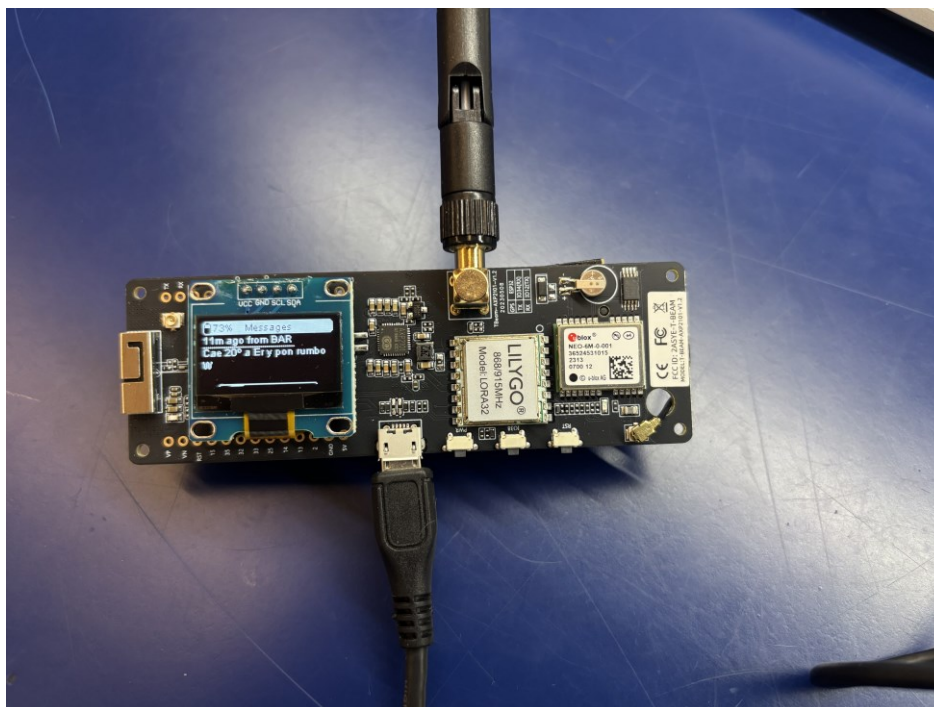


Figura 3-14 Visualización de un mensaje en la pantalla OLED.

Si bien la pantalla OLED del nodo LilyGO T-Beam constituye un recurso crítico de supervivencia para la recepción de datos en entornos degradados, su reducida superficie de visualización y la ausencia de periféricos de entrada limitan severamente la interacción bidireccional y la explotación de información compleja. La migración hacia una interfaz desarrollada en Python para ordenadores o *tablets* será desarrollada en el siguiente capítulo respondiendo a la necesidad de implementar un verdadero sistema de Mando y Control (C2), capaz de procesar y presentar la mensajería de forma estructurada y ergonómica. Esta evolución permite superar las restricciones físicas del hardware embebido, facilitando al operador una gestión avanzada de la red mediante una visualización cartográfica detallada, la automatización de informes doctrinales y una organización jerárquica de las comunicaciones que resulta inalcanzable mediante la navegación secuencial por menús en el nodo físico.

4 IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA TÁCTICA

4.1 Entorno de desarrollo y herramientas utilizadas

El desarrollo del software de mensajería táctica presentado en este trabajo se ha llevado a cabo utilizando un conjunto de herramientas orientadas al desarrollo rápido de aplicaciones y a la integración con dispositivos de comunicaciones basados en LoRa. La selección de estas herramientas se ha realizado teniendo en cuenta criterios como la facilidad de integración con el hardware empleado, la disponibilidad de bibliotecas específicas para la interacción con nodos Meshtastic y la posibilidad de desarrollar una interfaz gráfica que facilite la interacción del usuario con el sistema.

El lenguaje de programación empleado para la implementación de la aplicación ha sido Python, un lenguaje ampliamente utilizado en el desarrollo de aplicaciones científicas y prototipos tecnológicos. Python ofrece una sintaxis clara y una gran disponibilidad de bibliotecas de código abierto que permiten implementar funcionalidades complejas de forma relativamente sencilla. Además, dispone de soporte para la comunicación con dispositivos externos a través de interfaces como puertos serie o USB, lo que facilita su integración con los nodos LoRa utilizados en este trabajo.

Para el desarrollo de la interfaz gráfica de usuario se ha utilizado la biblioteca PySide6, que proporciona acceso desde Python al *framework* Qt. Este *framework* permite desarrollar aplicaciones con interfaces gráficas completas mediante el uso de ventanas, paneles, botones y otros elementos interactivos. Gracias a PySide6 ha sido posible crear una aplicación de escritorio desde la que el usuario puede gestionar las comunicaciones, visualizar los mensajes intercambiados y consultar información sobre el estado de la red.

La comunicación entre la aplicación desarrollada y los nodos LoRa se realiza mediante la biblioteca Meshtastic para Python, que proporciona una interfaz de programación para interactuar con dispositivos que ejecutan el firmware Meshtastic. A través de esta biblioteca es posible enviar y recibir mensajes dentro de la red LoRa, consultar información de los nodos conectados y acceder a distintos parámetros del sistema. De este modo, la aplicación desarrollada actúa como un cliente de la red Meshtastic, permitiendo gestionar las comunicaciones desde un ordenador conectado a uno de los nodos.

El desarrollo del software se ha realizado utilizando el entorno de programación Visual Studio Code (Figura 4-1), uno de los editores más utilizados actualmente en el desarrollo de aplicaciones en Python. Este entorno proporciona herramientas de edición avanzada, resaltado de sintaxis, autocompletado de código y depuración, lo que facilita la implementación y el mantenimiento de aplicaciones compuestas por múltiples módulos. Además, VS Code permite integrar fácilmente librerías externas y gestionar entornos de desarrollo, lo que resulta especialmente útil en proyectos que combinan diferentes bibliotecas y dependencias.

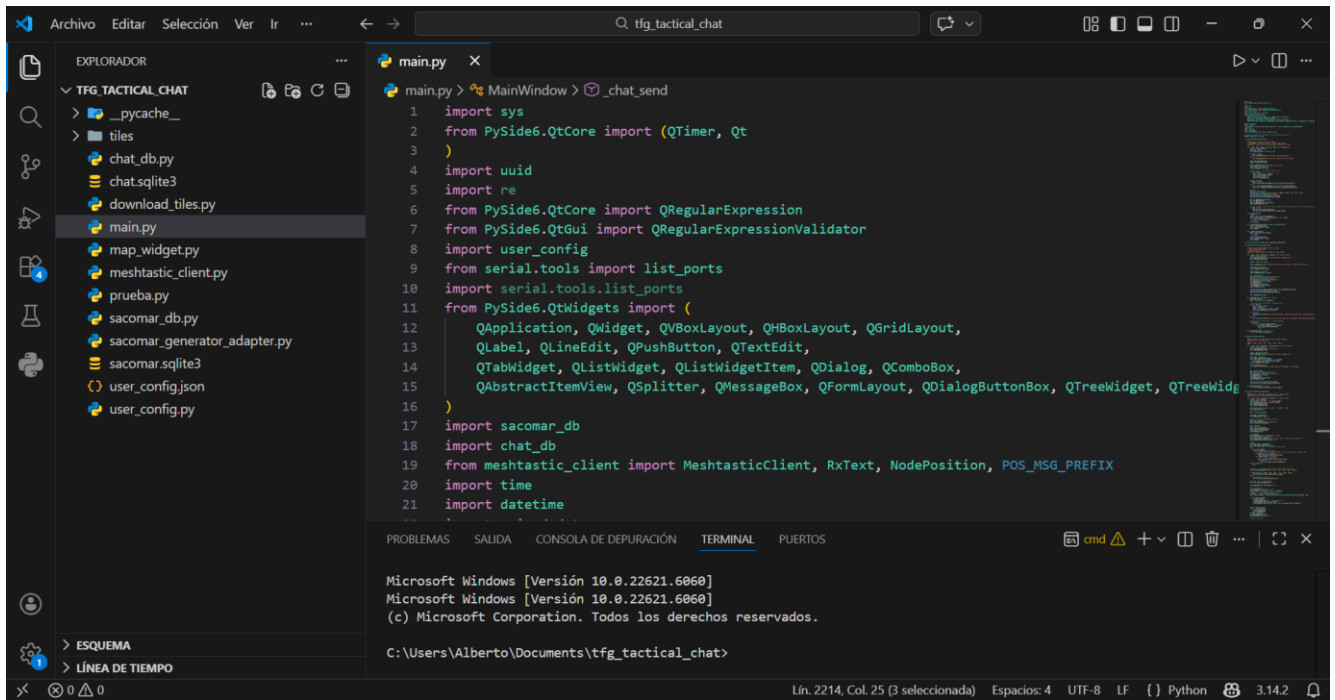


Figura 4-1 Entorno de desarrollo del software utilizando Visual Studio Code.

Durante el desarrollo del software se emplearon herramientas de inteligencia artificial generativa como apoyo a la implementación, revisión y depuración de código; no obstante, el diseño del sistema, la definición de la arquitectura de la aplicación, la integración con los nodos LoRa y la validación funcional del resultado final han sido realizados en el marco de este trabajo. Como se explica con mayor detalle en el Anexo V: Declaración de uso de herramientas de Inteligencia Artificial Generativa, este uso tuvo carácter iterativo dentro del proceso de desarrollo.

En conjunto, la combinación de Python, PySide6, la biblioteca Meshtastic y el entorno de desarrollo Visual Studio Code ha permitido construir una aplicación capaz de interactuar con la red LoRa-Meshtastic descrita en los capítulos anteriores y proporcionar una interfaz funcional para la gestión de mensajes y nodos dentro del sistema de comunicaciones desarrollado. El código fuente desarrollado en el marco de este trabajo se encuentra disponible públicamente en el repositorio GitHub:

<https://github.com/kiko25ts/tfg-mensajeria-tactica>

con el fin de facilitar su consulta, revisión y posible evolución futura.

4.2 Desarrollo de software de mensajería táctica

El objetivo principal del software desarrollado en este trabajo es proporcionar una herramienta que permita utilizar la red LoRa-Meshtastic como un sistema de mensajería táctica adaptado al entorno de las lanchas de instrucción. Para ello se ha diseñado una aplicación de escritorio que actúa como interfaz entre el usuario y la red de nodos LoRa, facilitando el intercambio de información entre las distintas unidades siguiendo la arquitectura de la Figura 4-2.

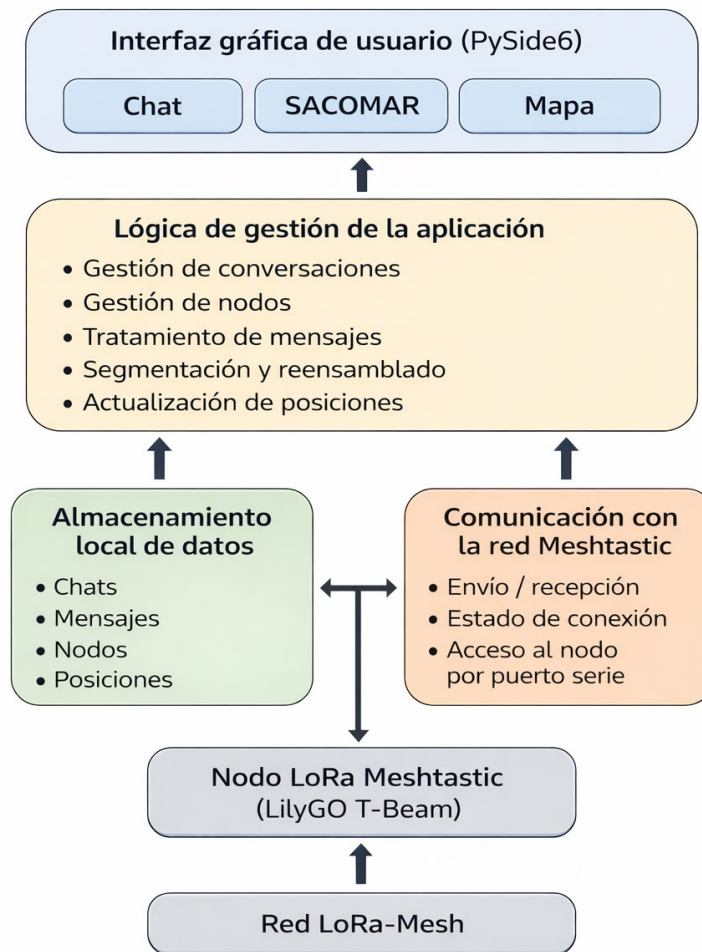


Figura 4-2 Arquitectura funcional del software de mensajería táctica (generada con IA).

La aplicación funciona conectándose a uno de los nodos Meshtastic mediante un puerto serie. Este nodo actúa como punto de acceso a la red LoRa, permitiendo que los mensajes enviados desde el ordenador se transmitan a través de la red hacia el resto de dispositivos. De forma inversa, los mensajes recibidos por el nodo se procesan en la aplicación y se presentan al usuario mediante la interfaz gráfica.

El sistema se ha desarrollado siguiendo una arquitectura modular que separa las diferentes funciones del programa. Esta estructura permite dividir el software en distintos componentes encargados de tareas específicas, como la gestión de la interfaz gráfica, el almacenamiento local de datos, la comunicación con la red Meshtastic o la representación de la información en el mapa. Esta organización facilita el mantenimiento del programa y permite ampliar o modificar funcionalidades sin afectar al conjunto del sistema.

La interfaz gráfica constituye el elemento principal de interacción con el usuario. A través de ella es posible acceder a las distintas funcionalidades del sistema, que se encuentran organizadas en diferentes pestañas dentro de la aplicación. Cada una de estas pestañas agrupa un conjunto de herramientas orientadas a la gestión de las comunicaciones y a la visualización de la información transmitida dentro de la red.

Una de las funcionalidades principales del software es el sistema de mensajería entre nodos. La aplicación permite enviar mensajes de texto a otros dispositivos de la red y gestionar conversaciones entre diferentes participantes. Los mensajes transmitidos se almacenan en una base de datos local que mantiene el historial de las comunicaciones, permitiendo consultar mensajes anteriores incluso después de reiniciar el programa.

Además del sistema de mensajería general, el software incorpora un mecanismo específico para la gestión de mensajes estructurados. Estos mensajes están diseñados para transmitir información de forma organizada, siguiendo un formato que facilita su interpretación por parte de los usuarios. Este tipo de mensajes permite aproximar el funcionamiento del sistema a los procedimientos de mensajería utilizados en el ámbito naval.

Otra de las funciones implementadas en la aplicación es la gestión de los nodos detectados en la red. El programa mantiene un registro de los dispositivos que transmiten información dentro de la red LoRa y permite visualizar su estado desde la interfaz. Esta funcionalidad facilita identificar qué unidades se encuentran activas y permite supervisar la actividad general de la red.

El software también integra una representación cartográfica que permite visualizar la posición de los nodos cuando estos transmiten información de posicionamiento. Las coordenadas recibidas se almacenan y se representan sobre un mapa interactivo, lo que permite observar la distribución de las unidades dentro del área de operación. Esta funcionalidad resulta especialmente útil en el contexto de las lanchas de instrucción, ya que proporciona una referencia visual de la situación relativa de las embarcaciones durante los ejercicios.

Además de estas funcionalidades principales, la aplicación incorpora diferentes elementos orientados a mejorar la experiencia de uso. Entre ellos se incluyen indicadores del estado de la conexión con el nodo Meshtastic, sistemas de notificación que permiten identificar mensajes no leídos y herramientas de medición sobre el mapa que facilitan la interpretación de la información geográfica.

En conjunto, el software desarrollado permite transformar la red LoRa-Meshtastic en una plataforma de mensajería adaptada al entorno de instrucción naval, proporcionando herramientas que facilitan la coordinación entre unidades y la gestión de la información transmitida dentro de la red.

4.3 Integración con la placa LilyGO T-Beam y comunicación con dispositivos externos

Una vez definida la arquitectura general del sistema y desarrollada la aplicación de mensajería táctica, el siguiente paso consiste en integrar dicha herramienta con la red LoRa-Meshtastic validada previamente. Esta integración constituye el elemento que permite transformar una red de comunicaciones mallada de propósito general en una herramienta funcional orientada al intercambio de información entre las lanchas de instrucción, siguiendo la lógica de la Figura 4-3.

La aplicación desarrollada en este trabajo no implementa una red de comunicaciones propia, sino que se apoya sobre la infraestructura proporcionada por Meshtastic. En este sentido, la red LoRa actúa como medio de transporte de la información, mientras que la aplicación desarrollada constituye la capa superior encargada de organizar, presentar y explotar dicha información desde el punto de vista del usuario. Por tanto, la aportación principal del software no reside en la gestión del enlace radio, ya resuelta por Meshtastic, sino en la construcción de una herramienta de mensajería más adaptada al contexto de instrucción naval.

Desde el punto de vista práctico, la integración se realiza conectando uno de los nodos de la red LoRa al ordenador mediante una interfaz USB. Al establecer esta conexión, el sistema operativo genera un puerto serie virtual a través del cual la aplicación puede intercambiar información con el nodo. Dicho nodo conectado al ordenador actúa como interfaz de acceso a la red, permitiendo que la aplicación envíe mensajes hacia el resto de dispositivos y reciba la información procedente de otros nodos de la malla.

El funcionamiento general del sistema puede entenderse como una cadena de tres niveles, representada gráficamente en la Figura 4-3. En primer lugar, el usuario interactúa con la aplicación de escritorio, desde la que redacta mensajes, consulta conversaciones, visualiza nodos o interpreta la situación general de la red. En segundo lugar, la aplicación transmite estas órdenes o mensajes al nodo LoRa conectado localmente. Finalmente, este nodo se encarga de introducir la información en la red Meshtastic, donde será propagada y recibida por los nodos destinatarios. De forma inversa, cualquier

información procedente de la red tales como mensajes, estados de nodo o posiciones es recibida por el nodo local y transferida a la aplicación para su tratamiento y visualización.

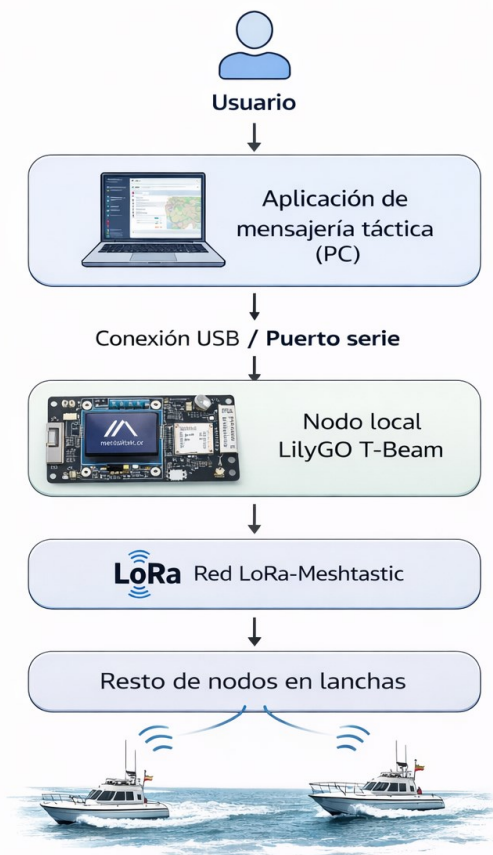


Figura 4-3 Esquema de integración entre la aplicación de mensajería táctica, el nodo local LilyGO T-Beam y la red LoRa-Meshtastic (generada con IA).

Esta organización permite que el ordenador funcione como un terminal avanzado de gestión de comunicaciones, ampliando las capacidades de interacción con la red respecto a las ofrecidas por la aplicación oficial de Meshtastic. Mientras que la aplicación oficial permite mensajería básica, visualización de nodos y consulta de posiciones, el software desarrollado en este trabajo añade una capa de organización de la información más adecuada al objetivo deseado, orientada a estructurar las comunicaciones y facilitar su explotación por el usuario.

En el plano físico, el sistema se apoya en nodos basados en la placa LilyGO T-Beam, que ya se han explicado anteriormente. Desde el punto de vista del usuario, la interacción con el sistema puede realizarse desde distintos dispositivos externos. En el caso principal desarrollado en este trabajo, la herramienta se ejecuta en un ordenador personal, que ofrece una interfaz más amplia y adecuada para gestionar conversaciones, visualizar información persistente y trabajar con mapas. No obstante, la misma red puede ser utilizada también desde dispositivos móviles o tabletas mediante la aplicación oficial de Meshtastic, lo que proporciona una solución complementaria cuando no se dispone de un ordenador.

La aplicación desarrollada se concibe, por tanto, como una herramienta de explotación más avanzada de la red LoRa-Meshtastic, pero no excluye otras formas de interacción. Esto resulta especialmente útil en un entorno de instrucción, donde puede coexistir el uso de terminales ligeros como, por ejemplo, la propia pantalla OLED del nodo o la aplicación móvil oficial, con una estación de control más completa basada en ordenador.

Uno de los aspectos más importantes de esta integración es que la aplicación mantiene una separación funcional clara entre la gestión de la información y el transporte de la misma. El transporte de mensajes, la retransmisión dentro de la red y el encaminamiento multisalto siguen siendo responsabilidad de Meshtastic y de los nodos LoRa. La aplicación, por su parte, se encarga de presentar esos datos al usuario de forma estructurada, almacenar conversaciones, organizar mensajes y facilitar una interacción más adecuada al uso táctico previsto.

Esta distinción es relevante porque permite que la herramienta desarrollada se apoye en una infraestructura de comunicaciones ya validada, reduciendo la complejidad del desarrollo y centrando el esfuerzo en el diseño funcional de la mensajería. En lugar de desarrollar un protocolo radio o una red ad hoc desde cero, el trabajo se ha orientado a construir una herramienta útil sobre una base tecnológica estable y previamente probada.

En consecuencia, la integración entre la aplicación, el nodo conectado localmente y la red LoRa-Meshtastic da lugar a un sistema completo en el que cada elemento cumple una función diferenciada pero complementaria. La red proporciona conectividad táctica sin infraestructura, el nodo actúa como interfaz física con dicha red y la aplicación convierte esa conectividad en una herramienta operativa de mensajería y gestión de información. Esta combinación constituye la base funcional sobre la que se apoya el sistema de mensajería táctica desarrollado en este trabajo.

4.4 Funcionalidades de la aplicación desarrollada

Desde el punto de vista del usuario, la aplicación se ha concebido como un entorno único desde el que poder gestionar las principales necesidades de comunicación entre las lanchas: mensajería formal, mensajería rápida, visualización de nodos conectados y representación espacial de las unidades. Para ello se ha optado por una interfaz estructurada en varias pestañas, cada una orientada a una función concreta, pero integradas dentro de una misma ventana principal.

El flujo de uso del programa comienza en el momento de su apertura. Antes de acceder a la ventana principal, el sistema solicita dos datos de configuración inicial que resultan necesarios para el funcionamiento correcto de la aplicación. En primer lugar, el usuario debe seleccionar la lancha desde la que va a operar, lo que permite asociar la sesión con una unidad concreta de la red (Figura 4-4). En segundo lugar, debe elegirse el puerto serie al que se encuentra conectado el dispositivo Meshtastic local (Figura 4-5). Este proceso de configuración inicial no solo establece la conexión con el nodo físico, sino que también identifica la aplicación dentro del conjunto de unidades participantes en la red.

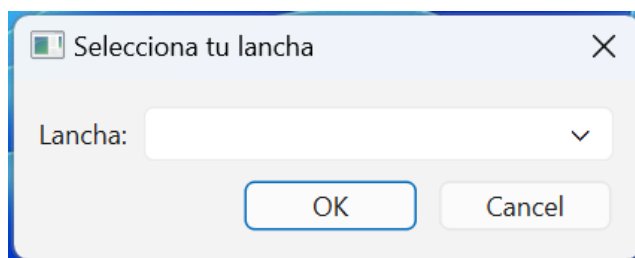


Figura 4-4 Selección de lancha desde la que se opera.

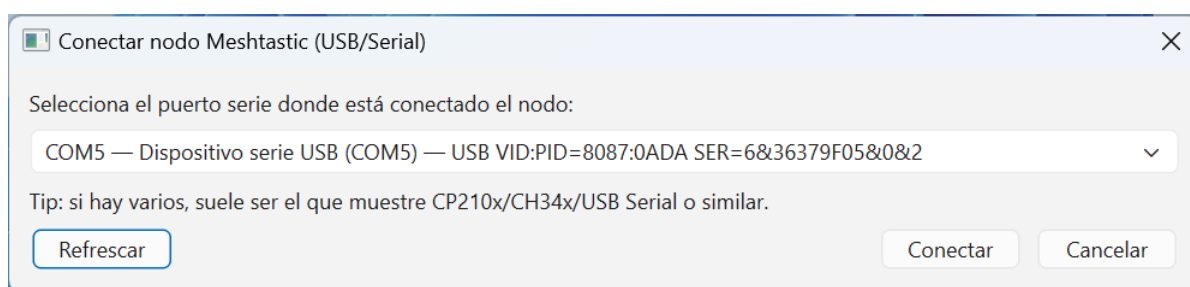


Figura 4-5 Selección del puerto al que está conectado el nodo.

Una vez superada esta fase de configuración, el programa presenta la ventana principal, organizada en tres grandes áreas funcionales: SACOMAR, CHAT y MAPA. Esta división responde a tres necesidades operativas distintas. Por un lado, se implementa un entorno de mensajería formal inspirado en los sistemas de comunicaciones navales; por otro, un sistema de conversación rápida orientado a la coordinación inmediata entre unidades; y, finalmente, una representación cartográfica que permita visualizar el despliegue de la red y apoyar la interpretación táctica de la información transmitida.

4.4.1 Estado de conexión y supervisión básica del sistema

Uno de los primeros elementos que el usuario encuentra en la aplicación es la barra de estado situada en la parte superior de la ventana (Figura 4-6). Su finalidad es ofrecer una referencia inmediata sobre el estado de la conexión con el dispositivo Meshtastic local. Esta información resulta especialmente relevante, ya que el programa depende de dicha conexión para poder interactuar con la red LoRa.

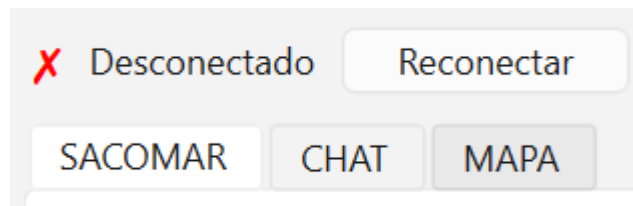


Figura 4-6 Estado de conexión del nodo.

La barra de estado se ha diseñado con una lógica visual sencilla e intuitiva. Cuando la conexión con el nodo se encuentra operativa, la aplicación muestra un indicador positivo. Si la conexión se pierde o se produce una incidencia durante la comunicación, el programa informa del problema mediante un cambio visual en el estado mostrado. Además, cuando el sistema detecta una pérdida de conexión, ofrece la posibilidad de reconectar el dispositivo sin necesidad de cerrar y reiniciar la aplicación. Esta funcionalidad mejora significativamente la usabilidad del sistema durante el empleo real, ya que evita interrupciones innecesarias en el trabajo del usuario.

4.4.2 Entorno SACOMAR: mensajería formal estructurada

La primera gran funcionalidad de la aplicación es el módulo SACOMAR (Figura 4-7), concebido como un entorno de mensajería formal inspirado en los sistemas de intercambio estructurado de órdenes y mensajes empleados en el ámbito naval. Su finalidad no es replicar íntegramente un sistema clasificado de la Armada, sino trasladar al entorno académico la lógica de una mensajería más organizada, disciplinada y documentalmente controlada.

El módulo SACOMAR se organiza en varias bandejas funcionales que reproducen una lógica documental más próxima a un sistema de explotación real. Existen bandejas de entrada y salida para gestionar los mensajes recibidos y enviados, pero también se incorporan espacios para borradores, mensajes pendientes de envío y mensajes archivados. Esta estructura permite al usuario trabajar con los mensajes de forma más ordenada, diferenciando claramente entre documentos en preparación, documentos pendientes de transmisión y mensajes ya emitidos o recibidos.

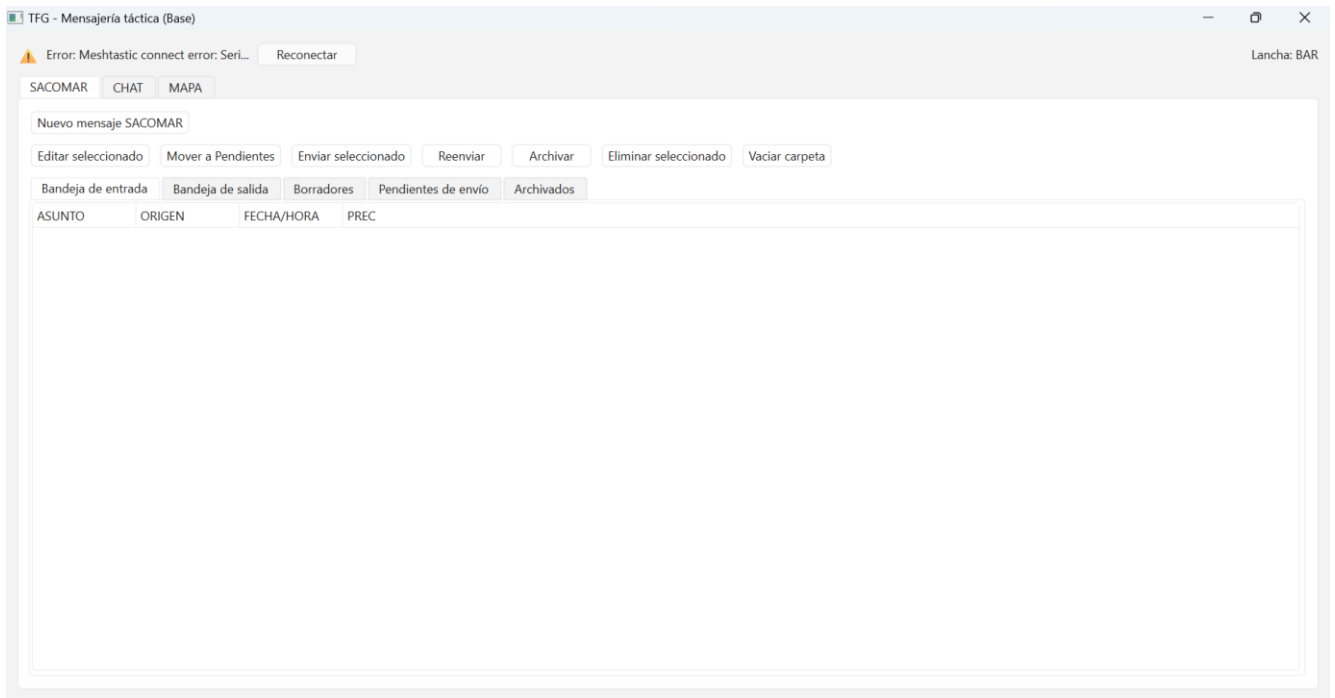
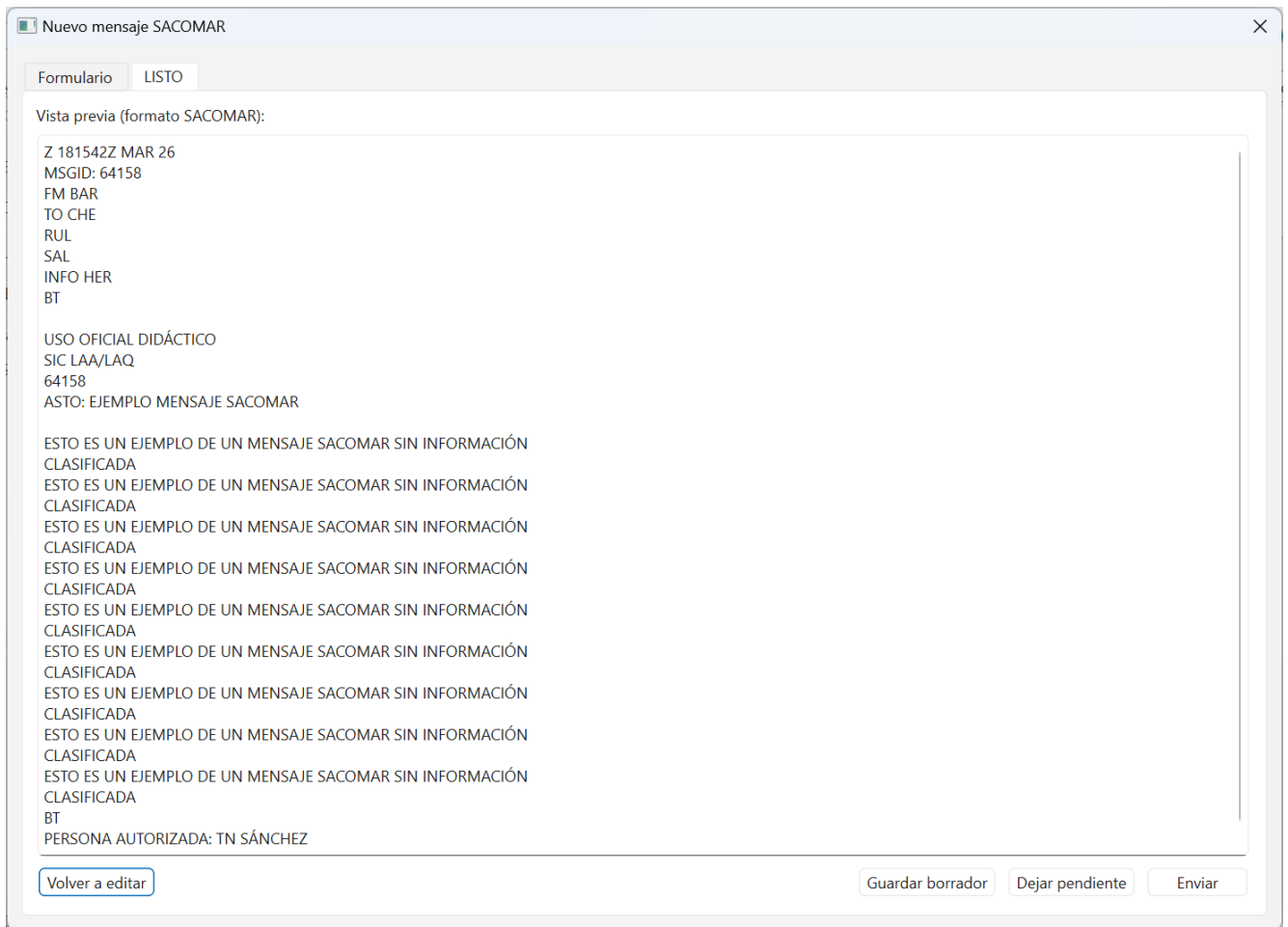


Figura 4-7 Pestaña SACOMAR.

La aplicación permite redactar mensajes con campos diferenciados, evitando que toda la información se exprese como texto libre. Como se ve en la Figura 4-8, el usuario puede introducir parámetros como la precedencia, el remitente, los destinatarios principales, los destinatarios en información, el asunto, el cuerpo del mensaje, la clasificación, los códigos de identificación y la persona autorizada. Una vez cumplimentados estos datos, el sistema genera una vista estructurada del mensaje (Figura 4-9), facilitando su comprobación antes del envío.

Figura 4-8 Ventana para crear/editar un mensaje SACOMAR.



The screenshot shows a web application window titled "Nuevo mensaje SACOMAR". It has two tabs: "Formulario" and "LISTO". The "LISTO" tab is active, displaying a "Vista previa (formato SACOMAR):". The preview content is as follows:

```
Z 181542Z MAR 26
MSGID: 64158
FM BAR
TO CHE
RUL
SAL
INFO HER
BT

USO OFICIAL DIDÁCTICO
SIC LAA/LAQ
64158
ASTO: EJEMPLO MENSAJE SACOMAR

ESTO ES UN EJEMPLO DE UN MENSAJE SACOMAR SIN INFORMACIÓN
CLASIFICADA
ESTO ES UN EJEMPLO DE UN MENSAJE SACOMAR SIN INFORMACIÓN
CLASIFICADA
ESTO ES UN EJEMPLO DE UN MENSAJE SACOMAR SIN INFORMACIÓN
CLASIFICADA
ESTO ES UN EJEMPLO DE UN MENSAJE SACOMAR SIN INFORMACIÓN
CLASIFICADA
ESTO ES UN EJEMPLO DE UN MENSAJE SACOMAR SIN INFORMACIÓN
CLASIFICADA
ESTO ES UN EJEMPLO DE UN MENSAJE SACOMAR SIN INFORMACIÓN
CLASIFICADA
ESTO ES UN EJEMPLO DE UN MENSAJE SACOMAR SIN INFORMACIÓN
CLASIFICADA
ESTO ES UN EJEMPLO DE UN MENSAJE SACOMAR SIN INFORMACIÓN
CLASIFICADA
ESTO ES UN EJEMPLO DE UN MENSAJE SACOMAR SIN INFORMACIÓN
CLASIFICADA
ESTO ES UN EJEMPLO DE UN MENSAJE SACOMAR SIN INFORMACIÓN
CLASIFICADA
BT
PERSONA AUTORIZADA: TN SÁNCHEZ
```

At the bottom of the preview area, there are three buttons: "Volver a editar", "Guardar borrador", and "Enviar".

Figura 4-9 Vista previa generada del mensaje antes de enviarlo o dejar como pendiente/borrador.

Desde el punto de vista de uso, esta organización aporta varias ventajas. En primer lugar, facilita que el usuario no tenga que completar y transmitir un mensaje en una única acción, sino que pueda prepararlo, revisarlo y decidir posteriormente si debe enviarlo, modificarlo o almacenarlo temporalmente. En segundo lugar, proporciona persistencia documental, permitiendo recuperar mensajes anteriores y mantener una trazabilidad básica del intercambio de información.

Otra funcionalidad importante dentro de este módulo es la posibilidad de editar, reenviar, archivar o eliminar mensajes según su estado. Esta flexibilidad resulta especialmente útil en un entorno de instrucción, donde el objetivo no es únicamente transmitir información, sino también familiarizar al alumno con una lógica de trabajo más próxima a la gestión de mensajes operativos.

4.4.3 Sistema de entrega y fiabilidad de mensajes estructurados

Dado que la red LoRa presenta restricciones en caudal y está sujeta a pérdidas de paquetes, la aplicación no se limita a enviar mensajes SACOMAR como simples cadenas de texto, sino que incorpora mecanismos destinados a mejorar la fiabilidad de su entrega. Esto resulta especialmente importante en el caso de mensajes largos o dirigidos a varios destinatarios.

Para ello, el programa implementa un sistema de control de entrega mediante confirmaciones de recepción. Cuando un mensaje es enviado, el sistema espera una respuesta que indique que el destinatario lo ha recibido correctamente. Si dicha confirmación no llega dentro del tiempo previsto, el programa vuelve a intentarlo automáticamente hasta un número máximo de reenvíos. Este mecanismo permite aumentar la probabilidad de entrega en una red donde pueden producirse pérdidas por colisiones o interferencias.

Además, cuando el tamaño del mensaje supera el máximo práctico admitido por la red, el sistema lo divide en varios fragmentos que son transmitidos de forma sucesiva y posteriormente reconstruidos en destino. Esta funcionalidad es esencial para poder utilizar mensajes estructurados relativamente largos sin comprometer la integridad de la información. Desde el punto de vista funcional, esto permite que el usuario redacte el mensaje como un único documento, mientras que la aplicación se encarga internamente de adaptarlo a las limitaciones del medio de transmisión.

4.4.4 Entorno CHAT: mensajería rápida entre unidades

Junto al módulo SACOMAR, la aplicación incorpora un entorno de chat orientado a la comunicación rápida e inmediata entre las lanchas (Figura 4-10). Su finalidad es complementar la mensajería formal con una herramienta más ágil, útil para la coordinación táctica cotidiana, el intercambio de avisos breves o la comunicación informal entre unidades.

Este módulo se organiza en torno a una lista de conversaciones activas y una lista de nodos disponibles en la red. El usuario puede acceder a un canal general visible para todos los participantes, abrir conversaciones directas entre dos lanchas o crear grupos de conversación con varios integrantes. De este modo, el sistema combina tres modalidades de comunicación: colectiva, privada y grupal.

El canal general permite disponer de un espacio común de intercambio de mensajes para toda la red. Resulta apropiado para órdenes generales, anuncios o coordinaciones que afecten a todas las unidades. Las conversaciones directas, por su parte, permiten mantener un intercambio reservado entre dos lanchas concretas, mientras que los grupos facilitan la coordinación entre subconjuntos de unidades sin necesidad de implicar al conjunto de la red.

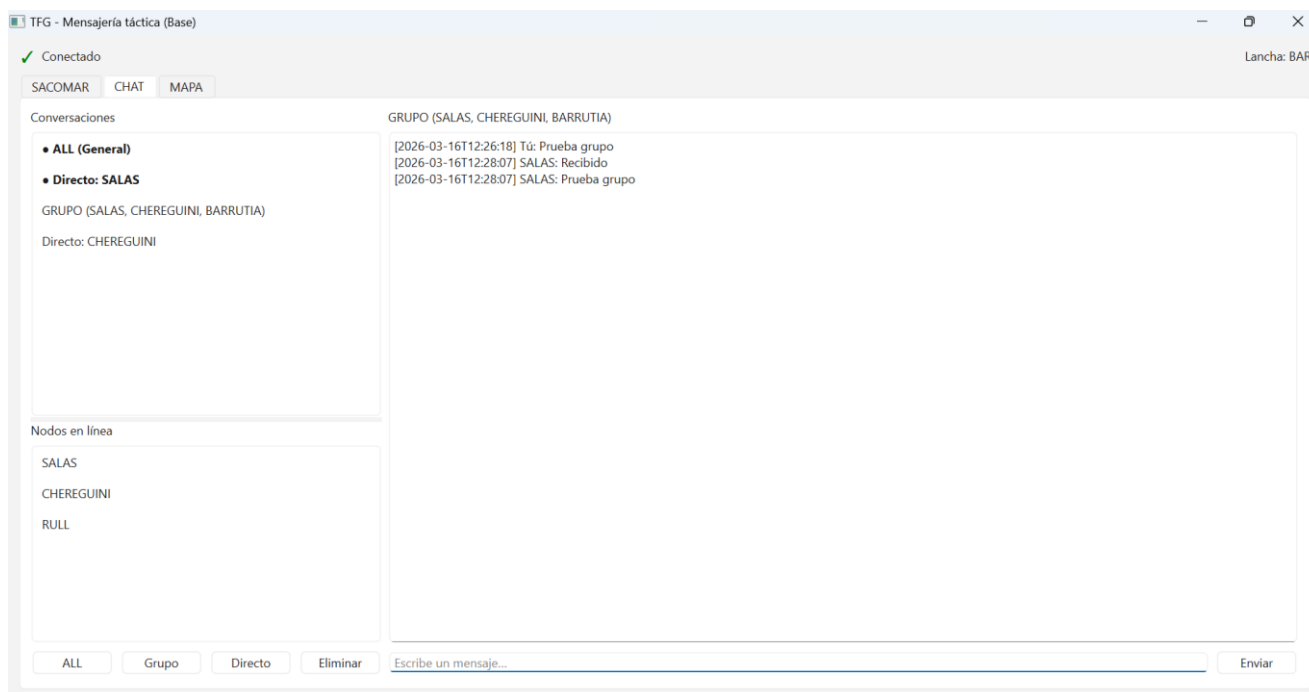


Figura 4-10 Pestaña CHAT.

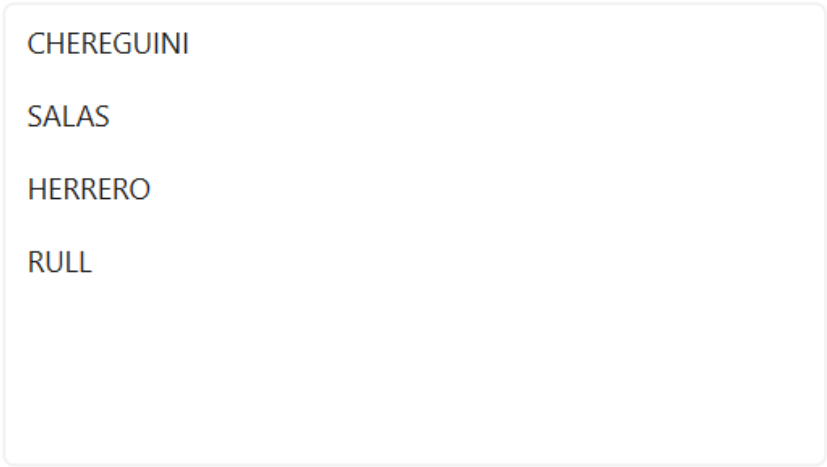
La interfaz de este módulo ha sido diseñada para que el acceso a las conversaciones sea rápido y visual. El usuario puede abrir chats directos a partir de la lista de nodos detectados, crear nuevos grupos seleccionando varios participantes o eliminar conversaciones cuando ya no sean necesarias. Los mensajes se muestran de forma cronológica, indicando remitente y hora, y el programa mantiene un historial persistente almacenado en la base de datos local.

4.4.5 Gestión de nodos y presencia en red

Otro aspecto esencial del funcionamiento del programa es la gestión de los nodos presentes en la red. La aplicación mantiene una lista de las unidades que se consideran activas en cada momento (Figura 4-11), tomando como referencia la información recibida periódicamente desde la red. Esta funcionalidad resulta muy útil para el usuario, ya que permite saber con qué unidades es posible comunicarse en un momento dado.

El sistema se apoya en la transmisión periódica de posición y estado para determinar si un nodo sigue activo o si debe considerarse desconectado. De este modo, la lista de nodos online no depende únicamente de que el dispositivo exista en la red, sino de que haya transmitido información en un intervalo temporal reciente. Este criterio hace que la representación de la red sea más realista y evita mostrar como activos nodos que en realidad han dejado de participar.

Nodos en línea



CHEREGUINI
SALAS
HERRERO
RULL

Figura 4-11 Lista de nodos en línea.

Además, para cada nodo la aplicación puede mostrar información relevante como su nombre, su estado de actividad o la calidad de la comunicación. Esto aporta una capa básica de monitorización de la red que complementa el sistema de mensajería.

4.4.6 Entorno MAPA: representación espacial de la red

La tercera gran funcionalidad de la aplicación es el módulo de mapa, destinado a representar gráficamente la posición de las unidades dentro del área de operación. Esta funcionalidad resulta especialmente valiosa en el contexto naval, donde la ubicación relativa de las embarcaciones constituye un elemento central de la coordinación táctica.

Cuando los nodos disponen de posición válida, la aplicación registra sus coordenadas y las representa sobre una cartografía offline de la zona de operaciones visible en la Figura 4-12. Esto permite visualizar en tiempo real la distribución aproximada de las lanchas y facilita una interpretación espacial de la situación de la red.

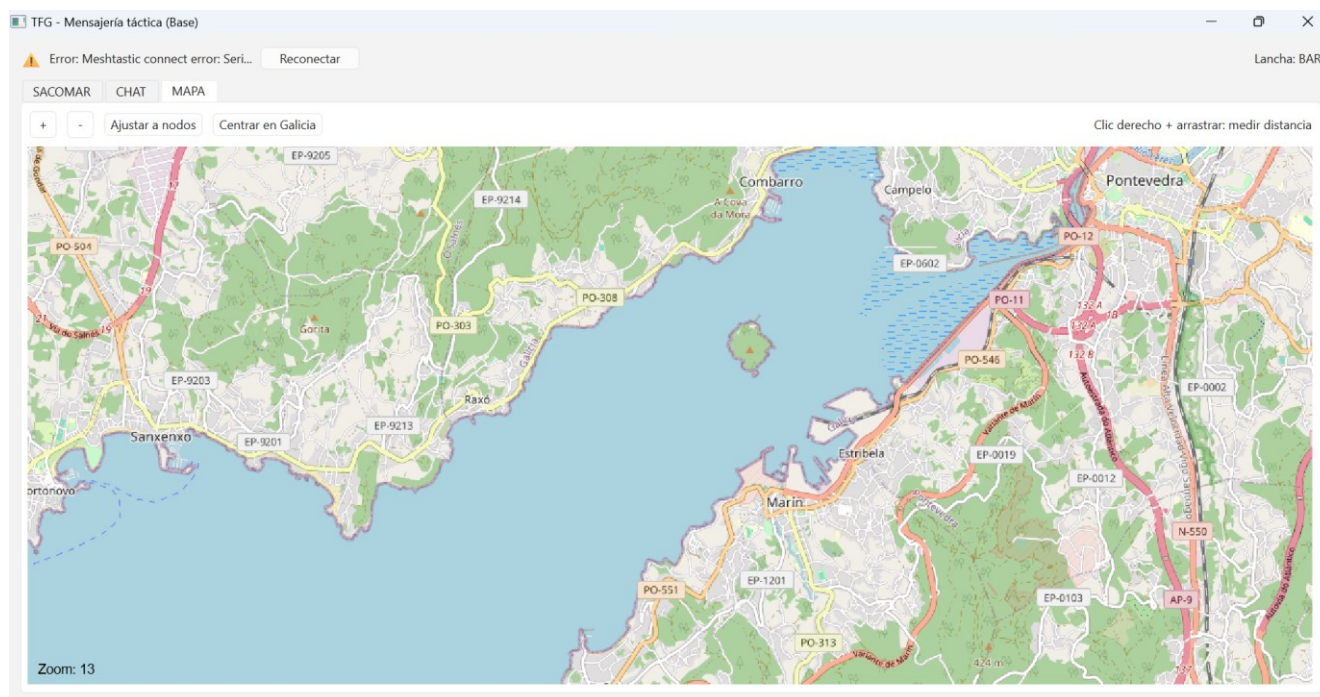


Figura 4-12 Pestaña MAPA.

El diseño del mapa incorpora herramientas de interacción orientadas a la navegación y al uso táctico. El usuario puede desplazar la vista, hacer zoom, centrar el mapa sobre los nodos visibles o volver a una vista general predefinida. Además, al seleccionar una unidad en el mapa, la aplicación puede mostrar información adicional como sus coordenadas, su velocidad, la distancia respecto a la posición propia o la demora desde la propia unidad (Figura 4-13).



Figura 4-13 Pestaña de información sobre otra unidad.

Junto a esta visualización directa, el mapa incorpora herramientas de medición que permiten calcular distancias entre puntos y obtener una referencia continua de distancia y demora desde la posición propia hasta el cursor del ratón (Figura 4-14). Esta funcionalidad añade un valor significativo al sistema, ya que convierte el mapa en algo más que una visualización pasiva y lo acerca a una herramienta de apoyo a la navegación táctica.

Una de las decisiones de diseño adoptadas en la aplicación ha sido adaptar la presentación de la información al contexto naval en el que se emplea el sistema. Por este motivo, determinadas magnitudes no se muestran en unidades terrestres habituales, sino en unidades más coherentes con el ámbito marítimo.



Figura 4-14 Medición de distancias en el MAPA.

Así, las distancias se expresan en millas náuticas o yardas según su magnitud, mientras que la velocidad se presenta en nudos. Este detalle, aunque aparentemente menor, contribuye a aproximar la herramienta al entorno real de empleo y refuerza su valor como sistema de apoyo a la instrucción.

4.4.7 Indicadores de actividad y persistencia de la información

La aplicación incorpora también diversos mecanismos orientados a facilitar el seguimiento de la actividad de mensajería. Entre ellos destaca el uso de indicadores visuales que permiten identificar rápidamente la existencia de mensajes nuevos (Figura 4-15), tanto en módulos generales como en conversaciones concretas. Estos elementos ayudan al usuario a priorizar su atención y a localizar de forma inmediata qué espacios de comunicación requieren revisión.

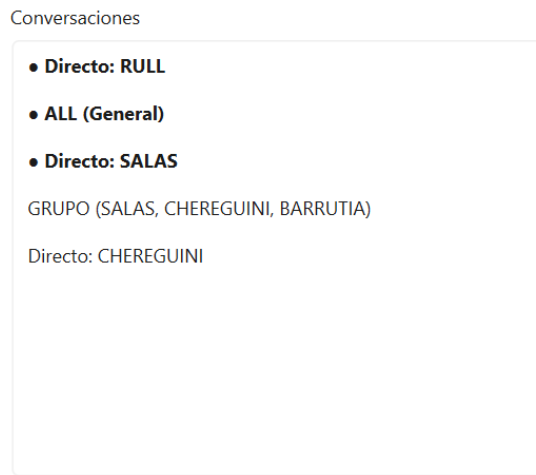


Figura 4-15 Señal de nuevo mensaje en el CHAT.

Por otra parte, todos los mensajes y conversaciones se almacenan en bases de datos locales, lo que garantiza que la información permanezca disponible entre sesiones. Esta persistencia es especialmente importante en un sistema de mensajería orientado a la coordinación entre unidades, ya que permite conservar históricos de conversación, recuperar mensajes anteriores y mantener los nombres y la estructura de los grupos incluso después de reiniciar la aplicación.

4.4.8 Valor funcional del sistema desarrollado

En conjunto, la aplicación desarrollada en este trabajo no se limita a ser un cliente gráfico para la red Meshtastic, sino que transforma una infraestructura básica de comunicaciones en una herramienta de mensajería mucho más explotable desde el punto de vista operativo. La combinación de mensajería

formal, chat rápido, gestión de nodos, representación cartográfica, persistencia de la información e indicadores visuales da lugar a un sistema más completo y mejor adaptado al entorno de instrucción naval. La configuración de la aplicación desarrollada es detallada en mayor profundidad en el Anexo III.

Esta integración funcional constituye uno de los principales resultados del trabajo, ya que demuestra que una red LoRa-Meshtastic puede servir no solo como soporte de comunicaciones autónomas, sino también como base para desarrollar herramientas de coordinación más ricas y estructuradas.

4.5 Dificultades encontradas durante el desarrollo y soluciones adoptadas

El desarrollo de la herramienta de mensajería táctica no consistió únicamente en implementar una interfaz gráfica conectada a una red LoRa-Meshtastic ya existente, sino en resolver un conjunto de problemas prácticos que aparecieron durante la integración del software con los nodos, la gestión de la información y el uso del sistema en condiciones de red real. Muchas de estas dificultades no eran evidentes en una fase inicial de diseño y solo se manifestaron cuando el programa comenzó a utilizarse con varios nodos, mensajes reales y posiciones GPS en un entorno de operación similar al previsto para las lanchas de instrucción.

Desde el punto de vista del desarrollo, los problemas encontrados pueden agruparse en cuatro grandes bloques: gestión de posiciones y nodos, fiabilidad de la mensajería, saturación y comportamiento de la red, y usabilidad de la interfaz.

4.5.1 Gestión de posiciones y nodos en la red

Uno de los primeros problemas detectados estuvo relacionado con la gestión de la información de posicionamiento. Durante las pruebas se observó que, tras desconectar el dispositivo Meshtastic del ordenador, la aplicación seguía mostrando actualizaciones de posición de nodos que ya no estaban realmente activos. El origen de este comportamiento se encontraba en que cierta información interna de la librería utilizada para interactuar con Meshtastic persistía en memoria incluso después de la desconexión, provocando que el sistema siguiese interpretando como válidos datos de posición ya obsoletos.

Para resolver este problema se implementó un sistema propio de gestión de posiciones basado únicamente en datos recibidos en tiempo real. Además, se introdujo un mecanismo que comprueba el estado real de la conexión y elimina automáticamente la información almacenada cuando esta se pierde. Del mismo modo, se incorporó un criterio temporal que descarta posiciones excesivamente antiguas, evitando que la aplicación represente datos que ya no son operativamente válidos.

Relacionado con esta cuestión, apareció también un problema en la detección de la posición GPS del propio nodo local. En determinadas situaciones, el dispositivo indicaba disponer de posición válida, pero la aplicación no era capaz de recuperarla correctamente y asumía que no existía fijación GPS. El análisis del comportamiento mostró que la información de posicionamiento podía almacenarse en distintas ubicaciones dentro de la estructura de datos proporcionada por la librería de Meshtastic, e incluso con diferentes formatos numéricos.

La solución adoptada consistió en ampliar el sistema de lectura de posición para contemplar múltiples fuentes posibles dentro de la información del nodo, así como distintos formatos de coordenadas. Con ello se consiguió una detección mucho más robusta de la posición local y se evitó que la aplicación interpretase como inexistente una posición que sí estaba disponible en el dispositivo.

Otro aspecto importante fue la necesidad de definir un criterio fiable para determinar qué nodos debían considerarse realmente “online”. Inicialmente, los nodos podían seguir apareciendo en la lista del programa, aunque llevasen mucho tiempo sin transmitir. Esto generaba una representación poco realista de la red y podía inducir al usuario a pensar que determinadas unidades seguían disponibles cuando en realidad ya no estaban activas.

Para solventarlo, se adoptó un mecanismo de temporización basado en la recepción periódica de información de posición. Un nodo solo se considera activo si ha transmitido recientemente; en caso contrario, desaparece automáticamente de la lista de unidades disponibles. De este modo, la representación de la red pasó a reflejar de forma mucho más fiel el estado real de conectividad entre las unidades.

4.5.2 Difusión y actualización de posiciones entre unidades

Durante las pruebas se comprobó también que, aunque los nodos eran capaces de obtener su propia posición GPS, no siempre la compartían de manera suficientemente fiable con el resto de la red. Esto limitaba la utilidad del mapa y de la lista de nodos, ya que la información espacial no se actualizaba de forma homogénea en todos los dispositivos.

La solución consistió en desarrollar un sistema específico de difusión periódica de posiciones entre nodos. En lugar de depender únicamente de los mecanismos nativos de la plataforma, cada unidad transmite de forma controlada su posición a intervalos regulares, permitiendo que el resto de nodos actualicen su base de datos interna y refresquen automáticamente la visualización del mapa. Además, se contempló el caso en que un nodo se encuentre operativo, pero no disponga temporalmente de posición válida, de forma que pueda seguir siendo considerado activo, aunque no pueda representarse en el mapa.

Este ajuste permitió que la visualización cartográfica de la red fuera más consistente y que la presencia de una unidad no dependiera exclusivamente de disponer de señal GPS en todo momento.

4.5.3 Persistencia y presentación correcta de la información

Otro problema relevante se produjo en la persistencia de las conversaciones y, en particular, en la representación de los nombres de los participantes. Al cerrar y reabrir la aplicación, los grupos de chat podían perder los nombres reales de las unidades y mostrar únicamente identificadores internos de nodo, dificultando la lectura y haciendo menos intuitiva la gestión de conversaciones.

Para resolver esta situación, se modificó la forma en la que el sistema almacena la información de las conversaciones, guardando directamente los nombres de las unidades asociados a cada grupo. De esta manera, al reabrir la aplicación se mantiene una representación legible de las conversaciones, y cuando la red vuelve a proporcionar información actualizada sobre los nodos, esta se utiliza para corregir o actualizar la información almacenada.

Este cambio mejoró notablemente la continuidad de uso del programa entre sesiones y reforzó la persistencia de la información, que constituye una parte esencial del sistema de mensajería desarrollado.

4.5.4 Segmentación y reensamblado de mensajes estructurados

Uno de los retos técnicos más importantes estuvo relacionado con los mensajes estructurados del módulo SACOMAR. Este tipo de mensajes puede superar con facilidad el tamaño máximo práctico de transmisión de la red LoRa-Meshtastic, por lo que no era posible enviarlos de forma íntegra como una única unidad.

Para resolver esta limitación se desarrolló un mecanismo de segmentación que divide automáticamente los mensajes largos en varios fragmentos antes de su envío. Cada fragmento incorpora la información necesaria para que el receptor pueda identificar a qué mensaje pertenece, su posición dentro del conjunto y cuántos fragmentos componen el mensaje completo.

En destino, el sistema mantiene temporalmente los fragmentos recibidos y reconstruye el mensaje original cuando dispone de todos ellos. Además, se introdujo una limpieza automática de mensajes incompletos para evitar que queden buffers abiertos indefinidamente en situaciones en las que no se recibe el conjunto completo. Este mecanismo resultó imprescindible para poder transmitir mensajes estructurados de longitud significativa a través de una red de bajo caudal.

4.5.5 Confirmación de entrega y reintentos

A la dificultad anterior se añadió la necesidad de garantizar, en la medida de lo posible, que los mensajes enviados llegasen efectivamente a su destino. En una red LoRa con varios nodos, la pérdida de paquetes puede producirse por colisiones, interferencias o degradación del enlace, por lo que no bastaba con transmitir el mensaje una sola vez y asumir su recepción.

Para incrementar la fiabilidad del sistema se implementó un mecanismo de confirmación de recepción. Cuando un destinatario recibe correctamente un mensaje completo, envía una confirmación al emisor. Si esta confirmación no llega dentro del tiempo esperado, la aplicación vuelve a transmitir el mensaje de forma automática. El sistema limita el número de reintentos para evitar bucles indefinidos y gestiona de forma independiente la confirmación de cada destinatario, lo que permite dejar de reenviar el mensaje a quienes ya lo han recibido mientras se sigue intentando con quienes aún no han confirmado.

Este mecanismo no convierte la red en un sistema determinista, pero sí aumenta de forma considerable la robustez práctica del intercambio de mensajes estructurados.

4.5.6 Congestión de red y ajuste de temporizaciones

A medida que aumentaba el número de nodos simultáneamente activos en la red, se hizo evidente otro problema: la saturación del canal radio. En un escenario con varias lanchas transmitiendo posiciones, mensajes de chat y mensajes SACOMAR, la acumulación de tráfico podía provocar colisiones frecuentes y pérdida de paquetes.

La solución adoptada consistió en introducir temporizaciones escalonadas entre transmisiones, segmentación y reintentos. En lugar de enviar todos los mensajes de forma inmediata y continua, el sistema distribuye los envíos en el tiempo, reduciendo la probabilidad de que varias transmisiones coincidan sobre el canal. Este ajuste permitió mantener un rendimiento más estable de la red sin renunciar a la funcionalidad de mensajería.

Se trata de una solución pragmática orientada al comportamiento real del medio LoRa: no elimina completamente las colisiones, pero sí reduce de forma apreciable su impacto en un escenario con varios nodos móviles.

4.5.7 Indicadores de estado y usabilidad de la interfaz

No todas las dificultades encontradas fueron de naturaleza puramente técnica; varias de ellas afectaron directamente a la usabilidad de la herramienta. Una de las primeras necesidades detectadas fue la falta de una indicación clara del estado de conexión con el nodo Meshtastic. Sin un indicador visible, el usuario podía no percibir si el sistema estaba realmente conectado, si la conexión se había perdido o si existía un error de comunicación.

Para solucionar este problema se añadió una barra de estado con indicación visual del estado de conexión, diferenciando de forma explícita entre funcionamiento correcto, desconexión y error. Además, se incorporó un mecanismo de reconexión desde la propia interfaz, evitando la necesidad de reiniciar el programa para restablecer la comunicación.

Otro problema de usabilidad estuvo relacionado con la gestión de mensajes nuevos. En una aplicación con varias conversaciones y módulos diferentes, el usuario necesitaba una forma rápida de identificar qué espacios contenían información no leída. La solución fue introducir indicadores visuales en pestañas y conversaciones, así como resaltar las conversaciones con actividad reciente no revisada. Esto mejoró considerablemente la capacidad del usuario para priorizar la atención sobre la información entrante.

4.5.8 Adaptación al contexto naval: unidades y herramientas cartográficas

Por último, se detectó que ciertos elementos de presentación de la información no estaban adaptados al contexto naval de uso. En particular, las distancias y velocidades se mostraban inicialmente en

unidades más habituales en entornos terrestres, lo que resultaba poco natural en una herramienta destinada a embarcaciones.

Para corregirlo, se adaptó la representación de magnitudes a unidades náuticas, mostrando distancias en millas náuticas o yardas según la escala y velocidades en nudos. Esta modificación mejoró la coherencia del sistema con el entorno de uso previsto.

Del mismo modo, se incorporaron herramientas de medición sobre el mapa que permiten estimar de forma interactiva distancias y demoras, tanto desde la posición propia hasta el cursor como entre dos puntos cualesquiera del mapa. Estas funcionalidades no eran estrictamente necesarias para la transmisión de mensajes, pero sí aportan valor operativo a la herramienta y la acercan más a un sistema útil durante ejercicios de navegación e instrucción.

4.5.9 Valor del proceso de resolución de problemas

En conjunto, las dificultades encontradas durante el desarrollo muestran que la construcción de una herramienta funcional sobre una red LoRa-Meshtastic requiere actuar en múltiples niveles simultáneamente: tratamiento de la información de posicionamiento, fiabilidad de la mensajería, control del comportamiento de la red, persistencia de datos e interfaz de usuario.

La resolución de estos problemas ha permitido transformar un prototipo inicial en una aplicación significativamente más robusta, coherente y útil para el escenario de empleo considerado. Más allá de la implementación concreta de cada solución, este proceso constituye una parte esencial del trabajo realizado, ya que refleja la dimensión real de ingeniería del proyecto: identificar problemas durante el uso práctico del sistema, analizarlos y adoptar soluciones que permitan mejorar de forma progresiva su funcionamiento.

5 RESULTADOS Y VALIDACIÓN

5.1 Escenarios de pruebas definidos

La validación del sistema desarrollado se ha planteado mediante una secuencia progresiva de pruebas, definida con el objetivo de comprobar de forma escalonada tanto el funcionamiento de la infraestructura LoRa-Meshtastic como el de la herramienta de mensajería táctica desarrollada sobre ella. La lógica seguida ha consistido en avanzar desde escenarios simples y controlados hacia pruebas de mayor entidad, más próximas al entorno real de empleo previsto en las lanchas de instrucción.

En una primera fase, las pruebas se realizaron en condiciones estáticas, con las embarcaciones atracadas o sin separación significativa entre nodos. El objetivo de esta fase inicial no era evaluar el comportamiento del sistema en navegación, sino verificar de forma controlada que los distintos elementos básicos funcionaban correctamente antes de aumentar la complejidad del escenario. Este enfoque permitía aislar problemas elementales de configuración, conexión o intercambio de mensajes sin introducir todavía variables adicionales asociadas al movimiento de las lanchas, la variación de distancias o las condiciones reales de operación.

La primera comprobación se llevó a cabo con un único nodo, verificando su capacidad para recibir información y mostrarla correctamente en su propia pantalla OLED. Esta prueba permitió confirmar que el dispositivo funcionaba como terminal autónomo mínimo y que el firmware Meshtastic estaba correctamente cargado y operativo en la placa.

Una vez superada esta comprobación básica, se pasó a un segundo escenario con dos nodos, empleando la aplicación oficial de Meshtastic como herramienta de interacción. En esta fase se validó la comunicación directa entre ambos dispositivos, comprobando el envío y recepción de mensajes en un entorno sencillo y con poca distancia entre nodos. El objetivo era confirmar el funcionamiento correcto del enlace radio y del intercambio de información entre unidades sin que la complejidad de una red más amplia dificultase la identificación de posibles problemas.

Posteriormente, las pruebas se ampliaron a un escenario con todos los nodos disponibles integrados en la red, manteniendo todavía la aplicación oficial de Meshtastic como entorno de uso. En esta fase se comprobó que los distintos dispositivos podían coexistir dentro de la misma red mallada, intercambiar mensajes, compartir información de estado y transmitir posiciones. Estas pruebas seguían desarrollándose en condiciones relativamente controladas y con distancias reducidas, por lo que su finalidad principal era validar el comportamiento conjunto de la red y confirmar que la configuración adoptada era estable al trabajar con múltiples nodos simultáneamente.

Una vez verificado el funcionamiento de la infraestructura de comunicaciones y de la red *mesh* en estos escenarios básicos, se pasó a la fase de validación de la aplicación desarrollada en este trabajo. A diferencia de las pruebas anteriores, esta fase ya no se limitó a entornos estáticos, sino que se llevó a

cabo a bordo de las lanchas de instrucción y en navegación, reproduciendo de forma mucho más fiel el contexto operativo previsto para el sistema.

En un primer momento, las pruebas con la herramienta propia se realizaron con un número reducido de nodos, con el fin de comprobar la integración entre la aplicación y la red, verificar el intercambio de mensajes, validar la gestión de conversaciones y observar el comportamiento del sistema en movimiento. Esta fase intermedia resultó especialmente útil para ajustar el funcionamiento del programa y resolver problemas de implementación antes de escalar el escenario.

Para terminar de probar el sistema, se realizaron pruebas con los cinco nodos disponibles, correspondientes a las lanchas de instrucción empleadas en el trabajo. Este escenario constituye el nivel de validación de mayor entidad, ya que permitió evaluar el funcionamiento del sistema completo en una situación mucho más representativa del uso real previsto. En estas pruebas se analizó el intercambio de mensajes entre múltiples unidades, la actualización de posiciones, la representación cartográfica de la red y el comportamiento general del programa en un entorno distribuido y dinámico. Las lanchas de instrucción que salieron a la mar ese día para las pruebas eran: Godínez (GOD), desde la que se coordinaron las pruebas de la herramienta; Herrero (HER); Salas (SAL); Rull (RUL); y Chereguini (CHE).

Por último, como intento para mejorar el funcionamiento de la red, se hicieron pruebas con otro tipo de antenas y otra configuración predeterminada de Meshtastic.

Es importante destacar que las pruebas realizadas con la herramienta propia constituyen, en la práctica, una validación del sistema en su conjunto. Si la aplicación desarrollada funciona correctamente en navegación y a bordo de las lanchas, ello implica necesariamente que también están funcionando de forma adecuada todas las capas inferiores sobre las que se apoya: el nodo físico, la conexión con el dispositivo, el firmware Meshtastic, la red LoRa-Mesh y la configuración radio previamente adoptada. En este sentido, la validación de la herramienta software no solo evalúa el programa en sí mismo, sino que confirma el correcto comportamiento del sistema completo de comunicaciones.

La secuencia de pruebas definida permite, por tanto, distinguir dos niveles complementarios de validación. Por un lado, una validación básica y controlada de la infraestructura, realizada en estático y a corta distancia. Por otro, una validación funcional y operativa de mayor exigencia, llevada a cabo en navegación mediante la aplicación desarrollada. Esta progresión resulta coherente con los objetivos del trabajo, ya que permite construir la validación desde los elementos más simples del sistema hasta el escenario de uso más completo y representativo.

5.2 Resultados y evaluación de la fiabilidad de la mensajería

La fiabilidad de la mensajería se ha evaluado a partir de las pruebas realizadas en los distintos escenarios definidos, tanto en configuraciones sencillas y estáticas como en ensayos más completos con varias lanchas en navegación y utilizando la herramienta desarrollada. Esta evaluación no se ha limitado a comprobar si un mensaje podía enviarse o recibirse, sino que ha considerado también si la distribución de la información se realizaba correctamente, si el sistema mantenía un funcionamiento estable con varios nodos y cómo respondía la red cuando aumentaba la carga de tráfico.

En las pruebas iniciales, realizadas con pocos nodos y a corta distancia, el comportamiento de la mensajería fue satisfactorio. Tanto la recepción en la pantalla OLED del nodo como el intercambio de mensajes mediante la aplicación oficial de Meshtastic mostraron que la infraestructura básica funcionaba correctamente. En estos escenarios simples, la fiabilidad observada fue alta, ya que el número reducido de nodos y la baja carga de tráfico minimizaban la probabilidad de pérdida de paquetes.

A medida que el sistema evolucionó hacia escenarios más exigentes, la evaluación de la fiabilidad pasó a centrarse no solo en la recepción de mensajes, sino también en la forma en que estos se distribuían dentro de la red. Este aspecto es especialmente importante en una herramienta como la desarrollada en

este trabajo, donde conviven distintos tipos de comunicación y cada uno de ellos debe llegar únicamente a los destinatarios que corresponden.

En este sentido, las pruebas realizadas confirmaron que la lógica de distribución de mensajes funcionaba de forma correcta. Los mensajes del módulo SACOMAR eran recibidos exclusivamente por los nodos incluidos en los campos TO e INFO, sin difundirse al resto de unidades. Esto permitió verificar que la mensajería estructurada respetaba la lógica de destinatarios prevista y que la información formal no se distribuía de manera indiscriminada en la red. Por ejemplo, un mensaje SACOMAR mandado desde la lancha GOD (Figura 5-1) como destinatarios CHE y HER es recibido por estos dos (Figura 5-2, Figura 5-3), pero no es recibido por el nodo RUL que también estaba en línea en ese momento (Figura 5-4).

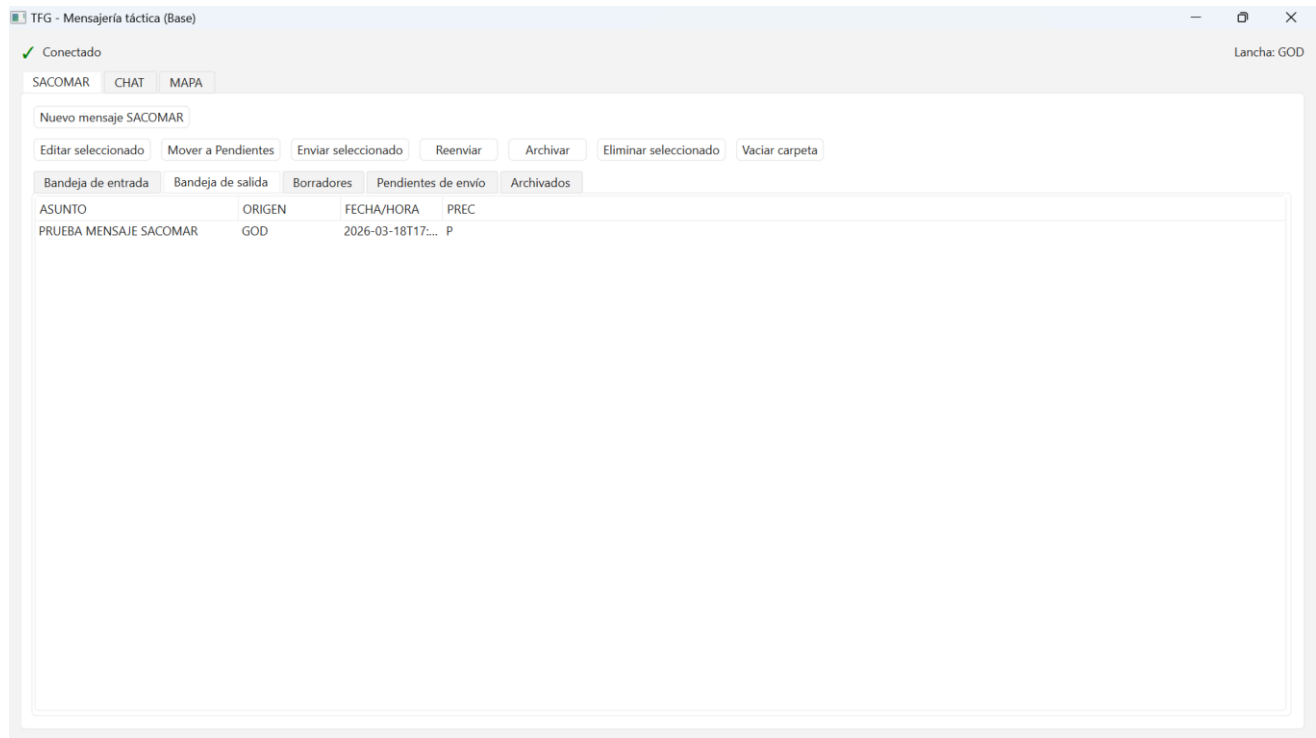


Figura 5-1 Mensaje de prueba enviado en la bandeja de salida de la GOD.

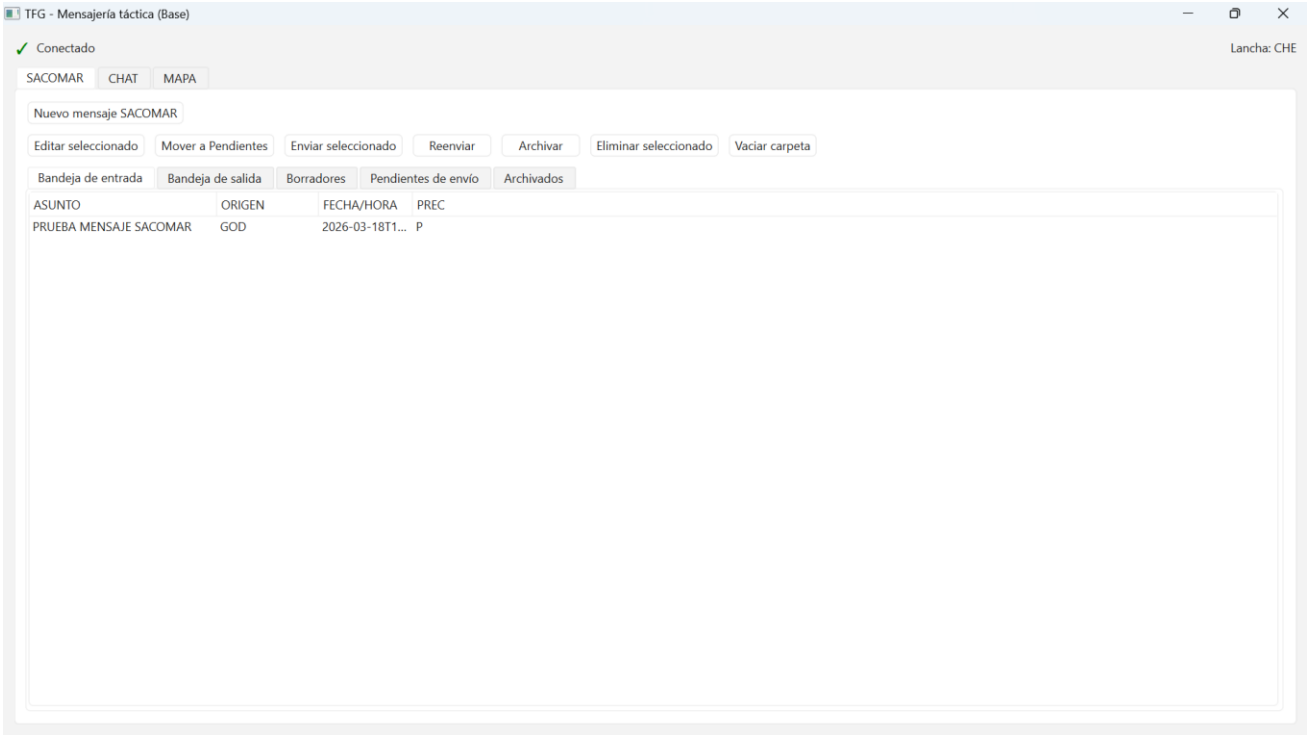


Figura 5-2 Mensaje de prueba recibido en la bandeja de entrada de CHE.

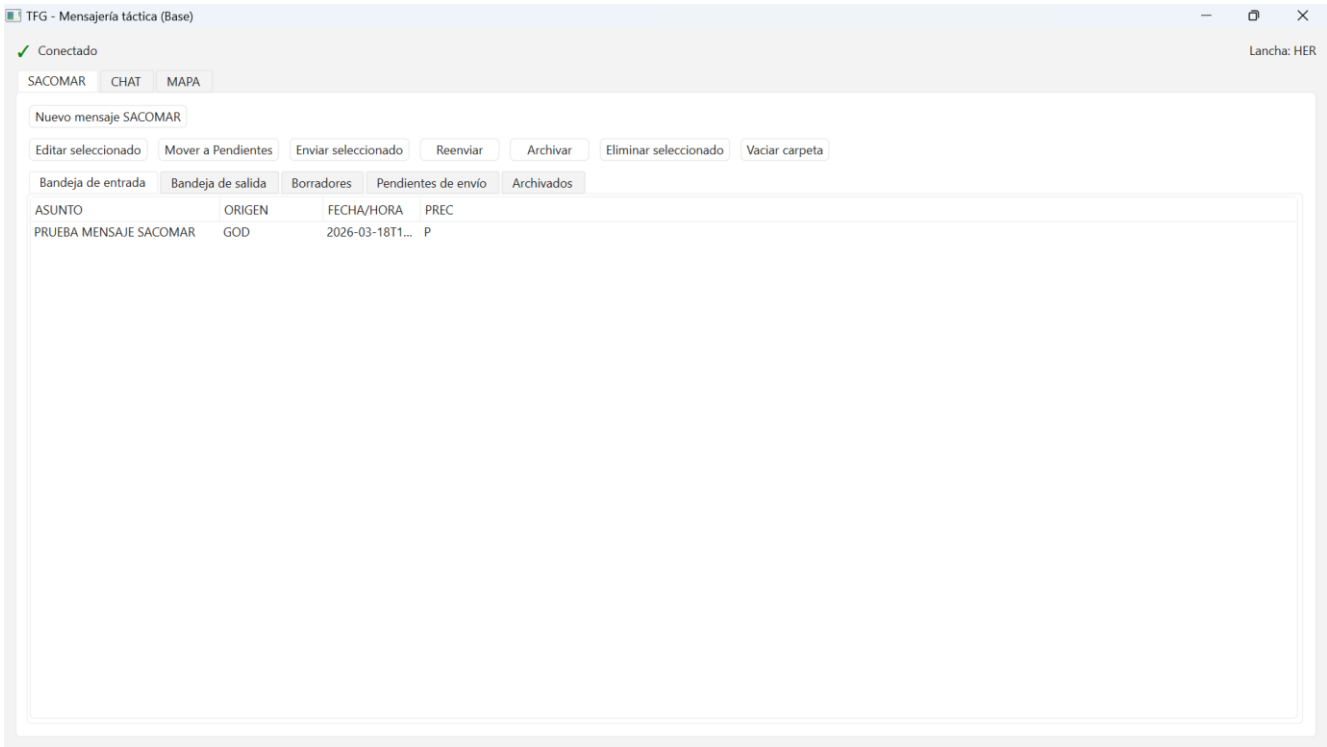


Figura 5-3 Mensaje de prueba recibido en la bandeja de entrada de la HER.

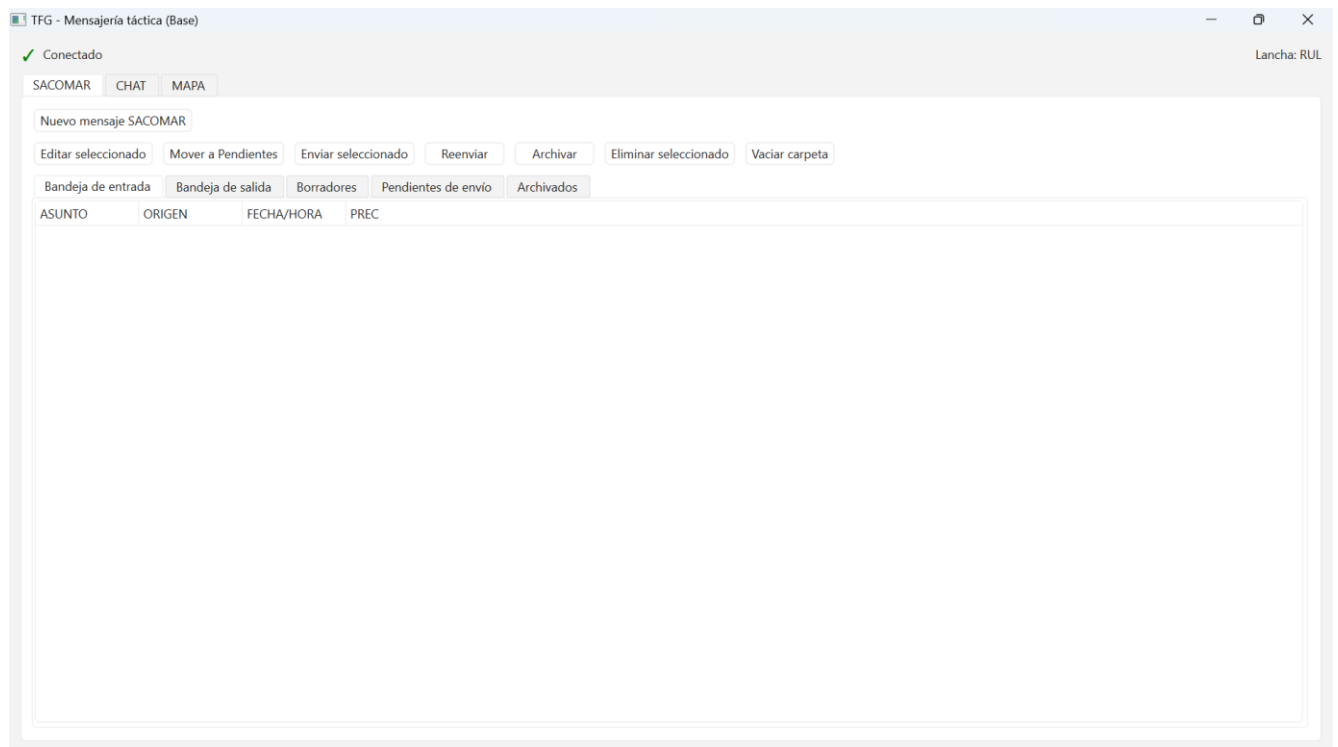


Figura 5-4 Bandeja de entrada de la RUL a la que no ha llegado ningún mensaje.

Del mismo modo, también se comprobó el comportamiento de las distintas modalidades de comunicación del módulo de chat. Como se observa en la Figura 5-5, los mensajes enviados a través del canal general ALL llegaban a todos los nodos conectados y todos eran capaces de contestar, validando así su uso como canal común de coordinación.

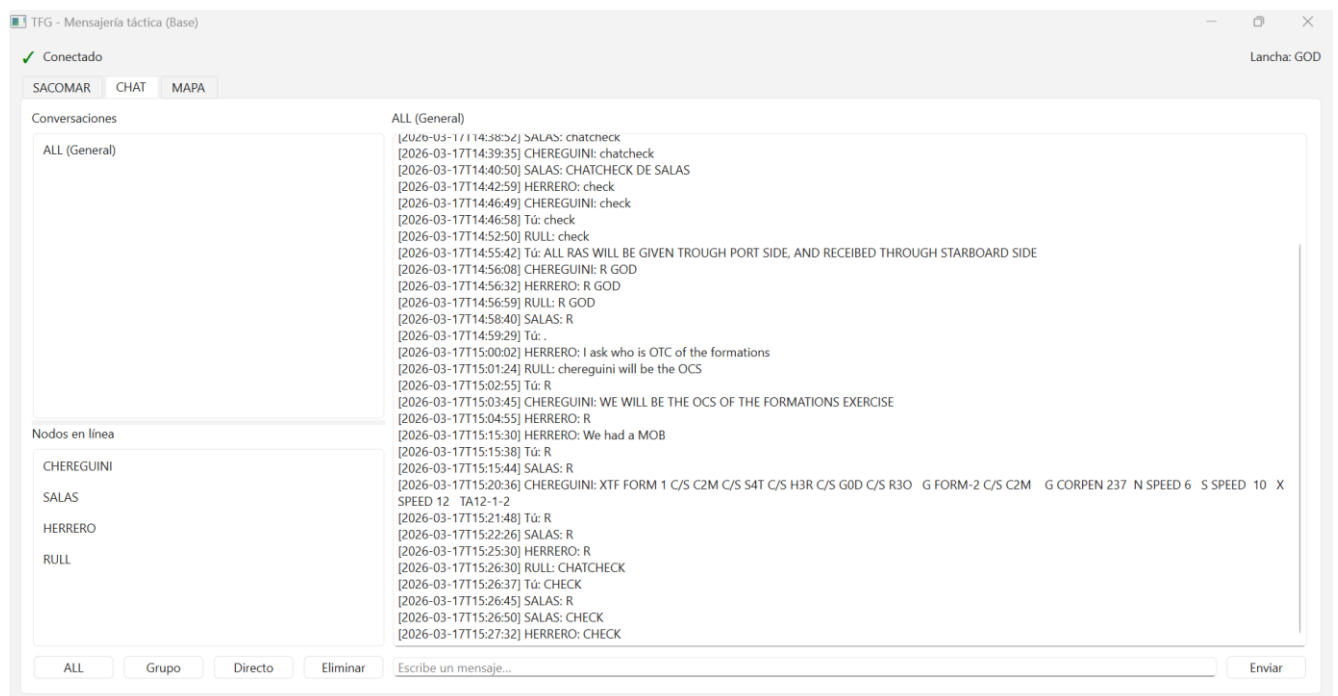


Figura 5-5 Todas las unidades mandan mensajes por ALL para coordinar la salida a la mar.

Por otro lado, como se esperaba, los mensajes enviados mediante chat directo solo eran recibidos por el nodo seleccionado. Desde la lancha GOD se hizo un chat directo con la HER, que no aparecía al resto de unidades y al que no podían contestar (Figura 5-6).

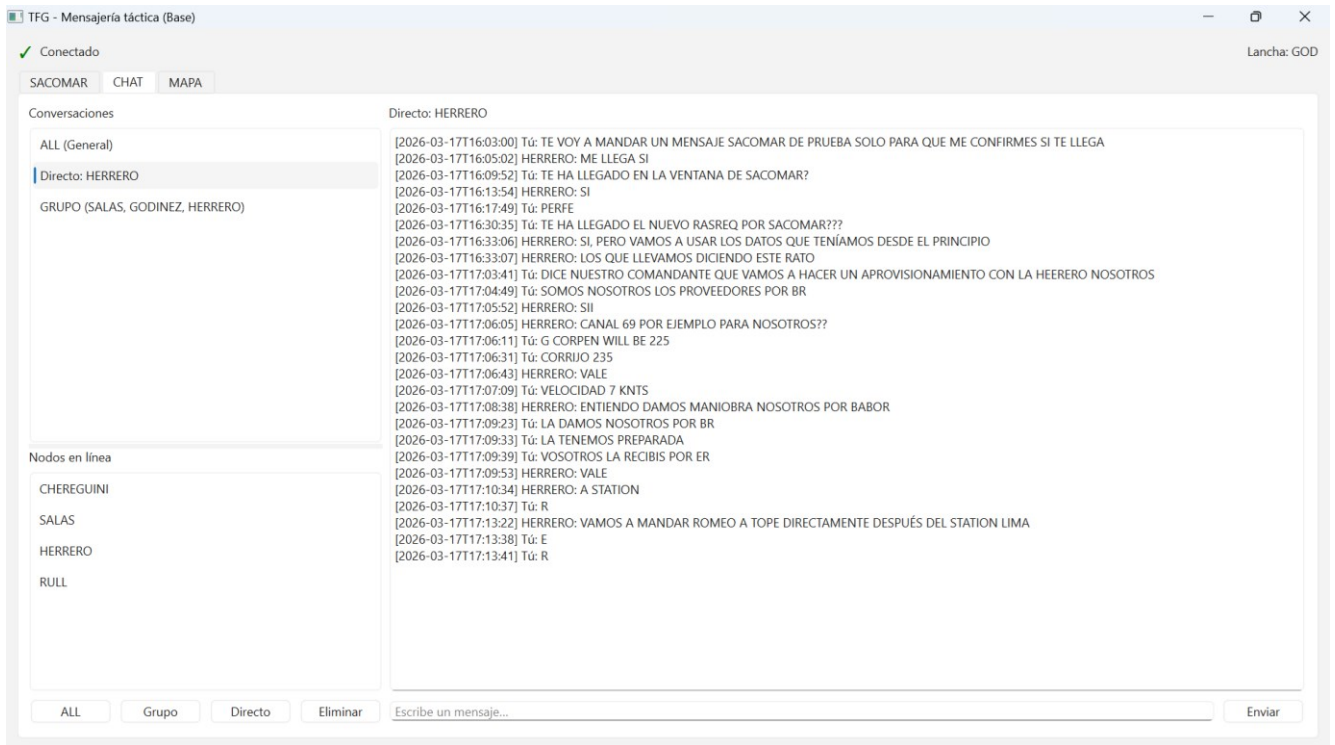


Figura 5-6 Chat directo entre GOD y HER.

También se hizo un chat grupal para coordinar maniobras entre la SAL, GOD y HER. Estos mensajes enviados a un grupo eran visibles únicamente para estos nodos y ni CHE ni RUL podían contestar (Figura 5-7). Estas pruebas permitieron confirmar que la aplicación distinguía correctamente entre comunicación general, comunicación punto a punto y comunicación grupal, y que la distribución de la información era coherente con el diseño funcional previsto.

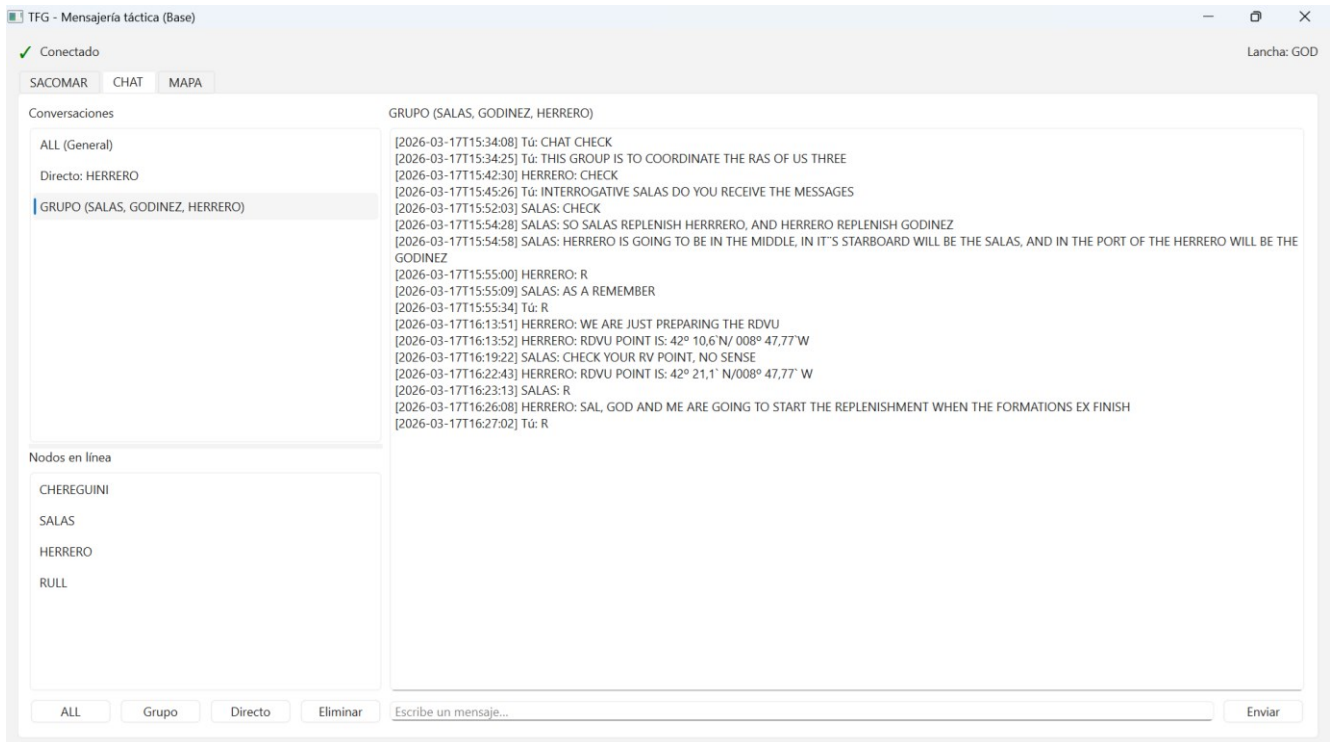


Figura 5-7 Chat grupal entre SAL, GOD y HER para coordinar ejercicios.

Durante toda la salida en la que se han hecho las pruebas los nodos estuvieron compartiendo la posición en todo momento, como se ve en la Figura 5-8. Hubo algún momento en el que algún nodo se desconectó por necesidades del servicio de operaciones de las lanchas, pero en cuanto volvían a conectar el nodo a la red, este volvía a compartir la posición al resto de unidades.

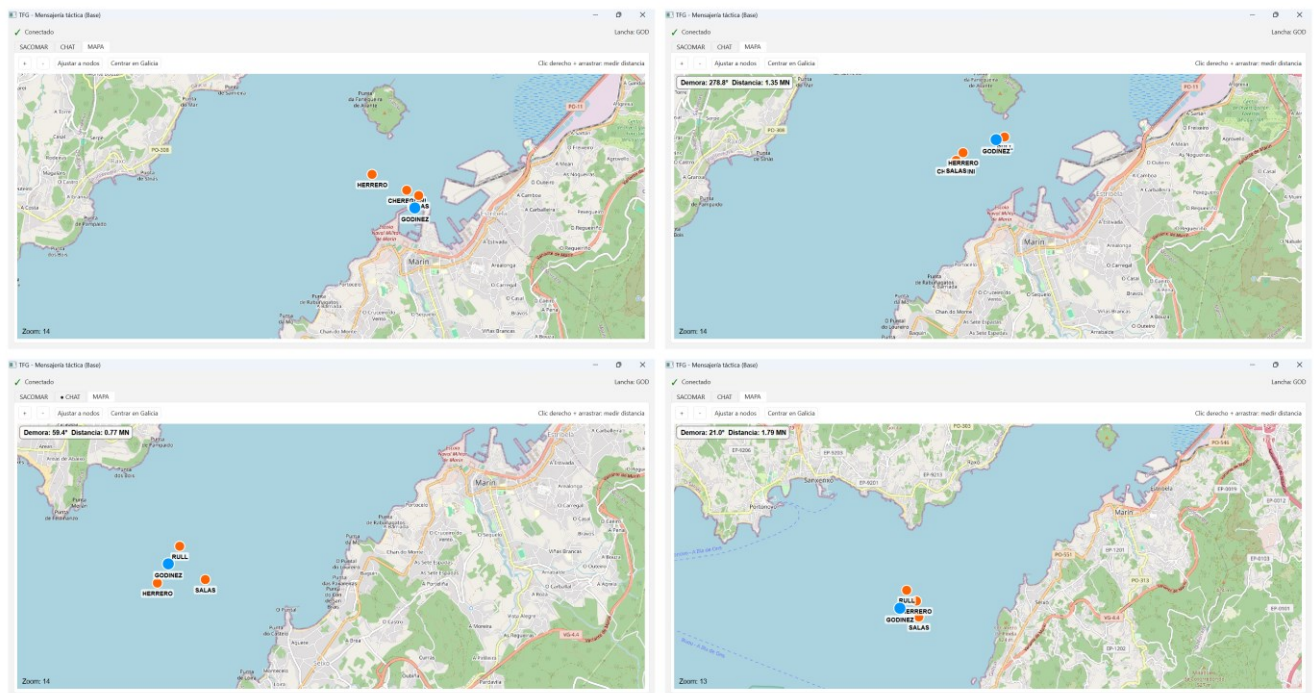


Figura 5-8 Visualización de la pestaña MAPA en cuatro momentos distintos de la salida a la mar.

Además, aunque el objetivo de estas pruebas no era comprobar el alcance de las antenas LilyGO T-Beam, se comprobó (Figura 5-9) que las lanchas se pueden separar varias millas y siguen compartiendo tanto los mensajes como la posición que se manda de manera automática.

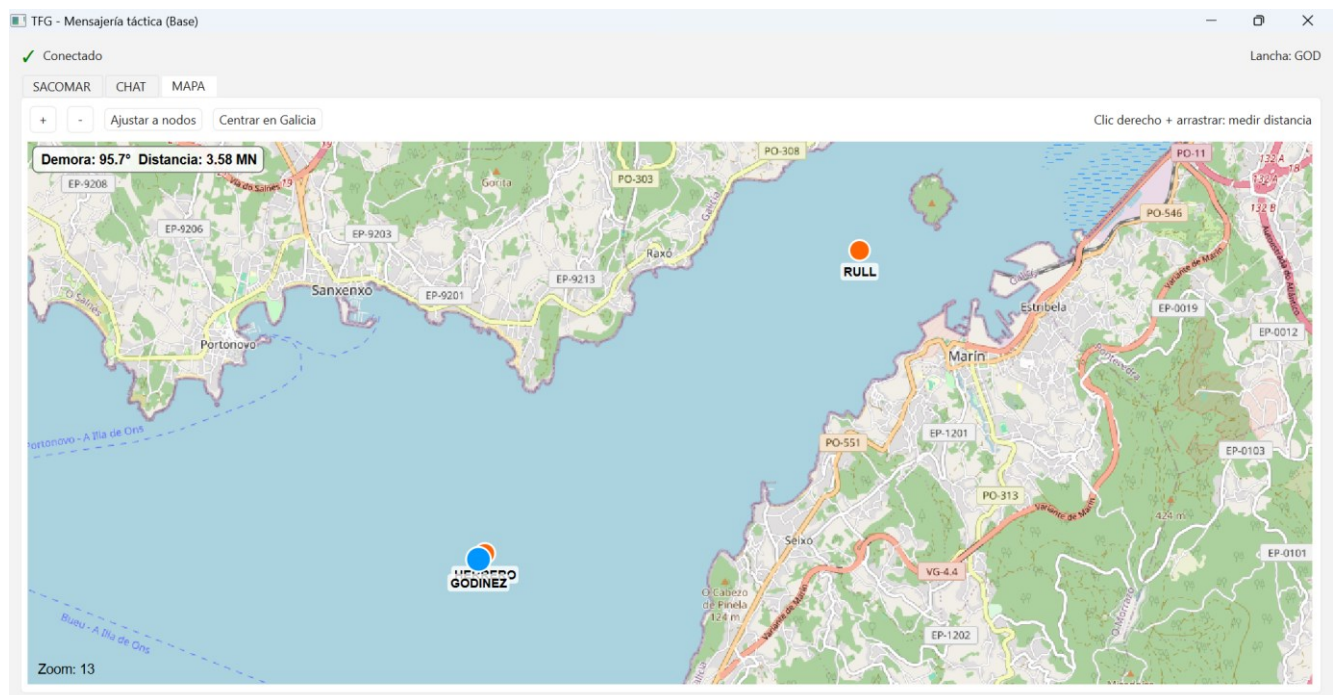


Figura 5-9 Alcance entre nodos donde se puede observar a la RUL a unas 3,5 millas náuticas de distancia.

Siguiendo en esta línea de comprobaciones, se disponía de una antena omnidireccional para 868 MHz, de mayor longitud física y con mayor ganancia en comparación con las antenas que vienen en el paquete del propio dispositivo LilyGO T-Beam (Figura 5-10). Para comprobar el alcance de esta antena se dejó un dispositivo estático en la Escuela Naval Militar y otro con esta antena a bordo de una lancha de instrucción mientras realizaba ejercicios en la mar. Se activó la opción de *Range Test* para obtener datos de los distintos parámetros mientras el nodo se iba desplazando y así poder compararlos con los datos que se obtuvieron usando las antenas de fábrica y que están reflejados en [7] y se comentan en el apartado 3.1.5. Esos datos muestran que a 8,8 km se mantenía la comunicación con un RSSI de -137 dB.



Figura 5-10 Instalación provisional de la antena para las pruebas.

En teoría, el alcance usando esta antena grande debería aumentar o, al menos, mejorar la calidad en zonas medias. Sin embargo, como se puede comprobar en la Figura 5-11, hubo una gran disminución de la distancia a la que se pueden comunicar los nodos y no hubo ninguna mejoría de la señal del RSSI en ningún punto intermedio. El alcance en esta prueba se quedó a un cuarto del alcance obtenido con las antenas de fábrica. Los nodos LilyGO T-Beam no están optimizados para funcionar con antenas de este calibre y por ello puede que no suministren suficiente corriente para trabajar correctamente.



Figura 5-11 Prueba de alcance con la antena grande y sus RSSI (dB).

Aunque en principio una antena de mayor ganancia debería mejorar el rendimiento del enlace, en esta prueba solo se sustituyó una de las antenas, manteniéndose en el otro extremo la antena pequeña original suministrada con el dispositivo. Esta asimetría puede influir en el comportamiento del enlace y hacer que la mejora esperada no se produzca. Además, el alcance puede incluso disminuir si la antena de mayor tamaño no está correctamente ajustada a la frecuencia de trabajo, si presenta desadaptación, si existen pérdidas en conectores, adaptadores o cableado, o si su instalación y orientación no son adecuadas. Por ello, una mayor ganancia nominal no garantiza por sí sola una mejora del alcance efectivo ni de la calidad del enlace en puntos intermedios, ya que el resultado final depende del conjunto formado por ambas antenas, su montaje y las condiciones reales del escenario de prueba.

Finalmente, se realizó una última comprobación de alcance con la configuración *Medium Fast* en vez de *Long Fast*. Debido a que las lanchas de instrucción no suelen desarrollar sus ejercicios separadas por grandes distancias unas de otras, se planteó la posibilidad de cambiar esta configuración para tener unas mejores condiciones de enlace en detrimento del alcance. Esto se planteó debido a las pequeñas saturaciones que sufre el canal a la hora de enviar mensajes SACOMAR. Estas saturaciones (explicadas detalladamente en el punto 5.3) no suponen una limitación importante en el sistema ya que son de poca duración y se recupera toda la información una vez se ha terminado la congestión del canal. Lo que se observó era lo esperado: las comunicaciones entre los nodos eran más fluidas pero el alcance de las antenas pasa a aproximadamente la mitad, como se observa en la Figura 5-12, aunque con muchas pérdidas entre medias de la última señal recibida.

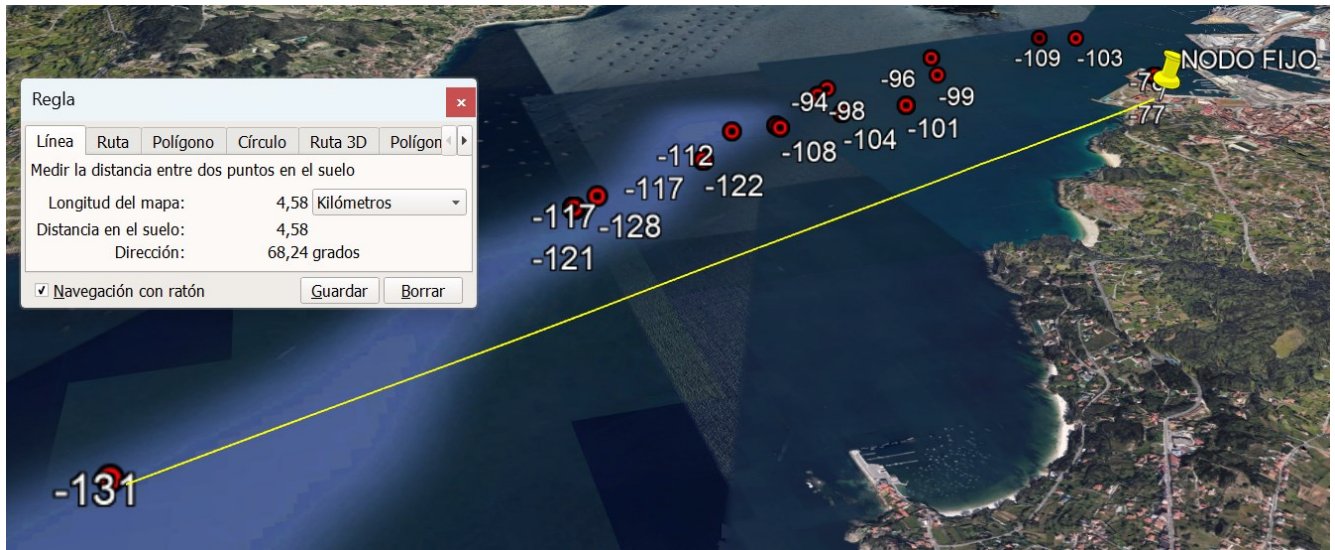


Figura 5-12 Alcance máximo en configuración *Medium Fast* y sus correspondientes RSSI (dB).

En situaciones normales, se podría optar por el uso de esta configuración, pero en determinadas circunstancias en las que el adiestramiento de los alumnos lo requiere es preferible que las antenas se comuniquen a más distancia por chat (el cual no presenta ningún problema asociado) a que tengan menos alcance por optimizar el envío de mensajes SACOMAR.

Las pruebas embarcadas con la aplicación desarrollada resultan especialmente significativas a este respecto, ya que validan el comportamiento del sistema en el escenario más exigente del trabajo: varias lanchas operando en navegación, con nodos móviles y con distintos tipos de tráfico coexistiendo en la misma red. El hecho de que la herramienta funcione correctamente en estas condiciones indica no solo que el software es operativo, sino también que la infraestructura LoRa-Meshtastic sobre la que se apoya ofrece una robustez suficiente para el propósito previsto.

En consecuencia, la evaluación realizada permite concluir que la fiabilidad de la mensajería es adecuada para el escenario de empleo previsto, es decir, una herramienta de mensajería táctica ligera, autónoma y sin dependencia de Internet o cobertura móvil, orientada a coordinación entre unidades y ejercicios de instrucción naval. La red no debe entenderse como un sistema de alta capacidad ni como un entorno inmune a saturaciones puntuales, pero sí como una solución suficientemente robusta para el intercambio de mensajes, la coordinación básica y la mensajería estructurada ocasional dentro del contexto para el que ha sido concebida.

5.3 Limitaciones observadas

A pesar de los resultados obtenidos, las pruebas realizadas han permitido identificar una serie de limitaciones que conviene señalar para situar correctamente el alcance real del sistema desarrollado. Estas limitaciones no invalidan la propuesta, pero sí delimitan con claridad el tipo de escenario en el que resulta más útil y las condiciones en las que su rendimiento puede verse afectado.

La primera limitación está asociada a la propia tecnología LoRa, que ofrece gran autonomía, bajo consumo y capacidad de funcionamiento sin infraestructura, pero a costa de un caudal de datos reducido. Esto implica que el sistema resulta adecuado para mensajería táctica ligera, posiciones GPS y tráfico breve, pero no para intercambios continuos de grandes volúmenes de información. Por tanto, la herramienta desarrollada debe entenderse como una solución orientada a coordinación y mensajería de bajo caudal, no como un sustituto de sistemas de comunicaciones de mayor capacidad.

Relacionado con ello, el comportamiento de la red depende del número de nodos activos y del volumen de tráfico que se esté generando en cada momento. A medida que aumenta el número de

unidades transmitiendo simultáneamente, crece también la probabilidad de colisiones y pérdidas de paquetes. Esta limitación se hace especialmente visible cuando coinciden mensajes estructurados más largos con otros tipos de tráfico, ya que el canal puede experimentar una carga temporal mayor.

Cuando se transmite un mensaje SACOMAR, el canal radio puede verse más cargado que en una situación de mensajería simple. En escenarios con varios nodos activos, esta carga adicional puede llegar a afectar momentáneamente al resto del tráfico, incluyendo los mensajes de chat. En la práctica, esto significa que durante el envío de un mensaje SACOMAR de cierta entidad puede producirse una disminución temporal de la fluidez de la red, sobre todo en ese nodo emisor y especialmente si coinciden varias transmisiones en un intervalo corto. Esto se comprueba fácilmente en la pantalla OLED del dispositivo, que muestra el uso del canal en cada instante y nos da una idea de la saturación que tiene la red. Como se ve en la Figura 5-13, cuando ocurren estos envíos, el uso del canal puede llegar incluso hasta 70%. Relacionado con esto, debido a todos los reenvíos que se realizan, la propia aplicación puede verse afectada y puede ir más lenta. En cuanto se ha terminado de mandar todo, se actualiza la información y el programa vuelve a la normalidad.



Figura 5-13 Pantalla OLED del nodo que muestra el uso del canal.

Debido a estas saturaciones, como se ha expuesto en el apartado anterior, se realizaron pruebas con la configuración de *Medium Fast*. Sin tener en cuenta el alcance obtenido en este escenario, se comprobó el funcionamiento y la saturación del canal a la hora de mandar los mensajes SACOMAR. Como se podía suponer, la comunicación era mejor y el canal no llegaba los niveles de saturación de la anterior configuración. Como se ve en la Figura 5-14, el uso del canal se queda en un 25% y, aunque la aplicación sigue yendo un poco lenta mientras dura el envío, los mensajes llegan mejor al receptor.



Figura 5-14 Uso del canal al enviar un mensaje SACOMAR con la configuración *Medium Fast*.

No obstante, conviene interpretar esta limitación en su contexto real de uso. En los ejercicios de lanchas de instrucción, los mensajes SACOMAR no se envían de manera continua ni constituyen el tráfico predominante de la red. Se trata de mensajes puntuales, empleados en momentos concretos del ejercicio y con una finalidad específica. Por ello, la posible saturación del canal asociado a este tipo de mensajes debe entenderse como un fenómeno ocasional y de corta duración, no como una situación permanente de funcionamiento. En otras palabras, el envío de mensajes estructurados puede generar un incremento temporal del tráfico durante unos segundos, pero no implica que la red permanezca saturada de forma habitual. Además, esta congestión en la práctica solamente es experimentada por el nodo que está enviando los segmentos; el resto de nodos de la red siguen enviando y recibiendo mensajes del CHAT sin ningún problema, pues la saturación no llega al 100% del canal. Es por ello también, como se ha introducido antes en el punto 5.2, que no es recomendable cambiar la configuración de los nodos a *Medium Fast*. No merece la pena condicionar el alcance de las comunicaciones entre lanchas por estos mensajes puntuales y que no son usados con frecuencia en las salidas a la mar.

Otra limitación importante es que la fiabilidad del sistema no puede considerarse determinista. Aunque la aplicación incorpora mecanismos de confirmación de recepción, reintentos automáticos y segmentación de mensajes, el medio radio sigue estando sujeto a interferencias, congestión momentánea y variaciones del enlace. En consecuencia, el sistema mejora significativamente la robustez práctica de la mensajería, pero no puede garantizar una entrega instantánea y perfecta en todas las circunstancias.

También se ha observado una dependencia clara de la disponibilidad de posición GPS para algunas de las funciones más útiles de la aplicación, especialmente la representación cartográfica y parte de la gestión de nodos online. Cuando una unidad no dispone de fijación GPS, puede seguir participando en la red y enviar o recibir mensajes, pero la capacidad del sistema para representar su ubicación y aportar conciencia situacional disminuye. Esto no afecta a la comunicación básica, pero sí limita el valor añadido del mapa como herramienta de apoyo.

Desde el punto de vista de la seguridad, el sistema ofrece un nivel de protección adecuado para el entorno de adiestramiento considerado, pero presenta limitaciones si se compara con sistemas militares específicos. El uso de canales protegidos mediante clave compartida permite restringir el acceso al contenido de los mensajes, pero no equivale a un sistema completo de autenticación avanzada o de gestión criptográfica de nivel operativo. Por ello, la herramienta resulta válida como solución didáctica y como sistema autónomo de comunicaciones ligeras, pero no debe interpretarse como una alternativa a sistemas clasificados de uso real.

Otra limitación se relaciona con la infraestructura de explotación. El sistema admite varios niveles de uso, desde el nodo autónomo con pantalla OLED hasta la aplicación completa en ordenador, pero no todas estas modalidades ofrecen el mismo nivel de funcionalidad. El nodo aislado permite un empleo mínimo, útil en determinadas circunstancias, mientras que la explotación completa del sistema requiere disponer de un ordenador portátil conectado al nodo local. Aunque esta exigencia es reducida y asumible en las lanchas de instrucción, sigue suponiendo una dependencia adicional respecto al uso mínimo del dispositivo.

Por último, debe señalarse que la solución se ha validado en un entorno representativo de las lanchas de instrucción y con un número limitado de unidades. Los resultados obtenidos son plenamente relevantes para este contexto, pero no pueden extrapolarse automáticamente a escenarios de mayor escala o a redes con un número mucho más elevado de nodos sin realizar nuevas pruebas específicas. El sistema ha demostrado ser adecuado para un entorno táctico ligero y académico, pero su comportamiento en escenarios más complejos requeriría una validación adicional.

En conjunto, las limitaciones observadas muestran que el sistema propuesto debe entenderse como una solución táctica ligera, autónoma y de bajo coste, especialmente adecuada para coordinación básica, ejercicios de instrucción y experimentación tecnológica. Sus restricciones derivan en gran medida del propio medio de transmisión y del diseño deliberadamente simple y resiliente de la arquitectura, pero no impiden que la herramienta cumpla con el objetivo principal del trabajo dentro del entorno para el que ha sido concebida.

5.4 Ejemplos de uso de la herramienta

Una vez definidos los escenarios de prueba y validada la evolución progresiva del sistema, resulta útil describir algunos ejemplos de uso representativos que permitan entender el valor práctico de la solución desarrollada. Estos ejemplos se han ordenado de menor a mayor complejidad, atendiendo tanto al nivel de infraestructura necesario como al grado de adiestramiento requerido por parte de los usuarios.

5.4.1 Uso mínimo del nodo como terminal autónomo

El nivel más elemental de empleo del sistema corresponde al uso del propio nodo LoRa-Meshtastic como terminal autónomo, sin necesidad de ordenador, tableta ni teléfono móvil. En este caso, la interacción con el sistema se reduce a la información que puede mostrarse directamente en la pantalla OLED integrada en la placa.

Aunque esta modalidad de uso presenta limitaciones evidentes en cuanto a capacidad de interacción y explotación de la información, resulta especialmente interesante en situaciones en las que no es posible embarcar dispositivos adicionales o en las que se busca disponer de una solución extremadamente ligera y autónoma. El nodo, por sí mismo, puede actuar como un terminal mínimo de recepción de información, permitiendo mostrar mensajes básicos, estado del sistema y otros datos esenciales.

Este caso de uso presenta una aplicación clara en el entorno naval. En operaciones reales de la Armada, puede ser necesario arriar al agua una embarcación ligera tipo RHIB para realizar actividades concretas, como recogida de náufragos, inspección, reconocimiento costero, apoyo puntual a otra unidad o transporte de personal. En este tipo de embarcaciones, el espacio disponible es muy reducido, como se observa en la Figura 5-15, y no siempre resulta viable embarcar un portátil, una tableta o cualquier otro dispositivo adicional. Sin embargo, sigue siendo necesario mantener la localización de la embarcación y transmitirle órdenes o instrucciones desde el buque madre.



Figura 5-15 Alumnos de la ENM haciendo prácticas con la RHIB.

En este contexto, el uso del nodo como terminal autónomo adquiere un valor operativo evidente. La embarcación ligera puede llevar consigo únicamente el dispositivo LoRa, manteniendo la capacidad de recibir instrucciones básicas y de ser localizada dentro de la red sin depender de cobertura móvil, acceso a Internet ni infraestructura externa de ningún tipo. Este mismo razonamiento resulta trasladable al entorno de instrucción de la Escuela Naval Militar, donde también se emplean embarcaciones tipo RHIB en determinadas actividades o ejercicios. Estas embarcaciones pueden utilizarse para reconocimiento de costa, apoyo a otras lanchas, auxilio puntual o simplemente para adiestramiento específico en maniobra y gobierno de RHIB. En todos estos casos, disponer de un nodo autónomo con pantalla integrada como el de la Figura 5-16 permite introducir una primera capa de coordinación y control con una infraestructura mínima.



Figura 5-16 Ejemplo de mensaje que se podría consultar desde el dispositivo.

Por tanto, este primer ejemplo de uso representa la forma más sencilla y ligera de empleo del sistema: una red de comunicaciones básica, autónoma y sin dependencia absoluta de Internet, cobertura celular o medios externos, en la que el nodo actúa como terminal mínimo de recepción y presencia en red.

5.4.2 Uso de la aplicación oficial de Meshtastic como herramienta básica de mando y control

El segundo nivel de empleo del sistema corresponde al uso de la aplicación oficial de Meshtastic como herramienta de interacción con la red, sin recurrir todavía a la aplicación específica desarrollada en este trabajo. En este caso, la red LoRa-Meshtastic ya no se explota únicamente a través de la pequeña pantalla del nodo, sino mediante un dispositivo externo ligero, como un teléfono móvil o una tableta, conectado al nodo correspondiente.

Esta modalidad de uso permite aumentar notablemente las capacidades de interacción del sistema manteniendo una infraestructura reducida. A través de la aplicación oficial es posible enviar mensajes, consultar la lista de nodos disponibles, visualizar la posición de las unidades sobre el mapa y gestionar la comunicación de forma mucho más cómoda que desde el nodo aislado. Todo ello sigue realizándose sin necesidad de acceso a Internet, sin cobertura móvil y sin depender de infraestructura fija externa, ya que el dispositivo únicamente actúa como interfaz de usuario sobre la red LoRa creada por los nodos.

Este caso de uso resulta especialmente adecuado en ejercicios sencillos o en fases tempranas de adiestramiento, cuando el alumnado todavía no dispone del nivel necesario para trabajar con mensajería estructurada más avanzada. En este tipo de situaciones, la aplicación oficial de Meshtastic proporciona un entorno suficientemente útil para realizar coordinación básica entre unidades, transmitir instrucciones breves, comprobar qué nodos están activos y consultar la posición aproximada de las embarcaciones participantes.

También resulta una solución práctica en aquellos casos en los que no se dispone de un ordenador o en los que se desea contar con una herramienta de comunicación más ligera y fácilmente transportable. Una tableta o un teléfono móvil conectado al nodo permiten mover el terminal de comunicaciones de un punto a otro de la embarcación con mucha mayor facilidad que un portátil. Esto puede ser relevante tanto en entornos de instrucción como en situaciones operativas en las que se prioriza la sencillez y la movilidad del equipo.

Desde el punto de vista formativo, esta modalidad de uso tiene además una ventaja importante: constituye un paso intermedio entre el empleo mínimo del nodo autónomo y el uso de la herramienta de mensajería táctica desarrollada en este trabajo. Permite que los alumnos se familiaricen con la lógica de una red distribuida, con la visualización de nodos y con la comunicación entre unidades antes de introducir procedimientos más avanzados de mensajería estructurada.

Por ello, el uso de la aplicación oficial de Meshtastic puede considerarse una herramienta básica de mando y control a pequeña escala, adecuada para ejercicios con baja complejidad documental, con necesidades reducidas de infraestructura y con usuarios todavía en proceso de familiarización con el sistema.

5.4.3 Uso de la herramienta desarrollada para ejercicios de mayor entidad

El nivel de uso más completo corresponde al empleo de la aplicación desarrollada en este trabajo como herramienta principal de explotación de la red LoRa-Meshtastic durante ejercicios de mayor entidad en las lanchas de instrucción. En este escenario, la infraestructura de comunicaciones ya no se limita a la red *mesh* y a la aplicación oficial, sino que se complementa con una estación de trabajo basada en ordenador portátil desde la que el usuario puede acceder a un conjunto mucho más rico de funcionalidades.

Este caso de uso es el que mejor se ajusta al objetivo principal de este trabajo, ya que permite aproximar el entorno de instrucción a una lógica de comunicaciones más cercana a la realidad de las unidades de la Armada. La herramienta desarrollada no solo permite intercambiar mensajes de chat para

coordinación inmediata, sino que incorpora también un módulo de mensajería estructurada inspirado en la lógica de los mensajes SACOMAR. De esta forma, la red puede emplearse simultáneamente para transmitir instrucciones rápidas, mantener comunicaciones entre unidades y practicar el intercambio formal de mensajes con campos, precedencias y estructura documental más definida.

Este escenario resulta particularmente útil en ejercicios de mayor entidad, en los que intervienen varias lanchas, se requiere mayor coordinación y el alumnado ya dispone de un grado de adiestramiento suficiente para trabajar con procedimientos de mensajería más elaborados. En estas condiciones, el sistema permite combinar dos niveles complementarios de comunicación: por un lado, un entorno de chat ágil para instrucciones inmediatas y coordinación táctica; por otro, una herramienta de mensajería formal que introduce una dimensión documental y procedimental mucho más próxima a la empleada en las unidades reales de la Armada.

Además, la aplicación incorpora la representación cartográfica de la red, lo que permite que cada unidad pueda visualizar la posición del resto de lanchas participantes. Esta funcionalidad aporta una capa adicional de conciencia situacional que resulta especialmente útil en ejercicios de navegación, maniobra o coordinación entre varias embarcaciones. El sistema no solo permite comunicar órdenes, sino también interpretar espacialmente la posición relativa de las unidades dentro del ejercicio.

Es cierto que esta modalidad de empleo requiere una infraestructura algo mayor que en los casos anteriores, ya que precisa el uso de un ordenador portátil conectado al nodo local. No obstante, esta exigencia adicional sigue siendo reducida y perfectamente asumible en el contexto de las lanchas de instrucción, donde ya existe disponibilidad de este tipo de medios. En comparación con sistemas de comunicaciones más complejos o dependientes de infraestructuras externas, la solución propuesta sigue siendo extraordinariamente ligera.

Lo más relevante de este escenario es que toda esta capacidad se obtiene sin depender absolutamente de Internet, de cobertura celular ni de ninguna infraestructura externa. La red funciona de manera completamente autónoma, apoyándose únicamente en los nodos LoRa y en los dispositivos conectados localmente a ellos. Este aspecto constituye una de las principales fortalezas del sistema, ya que refuerza su utilidad tanto desde el punto de vista operativo como formativo: los alumnos pueden trabajar con una herramienta de coordinación distribuida y resiliente, entendiendo que la conectividad entre unidades no depende de servicios externos sino de una red propia creada entre las embarcaciones.

En consecuencia, este tercer ejemplo de uso representa la modalidad más completa y de mayor valor formativo del sistema desarrollado. Permite pasar de una simple red de intercambio de mensajes a una herramienta de mensajería táctica y coordinación entre unidades, adaptada al entorno de instrucción naval y capaz de operar de manera totalmente autónoma.

5.4.4 Valor progresivo de los tres modos de uso

Los tres ejemplos descritos muestran que la solución propuesta no responde a un único perfil de empleo, sino que admite diferentes niveles de explotación en función de la complejidad del ejercicio, de los medios disponibles y del grado de adiestramiento de los usuarios. Desde un nodo autónomo mínimo, pasando por la aplicación oficial de Meshtastic como entorno básico de control, hasta la herramienta completa desarrollada en este trabajo, el sistema ofrece una progresión natural de capacidades.

Esta escalabilidad constituye una de las principales ventajas de la propuesta, ya que permite adaptar el nivel de complejidad del sistema al contexto de empleo sin perder en ningún momento el principio fundamental que guía todo el trabajo: disponer de un sistema de comunicaciones tácticas autónomo, ligero y completamente independiente de Internet, cobertura móvil o infraestructura externa.

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1 Conclusiones generales del trabajo

El presente Trabajo Fin de Grado ha permitido analizar, validar y explotar una red de comunicaciones tácticas basada en tecnología LoRa y firmware Meshtastic, orientada a su uso en las lanchas de instrucción de la Escuela Naval Militar. A partir de una infraestructura ligera, autónoma y sin dependencia de Internet ni de cobertura celular, se ha desarrollado una herramienta de mensajería capaz de aportar un entorno de coordinación más próximo a la lógica de funcionamiento de las comunicaciones navales.

En primer lugar, el trabajo ha confirmado la viabilidad del empleo de nodos LoRa-Meshtastic como base para una red distribuida de comunicaciones entre embarcaciones. Las pruebas realizadas han permitido comprobar que esta infraestructura puede funcionar de forma estable en escenarios progresivamente más exigentes, desde ensayos básicos en estático hasta pruebas con varias lanchas en navegación. De este modo, se ha verificado que la red puede constituir un soporte válido para el intercambio de mensajes, la difusión de posiciones y la coordinación básica entre unidades dentro de un entorno de instrucción.

Sobre esta base, el trabajo ha permitido desarrollar una aplicación propia que amplía significativamente las capacidades de explotación de la red. La herramienta implementada no se limita a actuar como una interfaz gráfica para Meshtastic, sino que organiza la información transmitida, incorpora mensajería estructurada, facilita la gestión de conversaciones y añade representación cartográfica de las unidades. Con ello, la conectividad básica de la red se transforma en una herramienta más útil desde el punto de vista operativo y formativo.

Uno de los resultados más relevantes del trabajo es que esta funcionalidad se ha conseguido sin recurrir a infraestructura externa de ningún tipo. Todo el sistema puede operar de manera completamente autónoma, utilizando únicamente nodos LoRa, dispositivos locales y enlaces directos entre unidades. Esta característica constituye una de las principales fortalezas de la propuesta, ya que aporta resiliencia, simplicidad de despliegue y adecuación a escenarios limitados o degradados, muy relevantes tanto en el ámbito académico como en ciertos perfiles de empleo táctico ligero.

Desde el punto de vista docente, el sistema desarrollado ofrece además un valor añadido importante. No solo permite comunicar unidades entre sí, sino que introduce a los alumnos en conceptos fundamentales del mando y control naval, como la necesidad de estructurar la información, gestionar conversaciones entre distintas unidades, interpretar la situación espacial del despliegue y trabajar con procedimientos de mensajería más próximos a los empleados en entornos reales. En este sentido, la herramienta propuesta no debe entenderse únicamente como una solución técnica, sino también como un instrumento de adiestramiento.

En conjunto, puede concluirse que el trabajo ha cumplido su objetivo principal: demostrar que una red LoRa-Meshtastic, complementada con una aplicación específica de mensajería táctica, puede constituir una solución viable para mejorar la coordinación y el adiestramiento en las lanchas de instrucción de la Escuela Naval Militar. La propuesta desarrollada no pretende sustituir los sistemas de comunicaciones empleados por la Armada en entornos operativos reales, pero sí ofrece una aproximación funcional, autónoma y de bajo coste que permite trasladar parte de su lógica al contexto académico de forma realista y útil.

6.2 Aportaciones técnicas y operativas

El trabajo realizado aporta una serie de contribuciones que pueden valorarse tanto desde el punto de vista técnico como desde el punto de vista operativo y formativo. Estas aportaciones no se limitan al desarrollo de una aplicación informática, sino que abarcan también la validación de una infraestructura de comunicaciones autónoma y su adaptación a un contexto concreto de empleo en las lanchas de instrucción.

Desde el punto de vista técnico, una de las principales aportaciones del trabajo ha sido la consolidación de una red de comunicaciones basada en tecnología LoRa y firmware Meshtastic como soporte válido para el intercambio de información entre unidades navales ligeras. Aunque la infraestructura de red no se ha diseñado desde cero en este TFG, sí se ha comprobado su viabilidad práctica como base sobre la que construir servicios de mensajería más avanzados. En este sentido, el trabajo demuestra que una red mallada ligera, de bajo consumo y completamente independiente de Internet o cobertura celular puede constituir una solución funcional para escenarios locales de coordinación entre embarcaciones.

Sobre esta base, la aportación técnica más relevante ha sido el desarrollo de una herramienta específica de mensajería que amplía las capacidades nativas de Meshtastic. La aplicación implementada permite organizar la información transmitida, gestionar conversaciones, almacenar mensajes, representar posiciones sobre un mapa y combinar distintos niveles de comunicación dentro de una misma interfaz. De esta forma, el sistema deja de ser únicamente una red de intercambio básico de mensajes y pasa a convertirse en una herramienta más rica y estructurada.

Otra aportación importante ha sido la incorporación de un módulo de mensajería formal inspirado en la lógica de los sistemas navales reales. Aunque el entorno desarrollado no pretende reproducir un sistema clasificado de la Armada, sí traslada al contexto académico elementos propios de una mensajería estructurada: campos diferenciados, precedencias, destinatarios, persistencia documental y organización por bandejas. Esta adaptación permite aproximar la lógica de trabajo de los sistemas de comunicaciones navales a un entorno de instrucción accesible y no clasificado.

Asimismo, el trabajo aporta valor técnico en la resolución de limitaciones propias del medio LoRa. Para hacer viable la mensajería estructurada sobre una red de bajo caudal ha sido necesario incorporar mecanismos de segmentación, reensamblado, confirmación de recepción y reintentos automáticos. Estos elementos no eliminan las restricciones del medio, pero permiten utilizarlo de una forma más robusta y funcional, ampliando considerablemente las posibilidades prácticas del sistema.

Desde el punto de vista operativo, la propuesta desarrollada aporta una solución escalable, capaz de adaptarse a distintos niveles de complejidad. El sistema puede emplearse desde su forma más básica, utilizando únicamente el nodo como terminal mínimo, hasta su forma más completa, con la aplicación desarrollada funcionando en un ordenador portátil. Esta flexibilidad constituye una aportación relevante, ya que permite ajustar el nivel de explotación del sistema al contexto del ejercicio, a los medios disponibles y al grado de adiestramiento del alumnado. Por ejemplo, en cuanto a la configuración de la capa física de la red, se ha determinado el perfil *Long Fast* como el ajuste por defecto para la operativa estándar de las lanchas de instrucción. Este equilibrio entre robustez y velocidad permite gestionar con fiabilidad una carga moderada de mensajería tipo SACOMAR y actualizaciones de posición GPS,

manteniendo un alcance óptimo en el entorno de la ría. No obstante, el sistema está diseñado para ser flexible: debido a la posible eventual saturación de la red por una alta densidad de mensajes tácticos estructurados, se contempla la migración hacia perfiles como *Medium Fast*. Esta transición permitiría incrementar significativamente la tasa de transferencia de datos y reducir el tiempo de ocupación del canal, facilitando la fluidez de las comunicaciones a costa de una reducción controlada en el alcance máximo de la señal.

Siguiendo con el punto de vista operativo, es interesante señalar que parte de las pruebas de validación se realizaron con los nodos ubicados en el interior del Centro de Información y Combate (CIC) de las lanchas de instrucción. Al tratarse de un entorno confinado por estructuras metálicas, se produce un fenómeno de atenuación por apantallamiento, lo que limita el alcance nominal de la tecnología LoRa. Una optimización inmediata de las prestaciones de la red, tanto en distancia efectiva como en tasa de error de bit (BER), se lograría mediante el despliegue de los nodos en el exterior de la plataforma naval. La instalación de las antenas en un punto elevado, como el palo de señales o el puente de mando, garantizaría una Línea de Visión (LoS) despejada, minimizando las reflexiones y la absorción de la señal por el casco de la embarcación. Todo esto se propone en detalle en el Anexo IV: Propuesta de instalación en las lanchas de instrucción.

También debe destacarse la aportación del módulo cartográfico y de la gestión de posiciones, que permite complementar la mensajería con una representación espacial de la red. En un entorno naval, donde la posición relativa de las unidades es parte esencial de la coordinación, esta funcionalidad añade un valor operativo claro y mejora la capacidad del sistema como herramienta de apoyo a ejercicios de navegación y maniobra.

Desde una perspectiva formativa, el trabajo aporta un instrumento que permite introducir a los alumnos en conceptos clave del mando y control naval sin necesidad de recurrir a sistemas clasificados ni a infraestructuras complejas. La herramienta desarrollada permite trabajar con la idea de red táctica distribuida, con procedimientos básicos de organización de mensajes, con coordinación entre unidades y con una primera aproximación a la mensajería estructurada. En este sentido, el sistema no solo resuelve una necesidad técnica, sino que contribuye directamente al adiestramiento de los futuros oficiales.

Finalmente, una de las aportaciones más significativas del trabajo es demostrar que es posible construir una herramienta de coordinación táctica útil, de coste relativamente reducido y de despliegue sencillo, apoyándose en hardware comercial, software abierto y una red autónoma sin infraestructura externa. Esta combinación de simplicidad, funcionalidad y valor formativo constituye probablemente la principal aportación global del sistema propuesto.

6.3 Líneas de evolución futura del sistema

Tras el desarrollo y validación del sistema propuesto, pueden plantearse varias líneas de evolución futura orientadas a ampliar sus capacidades y a consolidar su utilidad dentro del ámbito naval y de instrucción:

- Mejora y ampliación de la herramienta software, integrando de forma más madura funcionalidades ya iniciadas en este trabajo, como la mensajería estructurada, la gestión de nodos y usuarios, la representación cartográfica, la robustez de la mensajería y la explotación posterior de la información generada en los ejercicios. Continuidad del proyecto como desarrollo abierto, aprovechando la disponibilidad pública del código fuente para facilitar futuras mejoras, revisiones y ampliaciones por parte de otros trabajos o desarrollos posteriores.
- Instalación fija y robustecida en las lanchas de instrucción, como evolución del prototipo actual hacia una solución embarcada más estable, protegida y permanentemente disponible. Esta línea de evolución permitiría mejorar la integración física del sistema en las embarcaciones y reforzar su utilidad práctica en el entorno de instrucción. La propuesta

general de instalación se describe en el Anexo IV: Propuesta de instalación en las lanchas de instrucción.

- Ampliación del uso del sistema a otros contextos tácticos ligeros, en particular a ejercicios y actividades de la Infantería de Marina, donde una red autónoma, ligera y sin dependencia de infraestructura externa también podría aportar valor para coordinación básica, intercambio de posiciones y comunicaciones locales.
- Realización de nuevas campañas de pruebas y validación, con más nodos, mayores separaciones entre unidades y escenarios de tráfico más exigentes, con el fin de caracterizar mejor los límites prácticos del sistema y optimizar su configuración.
- Evolución hacia una herramienta más completa de apoyo al adiestramiento, incorporando funcionalidades como registro de eventos, reconstrucción de maniobras, análisis posterior de ejercicios o apoyo a la evaluación de actividades de navegación y coordinación entre unidades.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Archivo: Obama and Biden await updates on bin Laden.jpg - Wikipedia, la enciclopedia libre». Accedido: 9 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Obama_and_Biden_await_updates_on_bin_Laden.jpg
- [2] Estado Mayor de la Armada, «Organización de las comunicaciones navales ACP 121 ESP NAVY SUPP (B)». 2018.
- [3] Estado Mayor de la Armada, «Organización de las comunicaciones navales ACP 176 ESP NAVY SUPP-1 (B)». 2018.
- [4] L. F. Calviño García, «Los CIS a bordo de los buques de la Armada en 2025», *Revista General de Marina*, 2020.
- [5] J. Martínez Lafuente, «La evolución de las comunicaciones HF en la Armada», *Revista General de Marina*, 2024.
- [6] Estado Mayor de la Armada, «Plan 1/2024 del Almirante Segundo Jefe del Estado Mayor de la Armada sobre capacidades CIS/TIC para la Armada 2024-2029». 2024.
- [7] R. A. Suanzes y R. N. López, «Diseño e implementación de una red de mando y control para la Armada basada en Meshtastic», 2024.
- [8] R. D. InfoDefensa, «La Armada invertirá más de dos millones en dos embarcaciones auxiliares para la Escuela Naval Militar de Marín», Infodefensa. Accedido: 9 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.infodefensa.com/texto-diario/mostrar/5543057/armada-invertira-millones-euros-embarcaciones-auxiliares-tren-naval-marin>
- [9] «Introduction | Meshtastic». Accedido: 27 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://meshtastic.org/docs/introduction/>
- [10] «Meshtastic - Aplicaciones en Google Play». Accedido: 9 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://play.google.com/store/apps/details/Meshtastic?id=com.geeksville.mesh&hl=es>
- [11] N.A.M Rodger, *The Command of the Ocean*. Penguin, 2004.

- [12] «Máquina De Telégrafo Morse Vintage Obsoleta Aislada Declinación Retro Oxidada PNG ,dibujos Junta, Detallado, Telegrama PNG Imagen para Descarga Gratuita», Pngtree. Accedido: 9 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://es.pngtree.com/freepng/isolated-obsolete-vintage-morse-telegraph-machine-decline-retro-rusty_17848725.html
- [13] S. Hong, «Wireless: From Marconi's Black-Box to the Audion». MIT Press, 2001.
- [14] B. Tuchman, «The Zimmermann Telegram». 1958.
- [15] G. Cruz, «Comunicaciones de alta frecuencia», *Revista Española de Defensa*, 2023.
- [16] «Space Environment Report 2023 - Figure 1». Accedido: 9 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2023/08/Space_Environment_Report_2023_-_Figure_1
- [17] M. Moreno Mena en, «La Armada despliega todas las fragatas F-100 en distintos escenarios: de los ejercicios de la OTAN en EEUU a la defensa de España», infobae. Accedido: 9 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.infobae.com/espana/2026/02/07/la-armada-despliega-todas-las-fragatas-f-100-en-distintos-escenarios-de-los-ejercicios-de-la-otan-en-eeuu-a-la-defensa-de-espana/>
- [18] U. Raza et al., «Low Power Wide Area Networks: An Overview». IEEE Communications Surveys & Tutorials., 2016.
- [19] Semtech Corporation, «LoRa and LoRaWAN». 2024.
- [20] «LoRaWAN Architecture», The Things Network. Accedido: 3 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/architecture/>
- [21] E. Gonçalo, «Long-Range Wide Area Network Intrusion Detection at the Edge». MDPI, Journal of Cybersecurity and Privacy, 2024.
- [22] «Actility Red Sea Solution that Scales.» LoRa Alliance, 2022.
- [23] «Villoc Asset Tracking Using LoRaWAN». LoRa Alliance, 2021.
- [24] «HERE partners with LoRaWAN leader Actility to locate assets in indoor and outdoor environments». Accedido: 2 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.here.com/about/press-releases/2018-16-07>
- [25] «Smart Badge», Abeeway. Accedido: 9 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.abeway.com/smart-badge/>
- [26] Technical Committee Report, «LoRaWAN Deployment Guidelines». 2020.
- [27] «Smart Agriculture». Accedido: 2 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://resources.lora-alliance.org/smart-agriculture>

- [28] F. Adelantado y X. Vilajosana, «Understanding the Limits of LoRaWAN», *IEEE Communications Magazine*, 2017.
- [29] «Meshtastic Encryption | Meshtastic». Accedido: 2 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://meshtastic.org/docs/overview/encryption/>
- [30] C. Berbell, «Cabo de la Armada condenado a 6 meses de prisión por insulto a un superior», Conflegal. Accedido: 9 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://conflegal.com/20231126-cabo-de-la-armada-condenado-a-6-meses-de-prision-por-insulto-a-un-superior/>
- [31] R. López Lucendo, «Revolución tecnológica y desafíos estratégicos: el impacto de las tecnologías emergentes en las comunicaciones militares.», *Revista General de Marina*, 2025.
- [32] M. Abalo Cores, «Las comunicaciones y sistemas de información de la Armada. Hacia dónde vamos.», *Revista General de Marina*, 2013.
- [33] Defensa.com, «La Alvaro de Bazán finaliza operativo con portaviones US Gerald R. Ford - Noticias Defensa España», Defensa.com. Accedido: 9 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.defensa.com/espana/fragata-alvaro-bazan-f-101-finaliza-estancia-puerto-junto-grupo>
- [34] «Mesh Broadcast Algorithm | Meshtastic». Accedido: 2 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://meshtastic.org/docs/overview/mesh-algo/>
- [35] «LoRa Configuration | Meshtastic». Accedido: 5 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://meshtastic.org/docs/configuration/radio/lora/>
- [36] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella, y M. Zorzi, «Long-Range Communications in Unlicensed Bands: the Rising Stars in the IoT and Smart City Scenarios». *IEEE Wireless Communications*, 2016.
- [37] Aloÿs Augustin, Jiazi Yi, Thomas Clausen, y William Mark Townsley, «A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things». *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017.
- [38] «LoRa uses a chirp spread spectrum modulation technique. The figure also...», ResearchGate. Accedido: 9 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/LoRa-uses-a-chirp-spread-spectrum-modulation-technique-The-figure-also-shows-that-LoRa_fig3_332151302
- [39] Semtech Corporation, «LoRa Modulation Basics». 2015.
- [40] «Is LongFast Holding Your Mesh Back? Better LoRa Presets for Bigger Meshtastic Networks | Meshtastic». Accedido: 5 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://meshtastic.org/blog/why-your-mesh-should-switch-from-longfast/>
- [41] «Radio Settings | Meshtastic». Accedido: 9 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://meshtastic.org/docs/overview/radio-settings/>

- [42] *EN 300 220 «Short Range Devices (SRD) operating in the 25 MHz to 1 000 MHz frequency range»*, 2025.
- [43] «Why Meshtastic Uses Managed Flood Routing | Meshtastic». Accedido: 5 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://meshtastic.org/blog/why-meshtastic-uses-managed-flood-routing/>
- [44] «Device Configuration | Meshtastic». Accedido: 5 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://meshtastic.org/docs/configuration/radio/device/>
- [45] «Configuration Tips | Meshtastic». Accedido: 5 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://meshtastic.org/docs/configuration/tips/>
- [46] «Known Limitations and Future Plans of Meshtastic's Encryption | Meshtastic». Accedido: 5 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://meshtastic.org/docs/about/overview/encryption/limitations/>

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS Y AMBIENTALES

El desarrollo de una herramienta de mensajería táctica basada en LoRa-Meshtastic no solo tiene interés desde el punto de vista técnico, sino que también presenta determinadas implicaciones sociales, económicas y ambientales. Aunque se trata de un sistema concebido para un entorno de instrucción, su uso tiene efectos positivos relacionados con la seguridad, el coste de despliegue y el impacto asociado a la tecnología empleada.

El sistema desarrollado puede aportar una mejora en la seguridad y coordinación entre las unidades participantes, ya que permite mantener la comunicación incluso sin cobertura móvil ni acceso a Internet. En el contexto de las lanchas de instrucción, esto facilita la transmisión de órdenes, avisos y posiciones, lo que contribuye a aumentar la seguridad de la tripulación y a mejorar la organización de los ejercicios. Además, el uso de canales protegidos ayuda a mantener la privacidad y la confidencialidad básica de la información intercambiada.

Desde el punto de vista económico, la solución desarrollada presenta un coste relativamente reducido, ya que se basa en nodos compactos, hardware comercial y software abierto. Además, no requiere infraestructura adicional como estaciones base, servidores externos ni servicios de telecomunicaciones, lo que reduce tanto el coste de despliegue como el de mantenimiento. Esto la convierte en una alternativa accesible para entornos de instrucción o experimentación.

En el plano ambiental, la tecnología LoRa se caracteriza por trabajar con muy baja potencia y bajo consumo energético, lo que reduce su impacto en comparación con otros sistemas de comunicación de mayor capacidad. Asimismo, al no requerir infraestructuras externas complejas, la solución propuesta mantiene una huella material y energética relativamente reducida. Aunque todo dispositivo electrónico genera cierto impacto ambiental, en este caso puede considerarse contenido y moderado.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El sistema desarrollado también puede valorarse desde una perspectiva ética y social, especialmente en lo relativo a la privacidad, la seguridad de la información y el uso responsable de la tecnología. Aunque se trata de una herramienta de adiestramiento y no de un sistema operativo real, conviene considerar brevemente estos aspectos para situar correctamente el alcance de la propuesta.

Una primera cuestión relevante es que la red funciona de forma autónoma y cerrada, sin necesidad de acceso a Internet ni dependencia de servicios externos. Esto reduce considerablemente la exposición de la información y minimiza algunos de los riesgos habituales asociados al uso de redes públicas, como la dependencia de terceros o la circulación de datos por infraestructuras ajenas al usuario. Desde este punto de vista, el sistema presenta unas implicaciones éticas reducidas y controladas.

Además, la información que circula dentro de la red se transmite mediante canales cifrados, lo que proporciona un nivel básico de seguridad y confidencialidad adecuado para el contexto de adiestramiento. Esto permite que la comunicación entre unidades no quede expuesta libremente a dispositivos externos, reforzando así la protección de la información intercambiada.

Desde el punto de vista social, la herramienta desarrollada tiene también una dimensión positiva, ya que contribuye al adiestramiento de los alumnos en conceptos relacionados con la coordinación entre unidades, la organización de la información y la disciplina de las comunicaciones. En este sentido, la tecnología se utiliza con una finalidad claramente formativa y orientada a mejorar la seguridad y la preparación de los futuros oficiales.

En conjunto, puede considerarse que el sistema desarrollado presenta unas implicaciones éticas y sociales limitadas, razonables y adecuadas al entorno académico para el que ha sido concebido, especialmente por su funcionamiento autónomo, su uso de canales protegidos y su finalidad docente.

ANEXO III: MANUAL DE USUARIO DEL PROGRAMA

Descripción general de la aplicación

Este programa es un sistema de comunicaciones diseñado para coordinar múltiples embarcaciones (lanchas) mediante radio LoRa, una tecnología que permite enviar mensajes a larga distancia sin necesidad de cobertura móvil ni internet. El sistema utiliza dispositivos Meshtastic conectados a cada ordenador para crear una red de comunicación autónoma entre las lanchas.

Antes de abrir el programa

El programa está hecho para que se pueda abrir desde cualquier ordenador sin necesidad de que tenga instalado Python. Se debe abrir siempre desde la carpeta dist (Figura A3-1), abriendo el archivo TFG_Mensajería.exe.

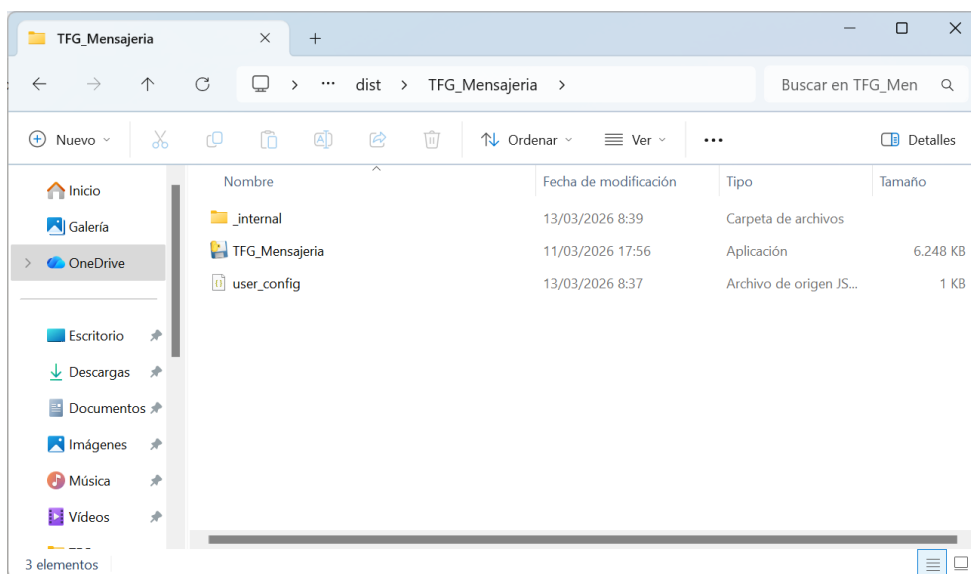


Figura A3-1 Carpeta desde la que abrir el programa.

Inicio del Programa

Al abrir la aplicación, se presentan dos pantallas de configuración:

1. Selección de Lancha (Figura A3-2): Debes elegir qué lancha eres (BARRUTIA, CHEREGUINI, RULL, SALAS, HERRERO o GODÍNEZ). Esto identifica el nodo en la red y determina qué mensajes te corresponden.

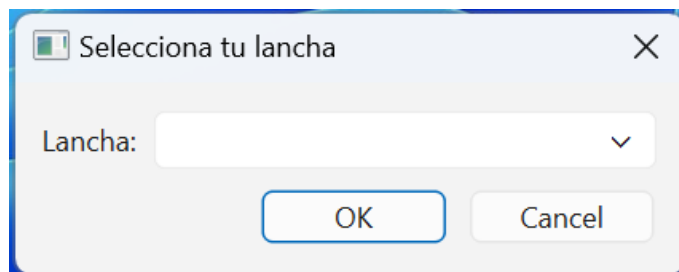


Figura A3-2 Selección de lancha desde la que se opera.

2. Selección de Puerto Serie (Figura A3-3): Debes seleccionar el puerto COM donde está conectado el dispositivo Meshtastic. El programa recuerda el último puerto usado para facilitar reconexiones futuras. Es importante saber que normalmente el puerto al que está conectado el nodo pondrá un mensaje como “Enhanced serial”. Si no se sabe qué puerto es, es tan simple como ver cuál aparece al conectar y darle a “Refrescar”.

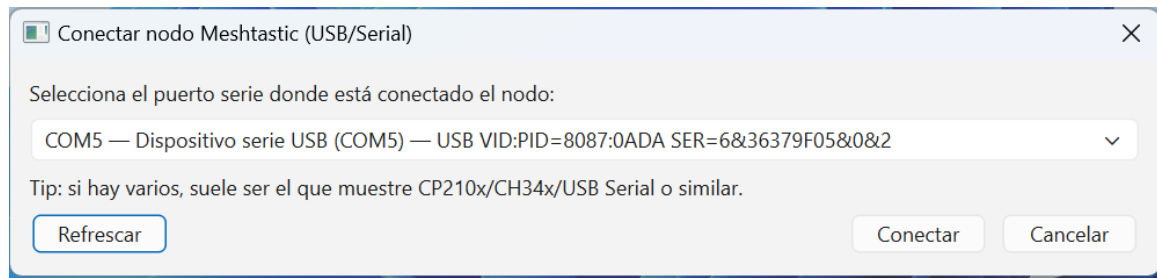


Figura A3-3 Selección del puerto al que está conectado el nodo.

Una vez configurado, verás la ventana principal con tres pestañas: SACOMAR, CHAT y MAPA.

Barra de Estado de Conexión

En la parte superior de la ventana hay una barra que muestra el estado de conexión (Figura A3-4):

- ✓ Verde "Conectado": El dispositivo Meshtastic está funcionando correctamente.
- ✗ Rojo "Desconectado": Se ha perdido la conexión con el dispositivo.
- ⚠ Naranja "Error": Ha ocurrido algún problema de comunicación.

Cuando aparece el botón "Reconectar", puedes pulsarlo para seleccionar un nuevo puerto y restablecer la conexión sin cerrar el programa.

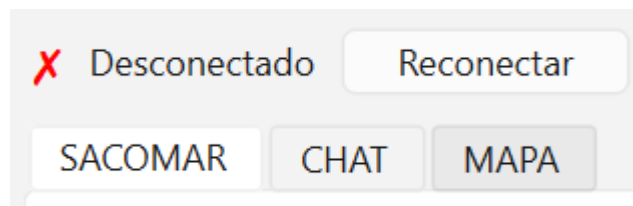


Figura A3-4 Estado de conexión del nodo.

Pestaña SACOMAR

SACOMAR es el sistema de mensajería formal utilizado en comunicaciones navales. Esta pestaña (Figura A3-5) permite redactar, enviar y recibir mensajes con formato militar estandarizado.

Subpestañas de SACOMAR:

- Bandeja de entrada: Aquí llegan los mensajes SACOMAR que otros nodos te envían. Cada mensaje muestra el asunto, remitente, fecha y prioridad.
- Bandeja de salida: Contiene los mensajes que has enviado. Puedes ver el estado de entrega y reenviar mensajes si es necesario.
- Borradores: Mensajes que has empezado a redactar, pero no has enviado. Puedes editarlos y completarlos más tarde.
- Pendientes: Mensajes listos para enviar que has decidido guardar temporalmente antes de transmitir.
- Archivados: Mensajes antiguos que has decidido conservar, pero sacar de las bandejas principales.

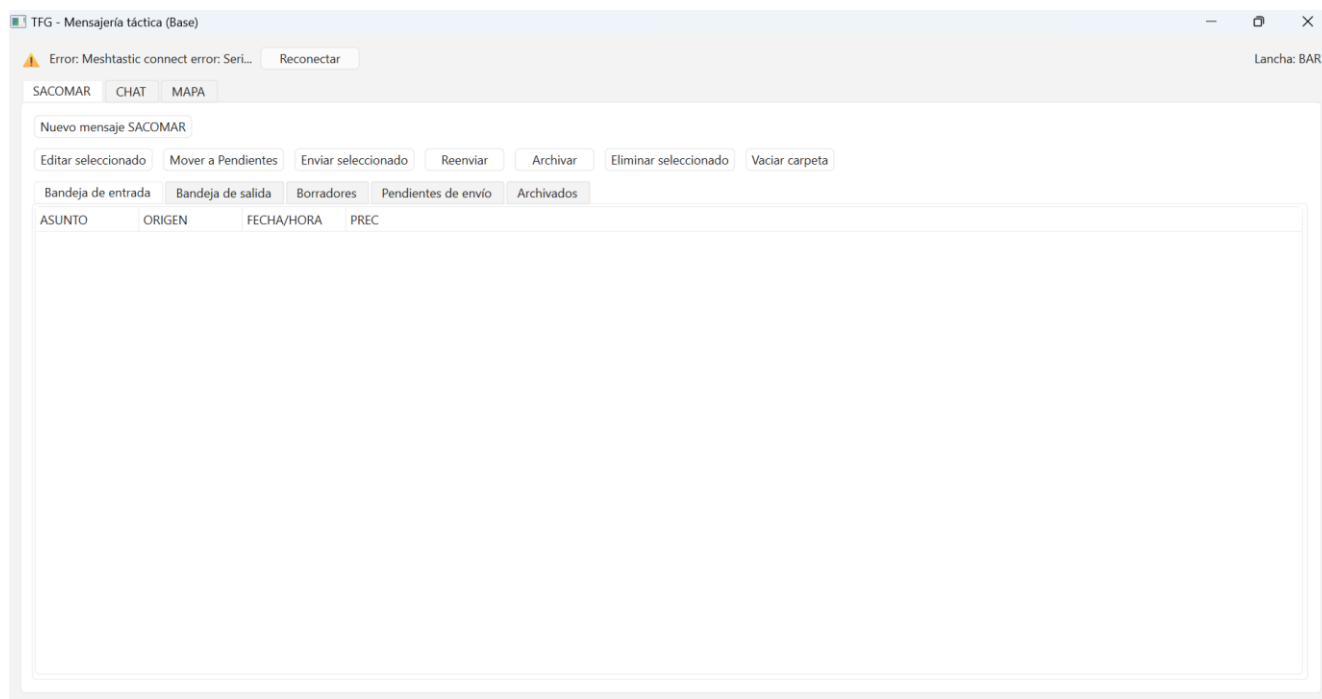


Figura A3-5 Pestaña SACOMAR.

Crear un Nuevo Mensaje SACOMAR

Al pulsar "Nuevo mensaje SACOMAR" se abre el editor con los siguientes campos (Figura A3-6):

- **PRECEDENCIA:** Indica la urgencia del mensaje.
 - R (Rutina): Mensaje normal sin urgencia especial.
 - P (Prioridad): Mensaje importante que requiere atención preferente.
 - O (Inmediato): Mensaje urgente que requiere acción rápida.
 - Z (Flash/Emergencia): Máxima urgencia, situación crítica.
- **DE (FROM):** El identificador como remitente. Escrito automáticamente.
- **PARA (TO):** Destinatarios principales del mensaje. Puedes añadir hasta 7 destinatarios usando los códigos de tres letras (BAR, CHE, RUL, SAL, HER, GOD).
- **INFO:** Destinatarios que deben recibir el mensaje como información, pero no son los destinatarios principales.
- **ASUNTO (ASTO):** Breve descripción del contenido del mensaje.
- **MENSAJE:** El cuerpo del mensaje con la información a transmitir.
- **CLASIFICACIÓN:** Nivel de confidencialidad del mensaje (USO OFICIAL DIDÁCTICO, DIFUSIÓN LIMITADA DIDÁCTICO, etc.).
- **SIC:** Códigos de tres letras para categorizar el mensaje.
- **PERSONA AUTORIZADA:** Nombre de quien autoriza el envío del mensaje.

Figura A3-6 Ventana para crear/editar un mensaje SACOMAR.

Al pulsar "LISTO" se genera la vista previa del mensaje en formato SACOMAR oficial (Figura A3-7). Desde ahí puedes:

- Enviar: Transmite el mensaje inmediatamente.
- Guardar en Pendientes: Lo guarda para enviarlo más tarde.
- Guardar en Borradores: Lo guarda como borrador incompleto.
- Volver a editar: Regresa al formulario para hacer cambios.

Figura A3-7 Vista previa generada del mensaje antes de enviarlo o dejar como pendiente/borrador.

IMPORTANTE A TENER EN CUENTA AL ENVIAR UN MENSAJE SACOMAR:

Los mensajes SACOMAR suelen ser más largos que los mensajes normales mandados por CHAT. Debido al protocolo de Meshtastic, los mensajes SACOMAR normalmente se deberán segmentar en la transmisión y reensamblar en la recepción. Para asegurar que llegan este tipo de mensajes, cada segmento se envía varias veces. Esto puede causar dos cosas: que el programa vaya lento o no responda mientras dure el envío (en torno a 2 minutos); puede que no se envíen/reciban correctamente los mensajes de CHAT a la vez que se están mandando los segmentos de SACOMAR. En todo caso, una vez han transcurrido 2 minutos, lo ideal sería mandar un mensaje por CHAT a los destinatarios del mensaje SACOMAR para que confirmen que ha llegado este. En caso negativo, se dispone de la opción de Reenviar el mensaje para paliar estas situaciones.

Pestaña CHAT

El chat permite comunicación informal y rápida entre las lanchas, similar a una aplicación de mensajería instantánea (Figura A3-8).

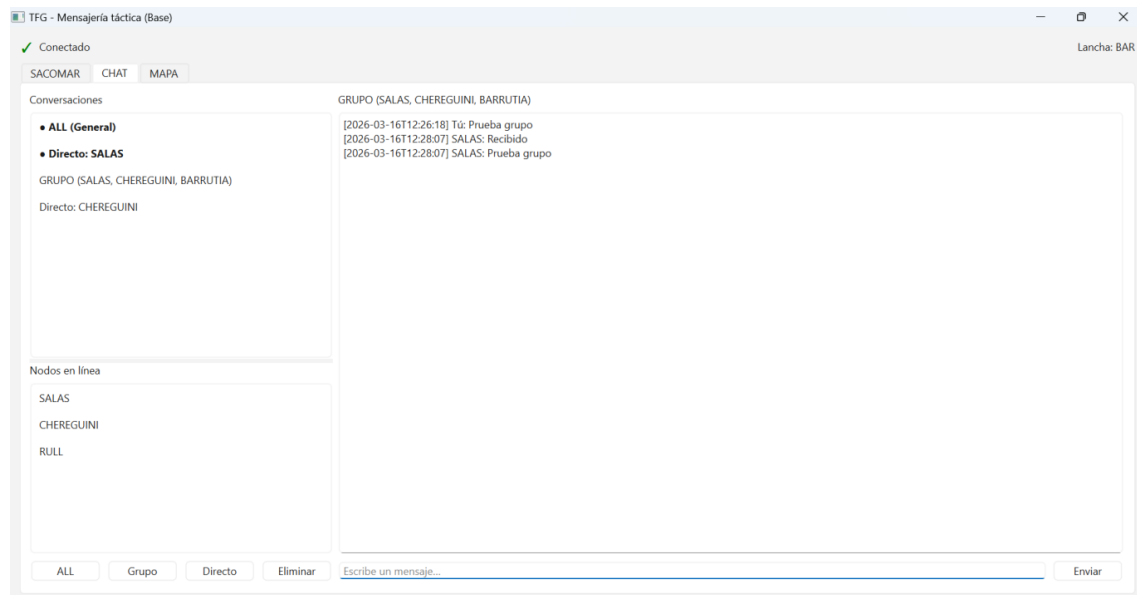


Figura A3-8 Pestaña CHAT.

- Panel Izquierdo:
 - Conversaciones: Lista de todas las conversaciones activas (Figura A3-9). Un punto negro (●) indica mensajes no leídos. Las conversaciones aparecen ordenadas por actividad reciente.

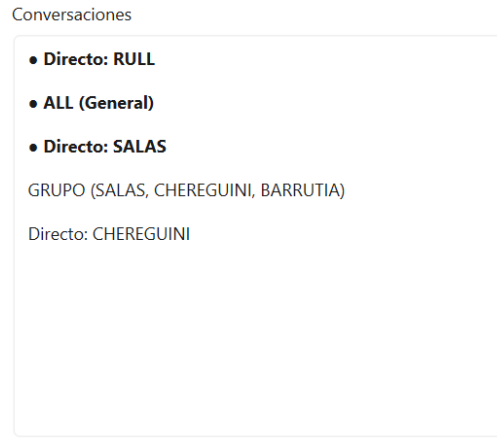


Figura A3-9 Lista de conversaciones en el CHAT.

- Nodos en línea: Muestra las lanchas que están actualmente conectadas a la red (Figura A3-10). Solo aparecen los nodos que han enviado su posición en los últimos 10 minutos. El nodo propio no aparece en esta lista.

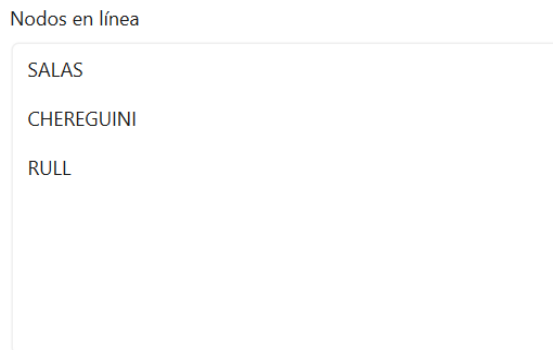


Figura A3-10 Lista de nodos en línea.

- Tipos de Conversación:
 - ALL (General): Canal público donde todos los mensajes son visibles para todas las lanchas. Útil para comunicaciones generales y coordinación grupal.
 - Grupo: Conversación privada entre varias lanchas seleccionadas. Solo los miembros del grupo ven los mensajes. El nombre del grupo muestra los participantes, por ejemplo: "GRUPO (CHEREGUINI, BARRUTIA, RULL)".
 - Directo: Conversación privada entre dos lanchas. Los mensajes solo son visibles para el remitente y el destinatario.
- Crear Conversaciones:
 - Botón "ALL": Abre o crea la conversación general.
 - Botón "Grupo": Permite seleccionar varias lanchas online para crear un grupo.
 - Botón "Directo": Permite seleccionar una lancha para chat privado.
 - Botón "Eliminar": Borra la conversación seleccionada.

También puedes hacer doble clic en cualquier nodo de la lista "Nodos en línea" para abrir directamente un chat privado con esa lancha.

- Panel Derecho:

Muestra el historial de mensajes de la conversación seleccionada. Cada mensaje indica la hora y el remitente. Tus propios mensajes aparecen marcados como "Tú". En la parte inferior hay un campo de texto para escribir y un botón "Enviar" para transmitir el mensaje.

Pestaña MAPA

El mapa muestra la posición geográfica de todas las lanchas en tiempo real sobre cartografía offline de la zona de operaciones (Figura A3-11).

Controles del Mapa:

- Botones + / -: Aumentan o reducen el nivel de zoom.
- Botón "Ajustar a nodos": Centra y ajusta el zoom para mostrar todas las lanchas visibles.
- Botón "Centrar en Galicia": Devuelve la vista a la posición predeterminada.
- Rueda del ratón: Permite hacer zoom.
- Arrastrar con clic izquierdo: Desplaza el mapa.
- Doble clic: Centra el mapa en ese punto y hace zoom.

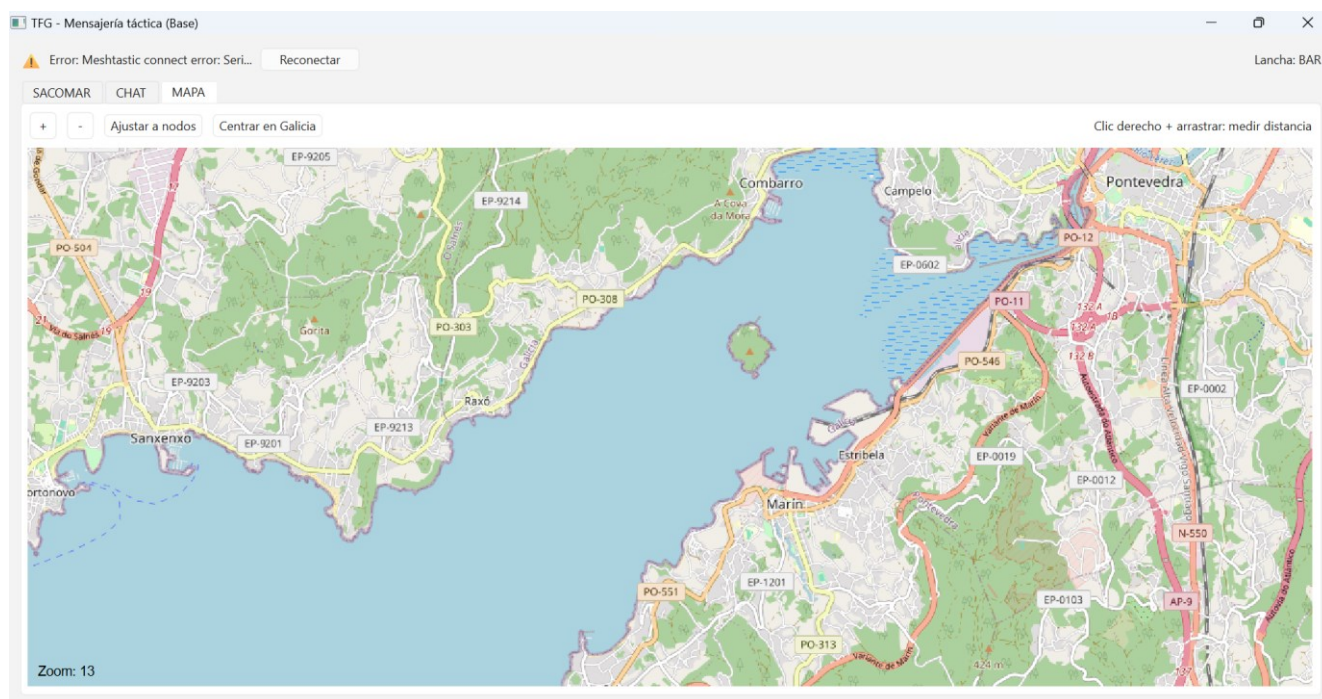


Figura A3-11 Pestaña MAPA.

Visualización de Nodos:

- Círculo azul: La propia lancha.
- Círculos naranjas: Las demás lanchas.

Cada nodo muestra su nombre debajo del círculo.

Información de un Nodo:

Al hacer clic en cualquier nodo se abre una ventana con información detallada (Figura A3-12):

- Nombre de la lancha.
- Coordenadas GPS.
- Velocidad actual en nudos.
- Distancia desde la posición de la lancha propia en millas náuticas (o yardas si está muy cerca).
- Demora (dirección) desde la posición de la lancha propia en grados.

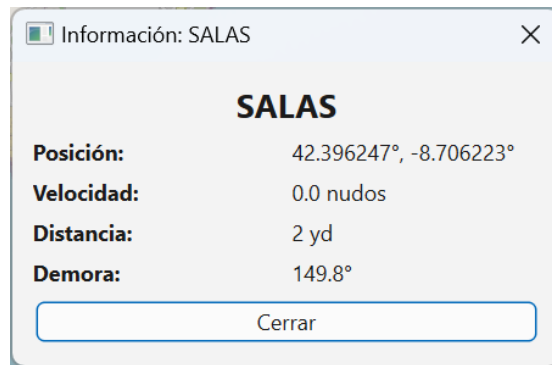


Figura A3-12 Pestaña de información sobre otra unidad.

Información del Cursor:

En la esquina superior izquierda del mapa aparece constantemente la demora y distancia desde la propia lancha hasta donde está apuntando el ratón (Figura A3-13). Esta información se actualiza en tiempo real mientras mueves el cursor.

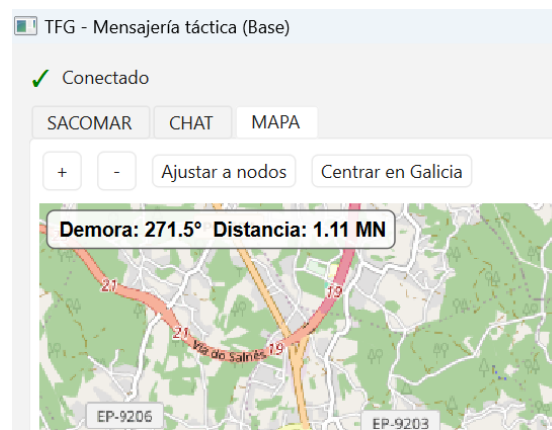


Figura A3-13 Información asociada a la posición del cursor desde la unidad propia.

Herramienta de Medición:

Manteniendo pulsado el clic derecho y arrastrando, puedes trazar una línea entre dos puntos (Figura A3-14). El mapa muestra la distancia de esa línea en millas náuticas. Al soltar el botón, la línea desaparece. Esto es útil para medir distancias entre puntos arbitrarios del mapa.

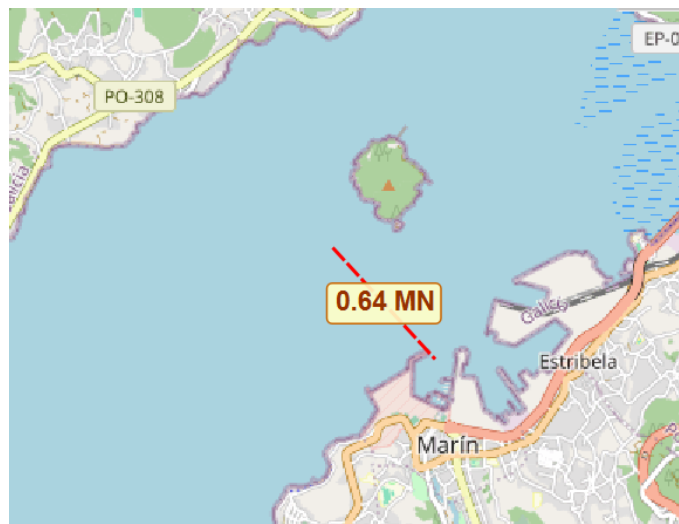


Figura A3-14 Medición de distancias en el MAPA.

Sistema de Posiciones

El programa envía automáticamente la posición GPS del nodo propio a todas las demás lanchas cada 2 minutos. Igualmente, recibe las posiciones de las demás lanchas y las actualiza en el mapa.

Si el dispositivo propio no tiene señal GPS, el sistema envía un mensaje indicando que está online, pero sin posición fija. Esto permite que aparezca en la lista de nodos en línea, aunque no se pueda mostrar su ubicación en el mapa.

Un nodo se considera "offline" y desaparece de las listas cuando lleva más de 10 minutos sin enviar su posición.

Almacenamiento de Datos

Todos los mensajes (tanto SACOMAR como Chat) se guardan permanentemente en bases de datos locales. Los mensajes no se borran automáticamente, permanecen almacenados hasta que decidas eliminarlos manualmente.

Los nombres de los grupos y conversaciones también se guardan, por lo que al cerrar y reabrir el programa, todo aparece exactamente como lo dejaste.

Resumen de Atajos y Acciones Rápidas en Tabla A3-1

Acción	Cómo hacerlo
Abrir chat directo	Doble clic en un nodo online
Hacer zoom en el mapa	Rueda del ratón
Mover el mapa	Arrastrar con clic izquierdo
Medir distancia	Clic derecho + arrastrar
Ver información de una lancha	Clic en su círculo en el mapa
Enviar mensaje de chat	Escribir + Enter
Reconectar dispositivo	Botón "Reconectar" en la barra superior

Tabla A3-1 Resumen de atajos y acciones rápidas.

ANEXO IV: PROPUESTA DE INSTALACIÓN EN LAS LANCHAS DE INSTRUCCIÓN

Como posible evolución del sistema desarrollado, se plantea una solución de instalación de los nodos LoRa-Meshtastic más adecuada para su uso continuado a bordo de las lanchas de instrucción. La idea inicial consistía en dejar el nodo en el interior de la embarcación y situar únicamente la antena en el exterior mediante un pasacables, de forma similar al resto de antenas ya presentes en la lancha. Sin embargo, a la vista de las pruebas realizadas, se ha comprobado que la antena de mayor tamaño empleada en estos ensayos no constituye una solución adecuada en su estado actual, por lo que se considera más razonable orientar la evolución del sistema hacia una instalación exterior protegida del propio nodo.

En este sentido, se propone alojar cada nodo en una caja estanca de exteriores, como la mostrada en la Figura A4-1, que permita proteger la electrónica frente a humedad, salinidad, vibraciones y exposición ambiental. Esta solución permitiría instalar el conjunto en una zona exterior de la lancha, evitando la necesidad de mantener el nodo en el interior y mejorando previsiblemente las condiciones de propagación radio al reducir el apantallamiento producido por la propia estructura de la embarcación. Además, la caja proporciona una base física más robusta y realista de cara a un posible uso continuado del sistema.



Figura A4-1 Propuesta de encapsulado exterior del nodo LoRa-Meshtastic mediante caja estanca, orientada a una futura instalación embarcada en las lanchas de instrucción.

La instalación requeriría un pasacables estanco destinado a la conexión USB entre el nodo y el ordenador embarcado. Esto implica el uso de cableado USB de mayor longitud que el empleado actualmente en las pruebas, de modo que el dispositivo pueda permanecer instalado en el exterior mientras el ordenador se mantiene protegido en el interior de la lancha. En consecuencia, la evolución hacia esta arquitectura exige no solo la adecuación física del nodo, sino también una pequeña adaptación del cableado y de la disposición interna de los equipos.

Desde el punto de vista operativo, esta propuesta permitiría contar con una solución más cercana a una instalación semipermanente, en la que el nodo quedase integrado en la embarcación de forma más estable y protegida. A su vez, ello facilitaría que el sistema estuviese disponible de manera inmediata para ejercicios y prácticas, sin depender en cada ocasión de un montaje provisional.

Por otro lado, también se considera conveniente que la Escuela disponga de ordenadores portátiles de mayores prestaciones que los actualmente disponibles. Aunque la aplicación desarrollada funciona con los medios existentes, una mejora en la capacidad de los equipos permitiría una explotación más cómoda y fluida del sistema, especialmente cuando se utilizan simultáneamente la mensajería, la representación cartográfica y la gestión de varias conversaciones. De este modo, la instalación futura del sistema no debería entenderse únicamente como una cuestión de nodo y antena, sino como una mejora conjunta del conjunto embarcado formado por nodo, cableado, protección exterior y terminal de usuario.

En conjunto, esta propuesta permitiría evolucionar desde el prototipo actual hacia una solución más robusta, protegida y mejor adaptada al entorno marítimo real de las lanchas de instrucción, manteniendo la filosofía de bajo coste, autonomía e independencia de infraestructura externa que caracteriza al sistema desarrollado en este trabajo.

ANEXO V: DECLARACIÓN DE USO DE HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL GENERATIVA

En la realización del presente Trabajo Fin de Grado se han empleado herramientas de Inteligencia Artificial Generativa como apoyo en tareas concretas de desarrollo e ilustración del sistema propuesto. Su uso se ha limitado principalmente a dos ámbitos: por un lado, la asistencia en la generación y revisión de código para la implementación de la herramienta software; y, por otro, la generación de determinadas figuras esquemáticas incluidas en la memoria. En todos los casos, los resultados proporcionados por estas herramientas han sido revisados, adaptados y validados críticamente antes de su incorporación al trabajo.

1. Uso de IA en el desarrollo del software

En el desarrollo del programa se utilizó la herramienta Claude como apoyo iterativo a la implementación software. Su uso no se limitó a una única consulta o a la generación completa del código en una sola interacción, sino que se empleó de forma progresiva a lo largo del desarrollo para proponer estructuras de código, corregir errores, depurar comportamientos no deseados y plantear soluciones técnicas a problemas concretos que iban apareciendo durante las pruebas.

La interacción con la herramienta se realizó mediante múltiples consultas encadenadas, normalmente centradas en una funcionalidad específica del programa o en una incidencia detectada durante su uso. Entre los aspectos en los que se recibió apoyo destacan la gestión de nodos online, la actualización de posiciones, la lógica de mensajería estructurada, la segmentación y reensamblado de mensajes largos, la persistencia de datos en bases de datos locales, la representación cartográfica y la mejora de la interfaz de usuario.

Por tanto, la IA se utilizó como una herramienta de asistencia técnica dentro de un proceso de desarrollo iterativo, en el que el autor iba definiendo las necesidades funcionales del sistema, probando el comportamiento del programa y solicitando propuestas de corrección o ampliación sobre problemas concretos. El resultado final no procede de una única generación automática, sino de un proceso continuado de desarrollo, prueba, revisión y adaptación.

- Ejemplos de *prompts* empleados en las consultas:
 - “Estoy recibiendo posiciones GPS obsoletas de nodos que ya no están conectados. Dime cómo modificar la lógica del programa para evitar nodos fantasmas y limpiar automáticamente las posiciones antiguas.”
 - “El sistema pierde mensajes cuando varios nodos transmiten a la vez. Propón una estrategia de ACK, reintentos y temporización para mejorar la robustez del envío.”
 - “El programa no muestra correctamente los nodos en línea. Dime qué correcciones debería hacer en el código para que todos los nodos conectados aparezcan correctamente en la interfaz y para que la posición de cada nodo se actualice automáticamente cada 2 minutos.”
- Herramienta utilizada: Claude
- Versión: Opus 4.5
- Compañía: Anthropic
- Fecha de uso: durante el mes de febrero de 2026
- Sitio web de la herramienta: <https://claude.ai/>

2. Uso de IA en la generación de figuras

Además del apoyo al desarrollo software, se utilizó ChatGPT para generar varias figuras esquemáticas incluidas en la memoria. Estas imágenes se emplearon únicamente con una finalidad ilustrativa, para representar de forma más clara algunos conceptos explicados en el trabajo. Todas ellas fueron revisadas por el autor antes de su inclusión.

2.1 *Figura 2-3 Línea temporal de la evolución de las comunicaciones (generada con IA)*

- Contenido generado: figura esquemática tipo línea temporal sobre la evolución de las comunicaciones militares y navales.
- Uso dado: ilustrar visualmente el apartado histórico del capítulo 2.
- Prompt empleado: “Genera una línea temporal visual, clara y académica sobre la evolución de las comunicaciones militares y navales, desde las señales ópticas y banderas navales hasta las arquitecturas resilientes híbridas actuales, incluyendo etapas como telégrafo eléctrico, radiotelegrafía inalámbrica, consolidación del HF, SATCOM y redes actuales.”
- Herramienta utilizada: ChatGPT
- Versión: GPT-5.4 Thinking
- Compañía: OpenAI
- Fecha de uso: 15 de febrero de 2026
- Sitio web de la herramienta: <https://chatgpt.com/>

2.2 *Figura 4-2 Arquitectura funcional del software de mensajería táctica (generada con IA)*

- Contenido generado: esquema de arquitectura funcional del software desarrollado.
- Uso dado: representar de forma resumida la organización interna del sistema software.
- Prompt empleado: “Genera un esquema visual limpio y académico de la arquitectura funcional del software de mensajería táctica, mostrando interfaz gráfica, lógica de gestión de la aplicación, almacenamiento local de datos, comunicación con la red Meshtastic, nodo LoRa y red LoRa-Mesh.”
- Herramienta utilizada: ChatGPT
- Versión: GPT-5.4 Thinking
- Compañía: OpenAI
- Fecha de uso: 19 de febrero de 2026
- Sitio web de la herramienta: <https://chatgpt.com/>

2.3 *Figura 4-3 Esquema de integración entre la aplicación de mensajería táctica, el nodo local LilyGO T-Beam y la red LoRa-Meshtastic (generada con IA).*

- Contenido generado: esquema de integración del sistema completo.
- Uso dado: ilustrar la relación entre usuario, aplicación desarrollada, nodo local y red LoRa-Mesh.
- Prompt empleado: “Genera un esquema visual de integración entre un usuario, una aplicación de mensajería táctica ejecutada en un PC, la conexión USB/puerto serie, un nodo local LilyGO T-Beam, la red LoRa-Meshtastic y el resto de nodos en las lanchas.”
- Herramienta utilizada: ChatGPT
- Versión: GPT-5.4 Thinking
- Compañía: OpenAI
- Fecha de uso: 23 de febrero de 2026
- Sitio web de la herramienta: <https://chatgpt.com/>

2.4 Figura 5-16 Ejemplo de mensaje que se podría consultar desde el dispositivo

- Contenido generado: mensaje de la pantalla OLED.
- Uso dado: no se podía visualizar bien el mensaje de la pantalla OLED, así que gracias a la IA se podía mejorar la claridad del mensaje.
- Prompt empleado: “No se ve bien el mensaje de la pantalla OLED. Edita la imagen adjunta para que en la pantalla se vea claramente el mensaje: Cae 20° a Er y pon rumbo W.”
- Herramienta utilizada: ChatGPT
- Versión: GPT-5.4 Thinking
- Compañía: OpenAI
- Fecha de uso: 27 de febrero de 2026
- Sitio web de la herramienta: <https://chatgpt.com/>

3. Observación final

Las herramientas de IA empleadas en este trabajo se han utilizado como apoyo al proceso de desarrollo y de representación gráfica, pero no como sustitución del análisis técnico ni de la validación crítica por parte del autor. Todo el contenido generado ha sido revisado, adaptado y contrastado antes de su inclusión en la memoria.