



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño e implementación de una red de mando y control para la
Armada basada en Meshtastic*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Ricardo Aneiros Suanzes

DIRECTORES: Rubén Nocelo López

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño e implementación de una red de mando y control para la
Armada basada en Meshtastic*

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

El presente TFG busca, partiendo de la plataforma de código abierto Meshtastic, implantar una red de mando y control para la Armada utilizando la tecnología LoRa; tecnología que permite la comunicación de largo alcance con un consumo muy reducido de energía, utilizando dispositivos de bajo coste y sin la necesidad de una infraestructura de red. El software tendrá una interfaz con un chat táctico para comunicar a las lanchas de instrucción y un mapa con la ubicación GPS de cada nodo.

Para la implementación de la red se realizarán pruebas de alcance, buscando identificar qué configuración de la señal optimiza el uso de la red, teniendo en cuenta tanto el RSSI como la relación señal a ruido. Se medirán los alcances máximos entre nodos, buscando que cubran el área de la Ría de Pontevedra y se comprobará que la red cumple los tres parámetros necesarios para una red de mando y control: Seguridad, Rapidez y confianza.

Finalmente, se concluirá que la red es apta para la aplicación como red de comunicaciones de emergencia en el caso de sufrir pérdidas de satélites y se plantea la necesidad futura de buscar mejores equipos de transmisión y desarrollar softwares específicos para la Armada.

PALABRAS CLAVE

LoRa, Mando y control, Comunicaciones, Meshtastic, GPS.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi director del trabajo, Don Rubén Nocelo López por el esfuerzo que ha realizado durante estos meses de trabajo y por la disposición a ayudar en todo momento, por los conocimientos que me ha aportado, por la visión que ha dado en cada momento y por la confianza que ha depositado en mí desde que le planteé la idea de este proyecto.

También quería agradecer a mi familia, en especial a mis padres por la ayuda que me han dado desde el primer momento y por los regalos que me han inculcado, los más valiosos que nadie me podría dar: La educación, los valores y la Fe.

A mis abuelos, por darme siempre un ejemplo de vida y a mi abuela Pepa, por el cariño que me tiene y por confiar siempre en mí.

A María, por aguantarme día a día y ayudarme a sacar lo mejor de mí mismo.

Y para acabar, le debo un agradecimiento especial a mi querida Dotación, por acompañarme estos cinco años... y por los que nos quedan.

TABLA DE CONTENIDO

<i>Tabla de contenido</i>	1
<i>Índice de Figuras</i>	3
<i>Índice de Tablas</i>	5
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Introducción.	7
1.2 Objetivos.	8
1.3 Estructura del Trabajo.....	9
2 Estado del arte	11
2.1 Comunicaciones bélicas.	11
2.1.1 Historia de las comunicaciones navales.	11
2.1.2 Las comunicaciones navales en la actualidad.	13
2.1.3 El futuro de las comunicaciones navales.	15
2.2 Posicionamiento de buques.....	16
2.2.1 Un poco de historia.	16
2.2.2 Posicionamiento de buques en la actualidad.....	19
2.3 Tecnologías de LPWAN.	20
2.3.1 Zigbee.	21
2.3.2 Sigfox.....	21
2.3.3 LoRa.	22
2.3.4 NB-IoT.	23
2.4 Meshtastic.....	24
2.4.1 Funcionamiento de Meshtastic.	24
2.4.2 Configuración de la señal en Meshtastic.....	25
2.5 ATAK.....	25
3 LoRa	29
3.1 Características generales de LoRa.	29
3.2 Parámetros de configuración de la señal.	30
3.3 Ciclo de trabajo.	32
3.4 SNR y RSSI.....	32
3.5 BER	33
3.6 LoRaWAN.	35
3.6.1 Topología de LoRaWAN	36
4 Desarrollo del TFG	38
4.1 Descripción de los equipos.	38
4.1.1 Lilygo t-beam Meshtastic.	38
4.1.2 Batería Li-Ion 18650.....	39
4.1.3 Pantalla Oled.....	40
4.1.4 Antena LoRa.....	40
4.2 Configuración inicial de la red.....	41
4.2.1 Configuración de la radio.....	41

4.2.2 Configuración de los módulos.	43
4.2.3 Configuración para las pruebas de alcance.	44
4.2.4 Configuración para el establecimiento de la red de mando y control.	47
5 Resultados	49
5.1 Pruebas de alcance.	49
5.1.1 Prueba de alcance inicial en la pista militar de la Escuela Naval Militar.	49
5.2 Establecimiento de la red de mando y control.	57
6 Conclusiones y líneas futuras	61
6.1 Conclusiones.	61
6.2 Líneas Futuras.	62
7 Bibliografía	63
<i>Anexo I: Implicaciones Sociales, económicas y Ambientales</i>	<i>67</i>
<i>Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales</i>	<i>68</i>
<i>Anexo III: Modificaciones al Firmware original</i>	<i>69</i>
<i>Anexo IV: Código Python propuesto para la evaluación de los pilotex</i>	<i>71</i>
<i>Anexo V: Código Matlab para lectura de .csv y generación de gráficas BER</i>	<i>72</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Alcance mínimo necesario de la red (Elaboración propia)	9
Figura 2-1. Telegrafía óptica en acción sobre una carretera en el Marne (Francia, 1914).	12
Figura 2-2. Código internacional de banderas [6].....	12
Figura 2-3. Símbolos del código morse [7].....	13
Figura 2-4. El italiano Guillermo Marconi con su invento [8].	13
Figura 2-5. Antena Multifrecuencia de Santorcaz [13].....	15
Figura 2-6. Diagrama ejemplificativo del SSA [15].	15
Figura 2-7. Tabla de las Astronomicae tabulae de Alfonso X el Sabio [18].	17
Figura 2-8. Uso de la ballestilla según el <i>Cosmographicus liber</i> [18].....	18
Figura 2-9. Astrolabio Náutico [21].....	18
Figura 2-10. Guardiamarina tomando la meridiana con un sextante [23].	19
Figura 2-11. Unidad de medición inercial [28].	20
Figura 2-12. Arquitectura de una red de Sigfox [30].	22
Figura 2-13. Comparativa entre NB-IoT y LoRa[36].	23
Figura 2-14. Captura de la aplicación ATAK[38].	26
Figura 2-15. Miembros del ejército Británico haciendo uso de teléfonos con el software ATAK [39].	26
Figura 2-16. Funda impresa en 3D para adaptarla al campo.	27
Figura 3-1. Comparativa del rango de transmisión y el consumo energético de distintas tecnologías [41].	30
Figura 3-2. Comparativa entre los distintos Factores de dispersión disponibles en LoRa [43].	30
Figura 3-3. Ejemplo de un chirp LoRa en el que se puede ver el ancho de banda utilizado (BW) [44].	31
Figura 3-4. Ejemplo de bits de redundancia en un paquete [45].....	31
Figura 3-5. Ejemplificación de un Ciclo de trabajo del 20% [47].	32
Figura 3-6. Variación del BER frente al Eb/No. Matlab.	34
Figura 3-7. Probabilidad de error con relación al SNR para los distintos factores de dispersión. Matlab.	34
Figura 3-8. Ejemplo de ciudad inteligente con LoRaWAN[52].	36
Figura 3-9. Imagen de la cobertura de TTN en España [53].....	36
Figura 3-10. Topología de una red LoRaWAN [41].....	37
Figura 4-1. Placa Lilygo T-Beam [55].....	39
Figura 4-2. Baterías Li-Ion [56].	39
Figura 4-3. Pantalla OLED integrada en la T-Beam [55].	40
Figura 4-4. Hardware montado para el proyecto. Autoría propia.	40
Figura 4-5. Ejemplo de QR generado por un nodo. Elaboración propia.	46

Figura 4-6. Cobertura teórica de la antena situada en la Escuela Naval[58].	47
Figura 4-7. Captura tomada de la aplicación. Autoría propia.	48
Figura 5-1. Escenario de la primera prueba con el RSSI (dBm) en cada punto. Google Earth.	49
Figura 5-2. RSSI frente a la distancia.	50
Figura 5-3. RSSI frente al SNR.	50
Figura 5-4. Trayectoria de la lancha de instrucción durante la prueba de alcance en la que se muestran los RSSI (dBm) en cada punto. Google Earth.	51
Figura 5-5. Trayectoria seguida diferenciada por los SF. Matlab.	52
Figura 5-6. RSSI frente al SNR en el Long Moderate. Matlab.	53
Figura 5-7. RSSI frente al SNR en el Long Fast. Matlab	53
Figura 5-8. RSSI frente al SNR en el Short Fast. Matlab	54
Figura 5-9. Test de alcance en Long Moderate. Matlab.	54
Figura 5-10. Test de alcance en Long Fast. Matlab	55
Figura 5-11. Test de alcance en Short Fast. Matlab.	55
Figura 5-12. Probabilidad de comunicación frente al BER para cada configuración. Matlab.	56
Figura 5-13. Probabilidad de Transmisión sin errores en función del SNR para cada configuración de la señal. Comparación entre datos reales y teóricos. Matlab.	56
Figura 5-14. Probabilidad de Transmisión correcta en función del RSSI recibido para cada configuración de la señal. Comparación entre datos reales y teóricos. Matlab.	57
Figura 5-15. Presentación del mapa con la flota de lanchas en el lado opuesto de la ría. Captura de Meshtastic	58
Figura 5-16. SNR y RSSI asociados a la lancha de instrucción Chereguini, a 8.8 Km de distancia. Captura de Meshtastic.	58
Figura 5-17. Fragmento de conversación realizada entre las distintas lanchas de instrucción. Captura de Meshtastic	59
Figura A3-0-1 Código del Range test para añadir elementos al .csv.	69
Figura A4-0-1 Código ejemplo de evaluador de alumnos. Elaboración Propia.	71
Figura A5-0-1 Código para la generación de gráficas desde el .csv. Matlab.	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa de las distintas tecnologías expuestas. Elaboración propia.	24
Tabla 2. Distintas configuraciones predeterminadas en Meshtastic [37].	25
Tabla 3. Relación de factores de dispersión con el SNR mínimo [49].	33
Tabla 4. Configuraciones de señal elegidas para la prueba. Elaboración propia.	44

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción.

En el ámbito militar, y más concretamente en el naval, las comunicaciones son un elemento fundamental para el desarrollo de las operaciones. La importancia de estas nos motiva a buscar un constante desarrollo y mejora de nuestros medios para lograr así optimizar su explotación.

España, con una Armada limitada en personal, medios y capacidad de proyección; tiene la necesidad de buscar tecnologías que reduzcan costes sin limitar capacidades. La analista de defensa Robin Dixon señala, en el contexto del conflicto de Azerbaiyán con Armenia, que *“Una fuerza aérea es algo muy caro. A los países pequeños, los drones les ofrecen acceso barato a la aviación táctica y a bombas guiadas, que les permiten destruir equipos enemigos mucho más caros, como tanques o sistemas de defensa aérea”*[1]. Haciendo un paralelismo, en un escenario bélico con un incipiente número de actores, el ámbito de las comunicaciones toma un rol protagonista, ya que, como afirma el entonces capitán de fragata Manuel Abalo Cores, *“Una característica esencial de los medios CIS (Communications and Information Systems) es su carácter «transversal» a todas las actividades de la Armada, ya que no hay ámbito de actividad que no emplee o fundamente su tarea en elementos del área CIS”*[2]. La búsqueda de un medio de comunicación descentralizado, seguro y de bajo coste, que nos permita ejercer mando y control de escenarios multidisciplinares, es una prioridad en la Armada.

Las comunicaciones proporcionan al mando la capacidad de ejercer un control efectivo sobre sus fuerzas, siempre con la necesidad de cumplir tres características: **rapidez**, es decir, que las comunicaciones lleguen prácticamente en tiempo real para tomar decisiones acertadas ante cada situación; **confianza**, o tener la certeza de que el mensaje enviado es el mismo que se recibe; y **seguridad**, que garantiza que ningún tercero pueda acceder a la información transmitida[3].

Ante generalmente condiciones meteorológicas adversas y ante la falta de infraestructuras para soportar una conectividad adecuada en zonas cercanas a la costa, las comunicaciones basadas en redes de sensores sin cables (“Wireless Sensor Networks”) han sido ampliamente utilizadas hasta el día de hoy. Sin embargo, este tipo de tecnología de redes sin cables presenta diferentes limitaciones como pueden ser la cobertura y la relación entre energía transmitida y eficiencia del sistema. Como alternativa, recientemente las redes de área amplia y de baja potencia (“Low Power-Wide Area Network, LP-WAN”) han ganado interés debido a las grandes distancias de cobertura que proporcionan para potencias transmitidas relativamente bajas. Entre las diferentes tecnologías LP-WAN, una de las más destacadas

es el sistema de larga distancia LoRa (“Long Range”) que proporciona una solución eficaz para las comunicaciones sin cables en un área de operaciones relativamente limitada en espacio a bajo coste en términos de potencia transmitida.

Por otra parte, la flota de Lanchas de Instrucción de la Escuela Naval Militar carece de una red de comunicaciones que proporcione tanto la ubicación de los nodos como un chat táctico, similar al JCHAT de la OTAN, un chat satélite que simplifica las comunicaciones y que está ganando peso en las operaciones debido a su versatilidad y comodidad de uso, por lo que la implementación de una red LoRa le proporcionaría un valor añadido a la formación de los alumnos, acercándoles a lo que se encontraran en las unidades de la Armada.

La seguridad en la navegación y la monitorización del tráfico marítimo durante los ejercicios de instrucción en la escuela son dos requerimientos imprescindibles y necesarios para el correcto desarrollo de esta. El sistema LoRa, en conjunto con módulos de tecnología GPS, permite desarrollar un sistema de seguimiento y control en tiempo real de embarcaciones a partir de información de velocidad y posicionamiento similar al sistema de identificación automático (“Automatic Identification System, AIS”), pero a un menor coste y de una forma no tan compleja. El sistema LoRa, incluso permitiría la monitorización de todo tipo de embarcaciones incluso cuando el sistema AIS estuviese no disponible.

1.2 Objetivos.

El principal objetivo de este proyecto es desarrollar e implementar una red operativa eficiente de mando y control basada en tecnología LoRa que nos permita localizar unívocamente las embarcaciones de la Escuela Naval en tiempo real de forma que los ejercicios de instrucción se desarrollen en un entorno seguro y controlado. Para ello, es necesario que, como mínimo, la red cubra prácticamente toda la superficie de la ría de Pontevedra, en la que operan la mayor parte del tiempo los barcos de la Escuela y todo ello con un coste energético controlable de ahí la utilización de un sistema de baja potencia de transmisión. En la figura 1-1, se muestra un entorno aproximado de 7 millas náuticas (12.96 km) que se desea controlar, tomando como centro la Escuela Naval.

Para el desarrollo e implementación de la red de comunicaciones basada en tecnología LoRa se hace uso del proyecto Meshtastic, un proyecto de código abierto que permite utilizar protocolos radio a un precio relativamente bajo para crear redes nodales en áreas sin una estructura de comunicaciones existente o fiable. Meshtastic se puede definir como un protocolo radio de larga distancia que utiliza tecnología LoRa accesible en la mayor parte de las regiones sin la necesidad de disponer de una licencia adicional. Asimismo, acoplado con dispositivos que dispongan de un módulo Bluetooth, Meshtastic nos proporcionará la capacidad de enviar mensajes entre las distintas unidades, facilitando el envío de todo tipo de órdenes.

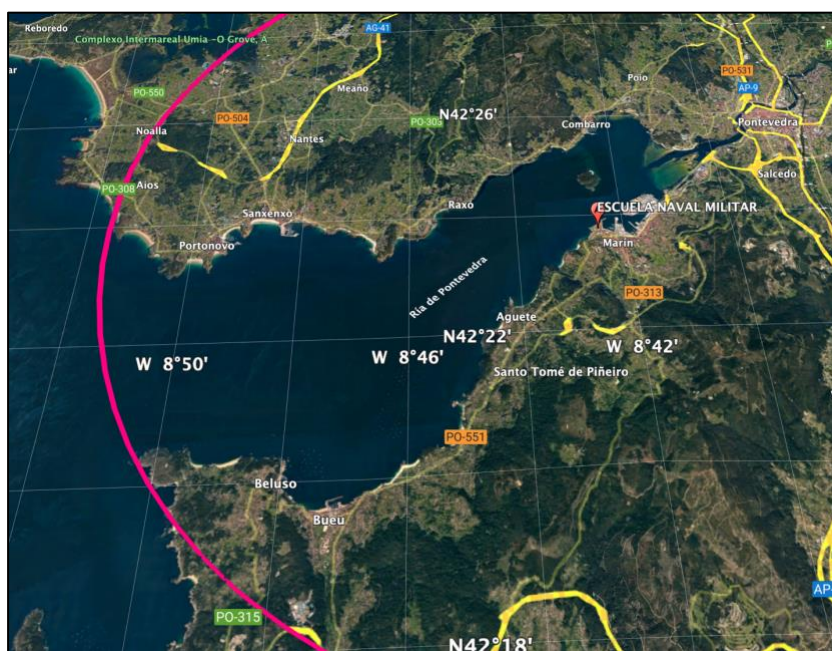


Figura 1-1. Alcance mínimo necesario de la red (Elaboración propia)

Como objetivos secundarios para la gestión de la red LoRa de mando y control se incluyen:

- El desarrollo de un sistema para establecer las claves de cifrado simétrico de cada día, de manera que la seguridad de la red aumente. Uno de los momentos más críticos del cifrado simétrico AES256 es el momento de la distribución de claves ya que, de no realizarse esta de manera segura, la seguridad de la red (característica, como dijimos antes, necesaria para establecer una red de mando y control) se vería comprometida.
- Adaptación del sistema al ambiente marino, tratando de evitar, en gran medida, los perjuicios producidos por el agua salada y una atmósfera húmeda. Dado que el sistema va a funcionar en un ambiente expuesto a condiciones meteorológicas adversas, es primordial que se adapte de manera eficaz a la lluvia y a la mar, además de buscar una manera de que esta protección al medio no complique la carga de los dispositivos, necesaria cada cierto tiempo de uso.
- Determinar la variación del RSSI con relación a la distancia en función de los diferentes parámetros que modifican el chirp (tipo de señal transmitida) de la señal LoRa, de manera que se determine cuál es la configuración óptima para una red de mando y control en el ámbito de la Armada.

1.3 Estructura del Trabajo.

Tras haber contextualizado el trabajo y haber presentado los objetivos que se esperan del mismo, a continuación, se expondrá la estructura del trabajo con una breve explicación de los contenidos de cada apartado.

- **Capítulo 1 - Introducción y objetivos:** En este apartado se hace una breve introducción de la problemática de las redes de sensores sin hilos y las soluciones que se plantean con el desarrollo e implementación de una red de larga distancia LoRa. Además, se aproxima el concepto que tiene la Armada de las redes de mando y control y de las características que necesitan cumplir estas. Por último, se plantean los objetivos, tanto primarios como secundarios, del Trabajo de Fin de Grado.
- **Capítulo 2 - Estado del arte:** En este apartado se comenzará a contextualizar los diferentes sistemas de comunicaciones usados en la Armada, haciendo hincapié principalmente en los sistemas sin hilos y desarrollará también los sistemas de posicionamiento actuales. También se expondrán las distintas tecnologías de IOT y se destacará entre ellas LoRa.
- **Capítulo 3 - Tecnología LoRa:** En el tercer capítulo se desarrolla la tecnología LoRa, piedra angular de proyecto. Se describen las características principales de la señal, el concepto del BER y la aplicación de LoRa en la capa de red, LoRaWAN.
- **Capítulo 4 - Desarrollo del TFG:** en este capítulo se hace una descripción completa de las diferentes funcionalidades que ofrecen los equipos disponibles dentro de la red de comunicaciones LoRa, así como de las alternativas que ofrecen las diferentes configuraciones del hardware y del proyecto de código abierto Meshtastic.
- **Capítulo 5 - Resultados/Validación/Prueba:** en este apartado se mostrarán y analizarán en profundidad los resultados obtenidos durante la realización del TFG. Entre las pruebas realizadas, por un lado, se mostrará la prueba de alcance realizada con los diferentes nodos que integran la red LoRa, mientras, por otro lado, se mostrará el funcionamiento compartido de los nodos dentro de la red, los cuales se van intercambiando los mensajes en diferentes saltos permitiendo la comunicación del nodo más lejano al nodo central que funciona como servidor.
- **Capítulo 6 – Conclusiones y Líneas futuras:** por último, en este apartado se resumirán los principales logros obtenidos con el trabajo y se plantearán cuáles pueden ser las principales líneas de futuro que sigan esta línea de investigación.
- **Capítulo 7 – Bibliografía:** en este capítulo se recopilan las principales fuentes de información seguidas para la realización de este trabajo.
- **Anexos** – Se han añadido al presente trabajo cinco anexos que se considera, pueden ser de utilidad para la comprensión del documento. El primer y segundo anexos hablan de las implicaciones sociales, económicas, medioambientales y sociales. En el tercero se exponen las modificaciones que se han realizado al firmware original de Meshtastic, en el cuarto anexo se propone un código desarrollado en Python como punto de partida para una futura herramienta de calificación de los alumnos, finalmente en el quinto y último anexo se expone el código Matlab que se ha utilizado para leer el archivo “.csv” generado para leer el “*rangetest.csv*” y desarrollar las gráficas que se analizan en el trabajo.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Comunicaciones bélicas.

2.1.1 Historia de las comunicaciones navales.

A lo largo de la historia, las comunicaciones navales han tenido una importancia clave para el mando y control de las unidades de una fuerza. Desde que se crearon las primeras comunidades de personas, surgió la necesidad de desarrollar medios para lograr esa comunicación a largas distancias. Antes de que se desarrollase un control suficiente sobre el fuego, se utilizaban mensajeros para cubrir las distancias entre puntos remotos. Una vez este control fue perfeccionado, se comenzó a utilizar el fuego para enviar señales rudimentarias cubriendo largas distancias. Ya en la época de los griegos hay constancia de ese uso del fuego para la comunicación. Una de las primeras veces en las que se empleó fue en la famosa batalla de Troya, donde el rey Agamenón señaló a sus barcos el inicio del ataque mediante una señal ígnea.

Este tipo de comunicación traía una evidente desventaja, los barcos eran de madera y las velas de paño, por lo que eran muy susceptibles de sufrir accidentes con el uso de las comunicaciones. además, a medida que las civilizaciones ganaron maestría con los metales, descubrieron que las superficies pulidas reflejaban muy bien el sol, y que este podía ser utilizado para comunicarse sin necesidad de fuego. De este descubrimiento se desarrolló el heliógrafo (del griego *helios* sol y *grapho* escribir), un instrumento que mediante reflejos del sol era capaz de enviar señales a grandes distancias de hasta 50 km [4]. Estos rudimentarios métodos de comunicación se mantuvieron prácticamente invariables hasta cerca del final de la Edad Media. De hecho, el heliógrafo, con distintas mejoras técnicas a lo largo de los siglos, se siguió utilizando hasta el siglo XX, como se muestra en la siguiente figura.



Figura 2-1. Telegrafía óptica en acción sobre una carretera en el Marne (Francia, 1914).

Con la Edad Moderna, y la invención en 1608 del telescopio por Hans Lippershey y del binocular por Galileo en 1609, el alcance visual del hombre aumentó significativamente, por lo que se fue dejando de lado el uso del fuego y se buscó un nuevo método de comunicación: Las banderas [5].

El sistema de comunicación con banderas fue desarrollado durante la Edad Moderna de manera paralela en las principales potencias. Este sistema, utilizado por las principales armadas, acabó derivando en lo que hoy conocemos como el código internacional de señales, creado el año 1965 y compuesto por 26 banderas distintas dotadas de significado propio que además se pueden combinar para dar nuevos significados.

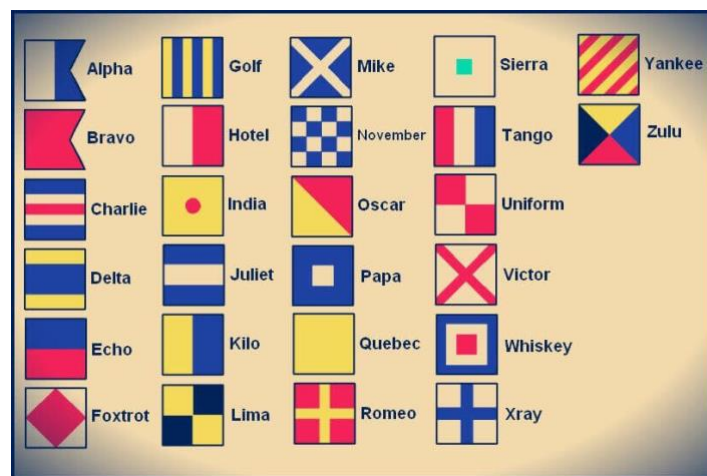


Figura 2-2. Código internacional de banderas [6].

La llegada de la electricidad supuso un cambio significativo en las señales luminosas, que pasaron de hacerse con fuego a realizarse con faroles o focos eléctricos. Este nuevo sistema creó la necesidad de desarrollar un nuevo código de comunicación similar al de banderas, en la que una secuencia de luces y pausas corresponde a una letra concreta. Este código fue desarrollado en 1835 por **Alfred Vail** con la ayuda de **Samuel Morse**.

A ..	B	C	D ...	E .	F	G ...
H	I ..	J	K ...	L	M ..	N ..
O ---	P	Q	R ...	S ...	T -	U ...
V	W ---	X	Y	Z		

Figura 2-3. Símbolos del código morse [7].

2.1.2 Las comunicaciones navales en la actualidad.

En la primera mitad del siglo XX surgió la mayor revolución hasta la fecha en las comunicaciones a grandes distancias con la invención de la radio por parte del italiano, ganador de un Premio Nobel, Guillermo Marconi. Marconi desarrolló a raíz un artículo creado por Hertz que explicaba la posibilidad de que las ondas electromagnéticas se propagasen por el aire. El 14 de mayo de 1897 Marconi emitió la primera señal de radio de la historia (no de voz, sino en código Morse), en mar abierto a una distancia de 6 kilómetros [8].



Figura 2-4. El italiano Guillermo Marconi con su invento [8].

Si bien es cierto que la primera comunicación por radio la realizó Marconi, la primera comunicación de radio con voz de la historia la realizó un español, el teniente coronel e ingeniero Julio Cervera. Este ingeniero consiguió en 1902 la comunicación por voz entre Alicante e Ibiza, pero debido a que España estaba aún recuperándose del desastre del 98, este hecho no recibió el rédito suficiente a su hazaña [9].

Posteriormente, durante las dos Guerras Mundiales y los años que les prosiguieron se logró un gran número de avances en las radiocomunicaciones. Desarrollándose sistemas de mando y control basados en radiofrecuencia, sobre todo en HF (“High Frequency”) y sistemas tácticos como el Link 11 o el Link 16, más modernos, que trabajan en HF, VHF (“Very High Frequency”) ó UHF (“Ultra High Frequency”) dependiendo de las necesidades [10].

A finales del siglo XX, en el contexto de la guerra fría entre el bloque capitalista, liderado por Estados Unidos y el comunista liderado, por la URSS; se desarrolló una carrera para conquistar la que

se consideraba la última frontera: El espacio [11]. El año 1962 la empresa americana *AT&T* puso en órbita el primer satélite de comunicaciones, lo que inicio una revolución en las comunicaciones de todo el mundo [12].

Hoy en día la mayoría de las comunicaciones que se realizan en los buques de la Armada son a través de satélite. Redes de mando y control, como SMN (Servicio Móvil Naval), SACOMAR (*Sistema Automático de Conmutación de mensajes de la Armada*) o NSWAN (*Nato Secret WAN*) funcionan mediante comunicación satélite.

Los sistemas satelitales, comparados a otros sistemas de comunicaciones, presentan en general una gran cantidad de ventajas como pueden ser:

- Mayor capacidad y velocidad de envío. Una fotografía por satélite puede tardar milisegundos y por HF con la tecnología actual hasta cinco minutos.
- Facilidad de uso frente a las tecnologías de radiofrecuencia. Prácticamente basta con conectarse marcando un número de teléfono.
- Mediante el uso de satélites comerciales, se permite a la dotación conectarse mediante sus dispositivos para contactar con sus familiares y mejorar su calidad de vida.

Pese a todas sus ventajas las comunicaciones vía satélite presentan también unas ciertas limitaciones que deben ser tenidas en cuenta a la hora de implementar una red de comunicaciones tales como:

- Ancho de banda limitado.
- La posibilidad de negación de acceso al satélite por una fuerza rival. La tecnología de perturbación a satélites está al alcance de un gran número de actores y es, según afirma el capitán de fragata Guitart, jefe de las siete estaciones de radio de la Armada en España, «Es de las primeras acciones que toma el enemigo: anular las comunicaciones por satélite. Por eso, en todas las maniobras de la Armada practicamos ejercicios de caída de señal de satélite y paso a onda corta» y la Armada ya ha sufrido ataques en su comunicaciones [9].
- Los equipos de conexión a satélite poseen un precio más elevado. Además, los satélites no pertenecen a la Armada, por lo que el ancho de banda disponible será el que le proporcione el Ministerio de Defensa en función de las necesidades de la misión.

Debido a estas grandes limitaciones, la Armada mantiene en uso paralelamente el sistema BRASS (*“Broadcast shore ship system”*) un sistema que permite la comunicación en la banda de HF, por lo que la señal electromagnética permite un largo alcance. Además, la comunicación en la banda de HF posee un gran número de ventajas frente al satélite, ya que es mucho más difícil de perturbar, debido a la capacidad de cambiar de frecuencia de manera muy sencilla y además tiene una curva de modernización de su Hardware continua, ya que es fácil acceder a las instalaciones de las antenas, mientras que los satélites se cambian cada 10 o 15 años, por lo que se quedan obsoletos a mitad de su vida útil.

La Armada posee siete estaciones radio repartidas por toda España. Las dos principales están situadas en Madrid, en las localidades de Santorcaz y Bermeja cubriendo una área con un radio de 2500 kilómetros, es decir, desde Nigeria hasta Groenlandia y desde El Cairo hasta la mitad del Atlántico [9].



Figura 2-5. Antena Multifrecuencia de Santorcaz [13].

2.1.3 El futuro de las comunicaciones navales.

El futuro de las comunicaciones navales pasa, indudablemente por la creación de una “nube táctica” o NCW (“*Network Centric Warfare*”). Este concepto nace en la década de los 90 con la idea de crear una red táctica en la que sensores, buques y los diferentes actores de la comunicación estén conectados y sean capaces de transmitir una gran cantidad de datos prácticamente en tiempo real. Pese a que este concepto se lleva desarrollando durante más de treinta años, aun no se ha logrado implementar prácticamente en ninguna marina del mundo. Si bien es cierto que con la llegada del 5G, del IOT y de la inteligencia artificial; cada día se ve más cerca la posible creación de esta nube táctica [3].

El objetivo del NCW es buscar que todas las unidades tengan un conocimiento en común de la situación táctica, siendo capaces así de compartir información en tiempo real entre ellas. Es lo que se conoce en el mundo anglosajón como “*Shared Situational Awareness*”, en adelante SSA.

El SSA busca crear una visión del entorno operativo de la misión erigido y compartido por los miembros que participan en ella [14]. De este modo, si uno de los elementos de la red tiene información relevante que el resto de la fuerza no ha sido capaz de obtener, este está preparado para transmitirla. Recibiendo a su vez información que puede resultarle relevante a él. El SSA busca dotar a la fuerza una superioridad en la información sobre el enemigo. Permitiéndoles observar, decidir y actuar más rápido y de manera más correcta que ellos [15].

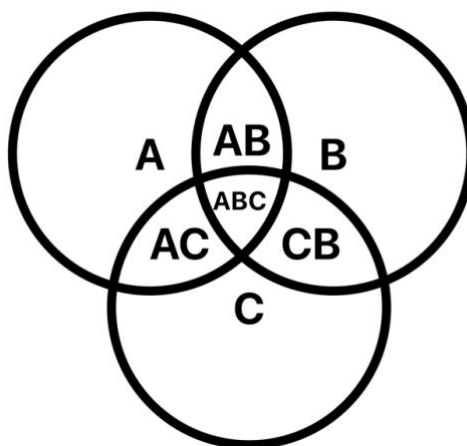


Figura 2-6. Diagrama ejemplificativo del SSA [15].

El principal problema de la nube táctica es que las tecnologías que se usan para ejercer el mando y control, basadas en su mayoría en el satélite, son un foco continuo de ataques por parte de los adversarios de la OTAN. De estos ataques surge lo que se conoce como C2D2E (*“Command and Control Degraded or Denied Environment”*), un entorno operativo en el que se niega el acceso al satélite para evitar al mando ejercer su control sobre las unidades.

Es por ello por lo que es necesario que la Armada, además de potenciar los sistemas de comunicación por satélite que proporcionen acceso a la nube táctica, busque métodos de comunicación que garanticen el acceso al espectro electromagnético de manera segura, rápida y confiable [3]. En esta línea, se prevé que con la llegada del BRE1TA y BRE2TA en 2028 se consigan las mismas prestaciones que con satélite en las comunicaciones por HF. Consiguiendo 256 kilobytes por segundo de transmisión en cada uno de los cuatro equipos HF que tienen los barcos.

La estrategia de tecnología e innovación para la defensa (ETID), señala como línea de I+D+I de interés para la defensa la radio definida por software, y la “Investigación y desarrollo de nuevas formas de onda que mejoren la capacidad de comunicaciones tácticas inalámbricas para garantizar de forma segura los intercambios de información en el ámbito de las operaciones nacionales e internacionales” [16]. Constituyendo de esta manera la radio definida por software como el núcleo del objetivo de comunicaciones militares en entornos complejos.

2.2 Posicionamiento de buques.

El posicionamiento de los buques ha sido siempre un asunto de vital importancia para la gente relacionada con la mar. En el presente capítulo se desarrolla como han cambiado los métodos de posicionamiento a lo largo de la historia y cuáles son los principales utilizados en la actualidad.

2.2.1 Un poco de historia.

A medida que los reinos de Europa se fueron expandiendo, surgió la necesidad de saber por dónde estaban navegando los barcos. La navegación en alta mar exigía conocer la posición geográfica de las naves con cierta exactitud, necesitando saber tanto la longitud como la latitud para obtener una situación fiable del navío.

La determinación de la longitud en alta mar fue un asunto que no fueron capaces de resolver hasta mediados del siglo XVIII, ya que exigía una tecnología y unos métodos aún no desarrollados en esa época. No ocurrió lo mismo a la hora de determinar la latitud, ya que, mediante la observación de la meridiana del sol, la hora en la que este se encuentra en su apogeo, y de las estrellas; los marinos eran capaces de conocer la latitud en la que se encontraban sin ver costa a su alrededor. Además, mediante la comparación de situaciones consecutivas, eran capaces de determinar su avance hacia el norte o hacia el sur.

Estas mediciones, en gran medida, eran posibles gracias a un avance tecnológico español, ya que durante los siglos XV y XVI, las tablas astronómicas (que determinaban la posición en todo momento de los astros más importantes), más utilizadas por los navegantes europeos eran las tablas alfonsíes, impresas por primera vez en 1483 [17].

Figura 2-7. Tabla de las Astronomicae tabulae de Alfonso X el Sabio [18].

2.2.1.1 Instrumentos de los navegantes durante la historia.

El desarrollo de la capacidad marítima española estuvo relacionado directamente con la expansión territorial de los reinos peninsulares. Destacando, por ejemplo, la ocupación del archipiélago canario por Castilla en el año 1402. Este desarrollo tecnológico dio pie a la búsqueda de rutas de comunicación con el lejano oriente.

Portugal eligió la ruta que rodeaba África, y Castilla, decidiendo apoyar la búsqueda de una ruta por el Oeste, logró que Cristóbal Colon descubriese América en el año 1492. El culmen de este afán de descubrimiento se dio el año 1523 cuando Juan Sebastián Elcano, marino de Guetaria, circunnavegó el planeta, buscando una ruta de regreso de la expedición de Magallanes [19].

En esta época los navegantes basaban sus singladuras en unos conocimientos científicos muy básicos, y con instrumentos muy rudimentarios. Entre ellos destacan la ballestilla, el astrolabio náutico y el sextante.

- **La ballestilla** era un instrumento simple. Consistía en una regla de madera con una escala grabada y una tabla rectangular que se deslizaba perpendicularmente por la regla. Para usarla, el observador alineaba el horizonte con el borde inferior y el astro con el borde superior de la regla. Sin embargo, debido a la simplicidad del instrumento y la dificultad para obtener una alineación precisa en el mar, las lecturas de la escala eran imprecisas, lo que resultaba en errores significativos en la determinación de la latitud y la posición geográfica de la nave [20].

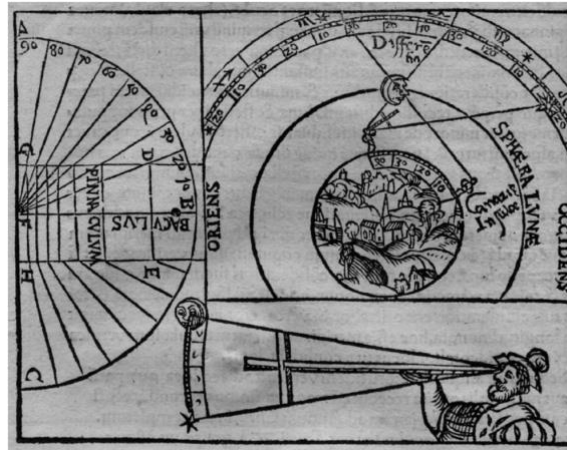


Figura 2-8. Uso de la ballestilla según el *Cosmographicus liber* [18].

- **El astrolabio** constaba de un disco de cobre colgado de una anilla, con lo que se conseguía que estuviese dispuesto de forma vertical. Mediante una alidada, se podían observar los astros. Con el astro localizado, mediante las líneas dibujadas en el disco, que tenía entre la línea de horizonte y el eje vertical una graduación de 0 a 90 grados, se podía hallar de manera precisa la altura de los astros.

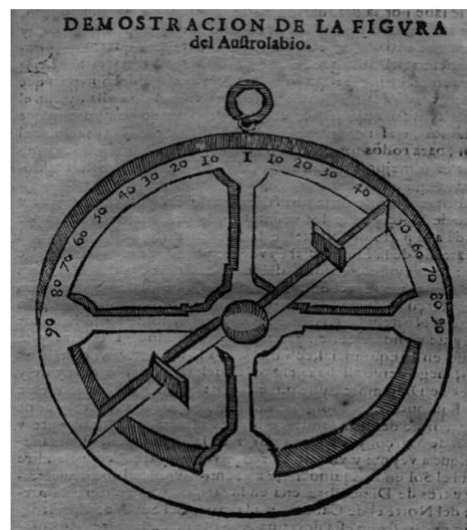


Figura 2-9. Astrolabio Náutico [21].

- **El sextante**, único instrumento que ha perdurado hasta nuestros días, es el instrumento astronómico más utilizado en la navegación. Está compuesto por una escala graduada que mide 60 grados, con un anteojo y dos espejos. Este instrumento es capaz de medir ángulos menores de 120 grados con precisión, por lo que su uso se popularizó a partir del siglo XVIII [22].



Figura 2-10. Guardiamarina tomando la meridiana con un sextante [23].

Como es lógico, la base de la navegación en esta época eran la brújula y la cartografía. Desde la rudimentaria aguja imantada en un recipiente líquido, hasta agujas mucho más desarrolladas con un eje de giro y superpuestas con una rosa de los vientos, para conocer el rumbo que seguía el barco en todo momento [24].

2.2.2 Posicionamiento de buques en la actualidad.

En la actualidad se dispone de un gran número de métodos para posicionarse en la mar. Los principales son las demoras visuales, cuando se dispone de ellas; distancias radar a puntos notables, el GPS y los navegadores inerciales. De ellas, las únicas que no necesitan de la intervención humana, que lleva consigo fallos en la precisión, son el GPS y la navegación inercial. Por ello, se desarrollarán ambas a continuación.

- **GPS:** El año 1978 el Departamento de Defensa de los Estados Unidos dio a la luz el que sería el mayor avance en el posicionamiento de buques en la historia, el NAVSTAR GPS (“*Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System*”).

El GPS es un sistema de radio navegación basado en el espacio que pertenece al gobierno de Estados Unidos y está operado por su Fuerza Aérea. Puede proporcionar una posición en tres dimensiones con una precisión de hasta un metro, cada 10 nanosegundos y en cualquier lugar del mundo en todo momento.

El GPS está compuesto por tres partes diferenciadas:

- El segmento espacial: Una constelación de al menos 24 satélites distribuidos en seis planos orbitales inclinados 55° desde el ecuador en una Órbita Terrestre Media (MEO) a unos 20.200 kilómetros y orbitando la Tierra cada 12 horas.
- El segmento de control: Que está compuesto por estaciones en tierra para monitorizar y mantener los satélites.
- El segmento de usuario: Cada receptor GPS que proporciona al usuario las señales del satélite procesadas para mostrar la posición y el tiempo [25].

Un problema importante asociado al GPS es que puede ser perturbado por un tercero, ya que la información que proporciona no está obtenida directamente por los sensores del buque. Armadas como la Armada Rusa llevan tiempo desarrollando mecanismos para realizar lo que se conoce como “*GPS spoofing*”, que consiste en engañar al receptor mediante una señal modificada que le proporciona una posición falsa; o el “*GPS jamming*”, técnica que consiste en negar el uso del GPS a la víctima mediante la emisión de una señal con más potencia que oculte la señal legítima [26].

- **Navegación inercial.** Un sistema de navegación inercial es un dispositivo que proporciona al barco información sobre su balance, cabeceo, posición y velocidad.

Está compuesta por tres acelerómetros, tres giroscopios y tres magnetómetros. Los acelerómetros están encargados de medir la aceleración del buque, los giroscopios miden el movimiento angular respecto a un eje de referencia, y el magnetómetro mide la variación de los campos magnéticos para proporcionar una orientación [27].

Los dispositivos de navegación inercial tienen la ventaja de que no están influidos por agentes externos, como un satélite, sino que la información que proporcionan es la obtenida por sensores propios del buque. Esto significa que la información no puede ser manipulada por un tercero como el GPS, por lo que lo convierte en una fuente fiable de información, siempre que no sufra errores de calibración o funcionamiento [28].



Figura 2-11. Unidad de medición inercial [28].

2.3 Tecnologías de LPWAN.

En la última década, están a proliferar las redes de objetos físicos (vehículos, sensores, edificios, dispositivos...) interconectadas dentro de una única red que les permite intercambiar información y recopilarla. Esta tecnología de conexión conocida como IoT (“*Internet of Things*”), o internet de las cosas permite que esos objetos sean controlados y monitorizados desde la red, integrando su uso en gran medida al mundo físico y optimizando gran cantidad de procesos, dándoles más exactitud y validez.

Hoy en día, existen redes de IoT capaces de actuar sin interacción humana y se han desarrollado aplicaciones basadas en IoT en campos como el de la salud, el transporte y la industria automotriz. Pese a que el IoT está en una fase primaria y aún hace falta desarrollar protocolos, infraestructuras, interfaces y estándares, la tecnología ya ha traído un importante desarrollo en la integración de sensores con internet.

Las tecnologías basadas en redes de área ancha y de baja potencia LPWAN son técnicas de comunicación inalámbrica que permiten la interconexión de estos dispositivos IoT a largas distancias y con un consumo mínimo de energía (alta eficiencia energética) y todo ello a un coste reducido.

Se usan especialmente en aplicaciones relacionadas con la telemetría (monitorización remota de datos), seguimiento de objetos y monitorización de las condiciones ambientales. Las principales tecnologías de este ámbito son LoRaWAN, Zigbee, Sigfox y NB-IoT.

2.3.1 Zigbee.

Zigbee es un protocolo de comunicación inalámbrica desarrollado por Zigbee Alliance a finales de la década de 1990. Utiliza una modulación por desplazamiento de frecuencia y sus principales características son:

- Topología de red de malla, cada nodo puede emitir y recibir mensajes, lo que da robustez a la red, pero añade complejidad.
- Consumo de energía optimizado, de manera que con baterías los dispositivos se mantengan operativos mucho tiempo.
- Bajo ancho de banda y corto alcance, al trabajar en 2,4GHz se han demostrado unos alcances de 30 metros en interiores y 100 metros en exteriores si se mantienen los nodos a la vista.
- Seguridad, ya que se cifra mediante el protocolo AES de cifrado simétrico.
- Interoperabilidad, el único requisito para comunicar a dos dispositivos es que funcionen con el protocolo de Zigbee [29].

2.3.2 Sigfox.

Sigfox, al igual que veremos posteriormente con LoRa, es una tecnología que opera en una banda de telecomunicaciones sin licencia, con la diferencia de que su modulación es de banda ultra estrecha D-BPSK (“Differential Binary phase shift keying”). Tiene un ancho de banda fijado en 100 Hz y una velocidad de transmisión de 100 bits por segundo en Europa y 600 en Estados Unidos.

Las ventajas que le traen esta modulación es que da una gran eficiencia de acceso al espectro y que es fácil de implementar. Además, la baja tasa bits facilita el uso de componentes con precios ajustados. El ciclo de trabajo es similar al de LoRa, ya que se ve limitado por la misma normativa al 1%. La potencia en Europa está limitada a 14 dBm o 25mW de ERP (Potencia efectiva irradiada).

La topología de la red es de estrella con un solo salto, eso implica que todos los dispositivos de la red están conectados directamente con la estación base, logrando así una red más simple. Como se muestra en la siguiente figura, los nodos se comunican directamente con el router, que vuelca la información que recibe en un servidor para que pueda llegar de manera eficaz a los clientes [30].

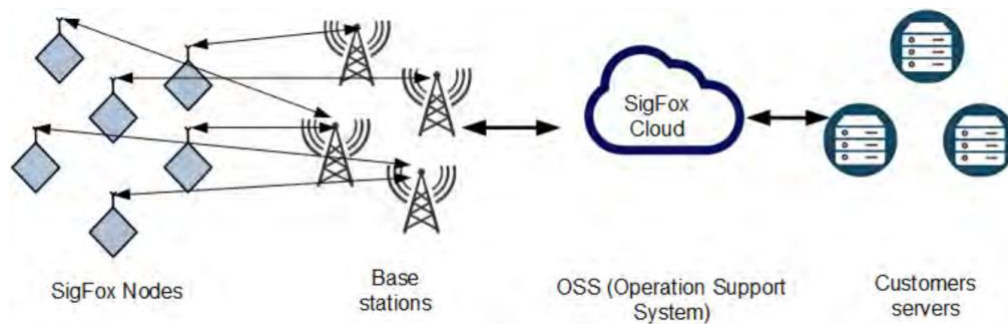


Figura 2-12. Arquitectura de una red de Sigfox [30].

Sigfox tiene aplicaciones en prácticamente todos los ámbitos del IoT y de la industria 4.0, algunos ejemplos interesantes son:

- Buzones inteligentes, que te avisan cuando te ha llegado una carta.
- Detectores de humos conectados en tu hogar para evitar incendios.
- Monitorización de las condiciones de objetos durante toda la cadena de transporte.

En definitiva, una pequeña muestra de todos los proyectos en curso y aplicaciones desarrolladas en Sigfox puede ser consultada en [31].

Como resumen, el factor diferencial de Sigfox es que en vez de proporcionar conectividad de alta velocidad y baja latencia para dispositivos móviles se centra en ofrecer una conectividad simple y eficiente para dispositivos IoT de bajo consumo que requieren comunicaciones de baja velocidad y baja potencia.

2.3.3 LoRa.

La tecnología de largo alcance LoRa, que será expuesta de manera más extendida en el siguiente capítulo, es una tecnología innovadora en el mundo de las comunicaciones que se basa en utilizar una modulación en espectro ensanchado (“Chirp Spread Spectrum, CSS”) para transmitir la señal de radio. Fue desarrollada por Semtech, una empresa de tecnología de Estados Unidos, para lograr comunicaciones de largo alcance con un consumo de energía reducido. LoRa opera en bandas por debajo de un gigahercio sin necesidad de licencia, dependiendo principalmente de la región en 433 MHz (Asia), en 868 MHz (Europa) ó en 915 MHz (Estados Unidos) [32].

Las principales ventajas de la tecnología LoRa sobre sus más directas competidoras son su alta resistencia a las interferencias debido al tipo de modulación utilizada, un nivel de sensibilidad muy pequeño que le permite recibir señales incluso por debajo del nivel de ruido y un largo alcance con una potencia transmitida mínima.

La tecnología LoRa se sustenta sobre LoRaWAN que es el protocolo en la capa de red de LoRa, permitiendo interconectar distintas redes mediante internet. Su uso está muy extendido en el mundo del Internet de las Cosas y otros ámbitos. Entre ellos cabe citar:

- **Agricultura inteligente basada en LoRaWAN.** LoRa proporciona acceso remoto a sensores a lo largo de una plantación, permitiendo la comprobación eficiente y en tiempo real de un gran número de factores que antiguamente tenían que ser comprobados manualmente. De hecho, en

algunas granjas de Sudamérica, una empresa tecnológica llamada “Caravan” ha desarrollado una infraestructura para monitorizar la ubicación de grandes grupos de reses en tiempo real. Además de la situación GPS, el dispositivo proporciona información en tiempo real sobre la salud de la res; su temperatura corporal, la cantidad de comida y agua que ha ingerido e información sobre cuanto se ha movido [33].

- **Sistema de monitorización de personas con demencia.** la empresa Careband junto a TEKTELIC han desarrollado unas pulseras que monitorizan a personas que sufren de demencia, mediante un Gateway LoRa instalado en la pulsera, se puede avisar de manera automática a los familiares y médicos de los pacientes de su estado de salud y de su ubicación en caso de cualquier problema [34].

2.3.4 NB-IoT.

NB-IoT, o “*Narrow band Internet of Things*”, es una tecnología aplicada en el internet de las cosas para proyectos que necesitan una conectividad de datos de baja potencia, bajo ancho de banda y larga duración de la batería. Su principal diferencia con el resto de las tecnologías de IoT es que opera en una banda con licencia, por lo que su uso no es libre, cosa que si ocurre con las tecnologías de LoRa o de Sigfox.

NB-IoT es la tecnología más utilizada para LPWAN en la banda de frecuencias que requieren licencia, y se prevé que junto con LoRa copen el 85% de las conexiones LPWAN. Como comparativa con LoRa, NB-IoT consume más energía y tiene menor duración de la batería, además de que necesita un mayor coste de uso ya que necesita licencia para operar. Por lo contrario, a diferencia de la tecnología LoRa no tiene unas limitaciones tan restrictivas con respecto al ciclo de trabajo. Por último, tiene también una tasa de datos mayor, hasta 50 kbps de LoRa frente a los 60 kbps que proporciona NB-IoT [35].

En la siguiente figura se muestra de manera gráfica una comparativa entre LoRa y NB-IoT en distintos parámetros, entre los que destaca la ventaja de NB-IoT en términos de latencia y calidad de servicio (“QoS”) y la ventaja de LoRa en términos de vida de la batería, coste, despliegue y cobertura alcanzada.

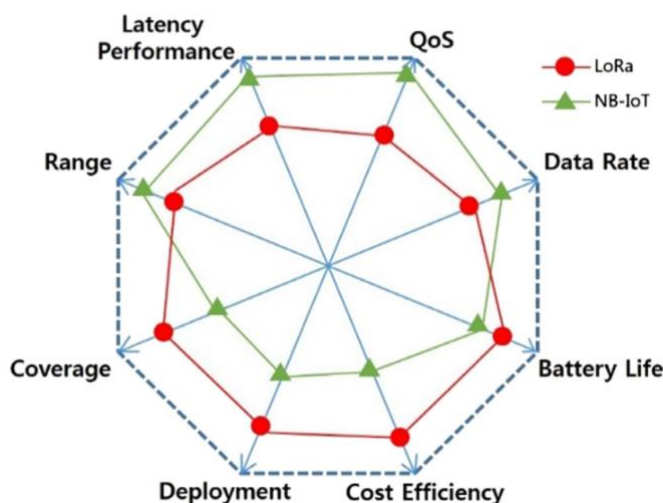


Figura 2-13. Comparativa entre NB-IoT y LoRa[36].

Las aplicaciones técnicas de esta tecnología son muy variadas, y están siendo desarrolladas de manera más pronunciada en Japón, China y Corea, que compiten para implementar la infraestructura en sus países. De hecho, en China la compañía “China Telecom” ha implementado una red de NB-IoT a nivel nacional en la banda de 800 MHz y en Japón el banco “Softbank” ha desarrollado una red basada también en la misma tecnología [36].

Como resumen, y para clarificar similitudes y diferencias, en la siguiente tabla se refleja una comparativa de las distintas tecnologías de LPWAN.

	Zigbee	LoRa	Sigfox	NB-IoT
Alcance	Hasta 100 m	Hasta 20 km	Hasta 50 km	100 km
Frecuencia	2,4 GHz Sin licencia	868/915MHz Sin licencia	868/902MHz Sin licencia	LTE Con licencia
Tasa de bits	250 kbps	0,3-50 kbps	100 bps	60kbps
Modulación	O-QPSK	CSS	BPSK	QPSK
Consumo	Medio	Bajo a medio	Muy bajo	Medio
Seguridad	AES-128	AES-128	AES-128	256-bit 3GPP
Aplicaciones	Redes industriales	Agricultura inteligente	IoT	IoT de pago

Tabla 1. Comparativa de las distintas tecnologías expuestas. Elaboración propia.

2.4 Meshtastic.

Meshtastic es un proyecto de código abierto desarrollado por Semtech que permite comunicar entre si dispositivos de bajo coste utilizando la tecnología Lora. Meshtastic permite crear y parametrizar redes de largo alcance sin necesidad de una infraestructura de comunicaciones con un número de nodos que podría llegar a alcanzar las 100 unidades dentro de toda la red.

2.4.1 Funcionamiento de Meshtastic.

Meshtastic utiliza el protocolo LoRa para su funcionamiento. Una tecnología accesible y de bajo coste que no necesita ningún tipo de licencia para su uso. El funcionamiento básico de la red se puede resumir en los siguientes pasos:

- Al enviar un mensaje desde un dispositivo conectado a uno de los nodos, por ejemplo, un móvil con la aplicación “Meshtastic”, este es transmitido por el nodo con un límite de saltos determinado, lo establecido y recomendado es dejar el límite en tres saltos.
- Una vez ese mensaje es transmitido, se espera una confirmación de que otro dispositivo ha recibido el mensaje, en el caso de que no se reciba se vuelve a retransmitir el mensaje hasta alcanzar el número de saltos determinado.
- Una vez el nodo receptor ha recibido un paquete, comprueba si ha recibido antes ese mensaje. En caso afirmativo, lo ignora, en el caso de que sea la primera vez que le llega el paquete, lo retransmite y reduce el límite de salto establecido en una unidad. De este modo, cuando el límite de salto llegue a cero el mensaje dejará de retransmitirse.

Un aspecto importante a tener en cuenta es que Meshtastic no funciona como otras tecnologías basadas en LoRa, como *“The Things Network”* o *LoRaWAN*, ya que el fin de Meshtastic es el de crear una Red “Off grid” es decir, una red que pese a tener un alcance más limitado, no depende de internet ni de ningún tipo de infraestructura más allá de los dispositivos.

2.4.2 Configuración de la señal en Meshtastic.

Como se desarrollará en el apartado 3.2, la señal de LoRa depende de tres características básicas que se pueden variar en su configuración. Estas son, el factor de ensanchado (“Spread Factor”, SF) que determina cuanto se ensancha la modulación utilizada dentro del ancho de banda de transmisión, la tasa de codificación y el ancho de banda propiamente utilizado. Meshtastic permite al usuario variar las tres configuraciones de manera independiente, pero además tiene unas combinaciones predefinidas que permitirán seleccionar automáticamente cual es la característica concreta que se busca en la comunicación. Existen 8 distintas configuraciones que van desde la que tiene un menor alcance con una comunicación más rápida hasta la que tiene un largo alcance con una tasa más lenta.

En la siguiente tabla se reflejan las configuraciones predeterminadas. Se puede apreciar como la que se caracteriza como *“Short Fast”*, es decir, corta y rápida, tiene una tasa de datos de casi 11 kbps con un factor de ensanchado de 7 y un ancho de banda de 250 kHz; mientras que el *“Very Long Slow”* tiene únicamente una tasa de 0,09 kbps, con el máximo factor de ensanchado de 12 y con un ancho de banda de 62,5 kHz

Channel setting	Alt Channel Name	Data-Rate	SF / Symbols	Coding Rate	Bandwidth	Link Budget
Short Range / Fast	Short Fast	10.94 kbps	7 / 128	4/5	250	143dB
Short Range / Slow	Short Slow	6.25 kbps	8 / 256	4/5	250	145.5dB
Medium Range / Fast	Medium Fast	3.52 kbps	9 / 512	4/5	250	148dB
Medium Range / Slow	Medium Slow	1.95 kbps	10 / 1024	4/5	250	150.5dB
Long Range / Fast	Long Fast	1.07 kbps	11 / 2048	4/5	250	153dB
Long Range / Moderate	Long Moderate	0.34 kbps	11 / 2048	4/8	125	156dB
Long Range / Slow	Long Slow	0.18 kbps	12 / 4096	4/8	125	158.5dB
Very Long Range / Slow	Very Long Slow	0.09 kbps	12 / 4096	4/8	62.5	161.5dB

Tabla 2. Distintas configuraciones predeterminadas en Meshtastic [37].

2.5 ATAK.

ATAK (*Android Tactical Awareness Kit*) es un software para Android, desarrollado por el gobierno de los Estados Unidos para sus fuerzas armadas, que permite a los operadores de los marines, nuestra infantería de marina, comunicarse entre las fuerzas de la unidad y con el mando. La aplicación muestra la situación táctica actualizada al mando, con una imagen sobre mapa de las ubicaciones de todos los miembros de la unidad y le permite transmitir órdenes, ubicaciones a las que deben acudir y avisos con mensajes. Además, permite a los operadores transmitir la ubicación de enemigos, de asuntos de inteligencia y de todo tipo de información que se requiera. Dándole al mando la capacidad de decidir prácticamente en tiempo real y con toda la información necesaria relacionada con la misión.

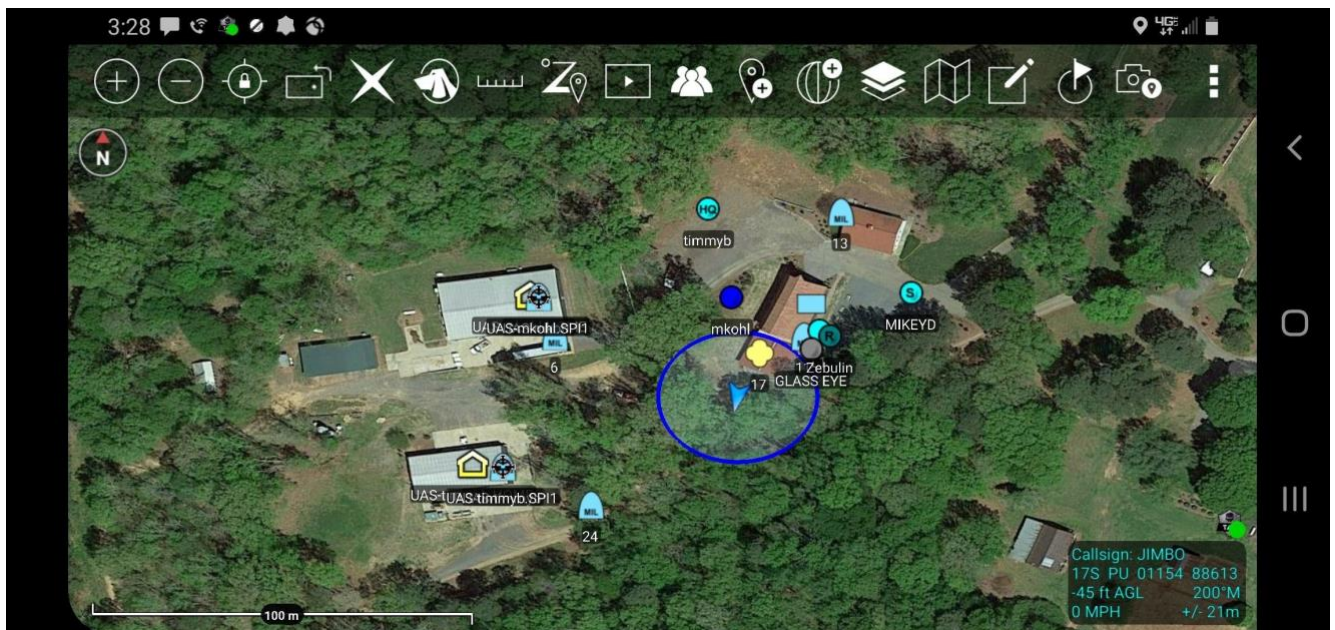


Figura 2-14. Captura de la aplicación ATAK[38].

Un aspecto negativo de esta aplicación es que necesita una tarjeta sim con conexión a internet para transmitir los paquetes, lo que le limita en gran medida la comunicación por dos motivos. El primero, es que, si se opera en ubicaciones remotas, es posible que esa conexión no sea posible y que haya problemas de conexión, degradando las comunicaciones y quitando tanto rapidez como confianza a las mismas; el segundo problema es que si se opera en países extranjeros lo más posible es que haya que comprar en estos las tarjetas SIM para lograr conectarse a internet; siendo muy complicadas de encontrar en países como Somalia o Sudán en los que suelen trabajar las fuerzas de operaciones especiales.

Se ha desarrollado un *plugin* de Meshtastic que le proporciona a ATAK la capacidad de comunicarse por radiofrecuencia en vez de por conexión móvil. Lo que, si bien limita el alcance de las comunicaciones, le proporciona la capacidad de ser utilizado en lugares remotos sin necesidad de conexión satélite. Por lo que con un buen planeamiento de la red y con el material adecuado, para aumentar el alcance de los dispositivos, es una solución útil para las misiones de la Infantería de Marina.



Figura 2-15. Miembros del ejército Británico haciendo uso de teléfonos con el software ATAK [39].

Para poder utilizar ATAK en los ejercicios con los Infantes de Marina es necesario adaptar las radios para que aguanten a la dureza del campo pero que a su vez proporcionen comodidad al operador que la lleve puesta. Con ese fin, se han impreso fundas ergonómicas en las radios que permiten la inclusión en estas a las mochilas de combate que llevan los infantes, terminando con un resultado que se muestra en la figura incluida a continuación.



Figura 2-16. Funda impresa en 3D para adaptarla al campo.

3 LoRa

3.1 Características generales de LoRa.

La tecnología LoRa, acrónimo de Long Range, es una tecnología emergente en el mundo de las telecomunicaciones especialmente útil en aplicaciones en las que se necesite un largo alcance con un consumo mínimo, ya que permite alcances de más de 10 millas con duraciones de batería de unos 10 años [40].

La tecnología LoRa se utiliza en proyectos en los que tecnologías como Zigbee, WIFI o Bluetooth no son útiles, ya que, por lo general, tienen menos alcance y mayor consumo, aunque tienen una mayor tasa de bits. Su gran alcance viene determinado en gran medida por la frecuencia de operación (dependiendo del área geográfica en las bandas de 433 MHz, 868 MHz ó 915 MHz) ya que mejora el alcance de transmisión y la penetración en comparación con otras frecuencias como la de 2,4 GHz (utilizada, por ejemplo, en las redes WIFI). Además, el uso de estas frecuencias sub-GHz permite que los equipos que operan con LoRa sean más económicos.

La señal LoRa se basa en la modulación digital de la señal mediante chirps, con una variación de la frecuencia de manera lineal para codificar la información. Esto significa que distribuye la energía a lo largo de un espectro de frecuencias, proporcionando a la señal robustez frente al ruido e interferencias y una comunicación confiable a larga distancia.

La principal ventaja de LoRa frente al resto de tecnologías existentes es que con un consumo muy bajo de energía se pueden alcanzar distancias muy largas. En la siguiente figura se muestra una comparación de las principales tecnologías de telecomunicaciones comparando el rango con la eficiencia energética y como se posiciona LoRa entre las mismas.

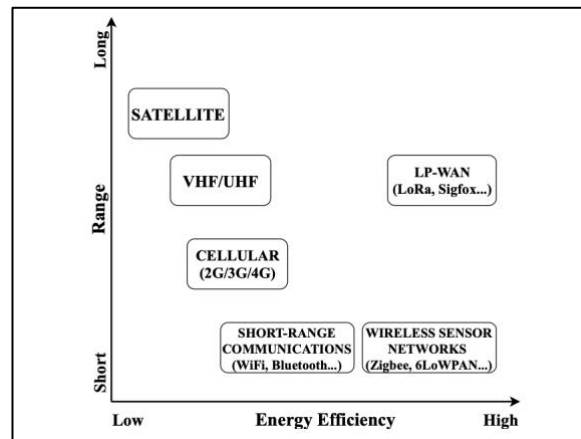


Figura 3-1. Comparativa del rango de transmisión y la eficiencia energética de distintas tecnologías [41].

3.2 Parámetros de configuración de la señal.

La señal transmitida dentro de la tecnología LoRa se puede configurar en base a tres factores, que variarán su comportamiento tanto en tasa de paquetes enviados como en robustez y alcance. Estos tres parámetros son:

- El **factor de ensanchado** determina la velocidad de transmisión del chirp, y por ello la velocidad a la que se transmiten los datos a partir de la dispersión que sufren las portadoras de datos dentro del espectro (LoRa utiliza una modulación de espectro ensanchado). Un factor de ensanchado bajo implica un tiempo menor por cada chirp y por ello una velocidad de transmisión más alta. Por cada aumento en el factor de ensanchado el tiempo de duración del chirp se duplica y la velocidad de transmisión se divide a la mitad.

Asimismo, hay que destacar que un factor de ensanchado bajo implica también que, pese a que la tasa de envío de bits sea mayor, su alcance se ve reducido. Mientras que al aumentar el factor de propagación se aumenta la robustez del paquete y se aumenta el alcance de transmisión. La modulación LoRa tiene 6 factores de dispersión distintos, desde un SF=7 a un SF=12.

Por último, es importante destacar que la elección del factor de ensanchado también afectará a la duración de la batería en el dispositivo, ya que un factor de propagación elevado provoca que el receptor de la radio este más tiempo activo y la batería se consuma más rápido. En la siguiente figura se pueden comparar los distintos factores de dispersión disponibles en LoRa y la duración del chirp en cada uno de ellos [42].

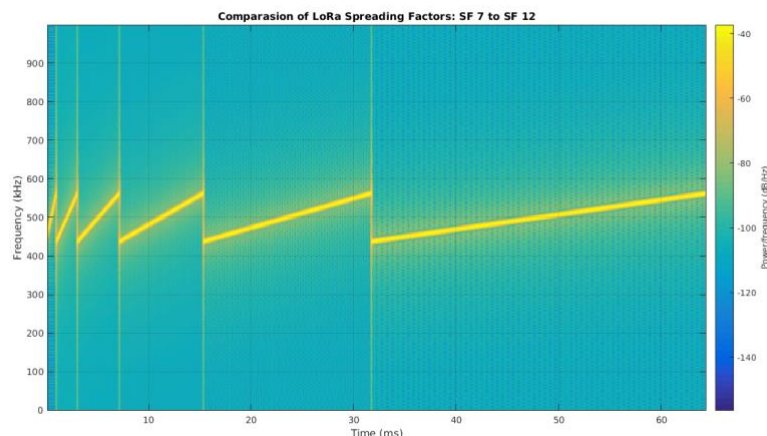


Figura 3-2. Comparativa entre los distintos Factores de dispersión disponibles en LoRa [43].

- El **ancho de banda** es el rango de frecuencias ocupadas por la señal modulada. Influye notablemente en la velocidad de transmisión, ya que a medida que aumenta obtendremos una velocidad mayor, con la contraposición de que el alcance se verá limitado. Teóricamente, cada vez que se duplica el ancho de banda se reduce el alcance del enlace a la mitad aumentando la probabilidad de pérdidas en la transmisión. Los anchos de banda más utilizados en LoRa son 125, 250 y 500 kHz [41]. En la siguiente figura se muestra una caracterización de un chirp de LoRa de duración temporal de un símbolo (“symbol duration, SD”) con el ancho de banda BW señalado.

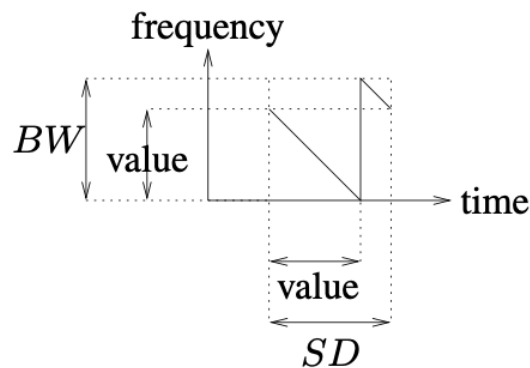


Figura 3-3. Ejemplo de un chirp LoRa en el que se puede ver el ancho de banda utilizado (BW) [44].

- La **tasa de codificación** es la proporción de bits en un paquete de datos que lleva información relevante. Existen 4 tasas de codificación distintas en LoRa: 4/5, 4/6, 5/7 y 4/8. De esta manera, el primer número de la pareja es la cantidad de bits con información y el segundo, el tamaño total del paquete. Esta tasa se emplea debido a que el método que se utiliza para lograr subsanar los errores en la transmisión es la corrección de errores hacia delante, proceso que consiste en añadir bits redundantes al paquete de datos.

Como el resto de los parámetros, sus cambios afectan a la velocidad de transmisión de paquetes. Ya que, si la tasa de codificación es 4/8 va a haber que mandar prácticamente el doble de paquetes que en la 4/5, por lo que la tasa de bits útiles va a ser casi la mitad [45].

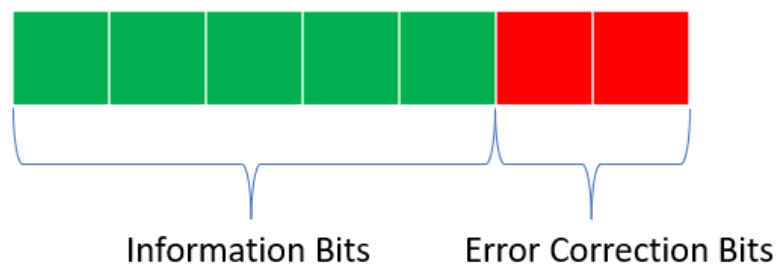


Figura 3-4. Ejemplo de bits de redundancia en un paquete [45].

- Por último, aunque no es un parámetro como tal ya que depende del ancho de banda y del factor de ensanchado, la **tasa de símbolos** es un valor que nos indica la cantidad de símbolos que se emiten por segundo. Es importante destacar que cada símbolo puede representar más de un bit de datos en función de la modulación utilizada. Por ejemplo, si el factor de propagación es 7 significa que tiene 7 bits (es decir, 2^7 posibles símbolos). La tasa de símbolos por segundo R_s se puede relacionar con el ancho de banda BW de la modulación, el factor de ensanchado SF y la tasa de codificación R_c como se presenta en la siguiente ecuación obtenida de [46].

$$R_s = \frac{BW}{2^{SF}} = \frac{RC}{2^{SF}} \left[\frac{\text{simbolos}}{s} \right] \quad (1)$$

3.3 Ciclo de trabajo.

Un aspecto importante de los sistemas radio es el ciclo de trabajo. El ciclo de trabajo se define como la relación entre el tiempo de transmisión activa (típicamente el tiempo durante el cual un transmisor está transmitiendo una señal) y el período total del ciclo, expresado como un porcentaje. Por ejemplo, si un dispositivo transmite durante 2 segundos para posteriormente mantenerse en silencio los siguientes 8 segundos, su ciclo de trabajo será del 20%.



Figura 3-5. Ejemplificación de un Ciclo de trabajo del 20% [47].

El ciclo de trabajo afecta directamente al consumo de energía de los dispositivos y a la eficiencia espectral de la red. Un ciclo de trabajo bajo reducirá el consumo, pero aumentará la latencia, mientras que un ciclo alto proporcionará más fluidez a la comunicación con un consumo más elevado.

Es importante destacar que el ciclo de trabajo está limitado por los distintos gobiernos y que, en España está regulado por el cuadro nacional de atribución de frecuencias. Este señala que el ciclo de trabajo máximo para dispositivos de baja potencia que emiten sin licencia en la banda de 868 MHz es del 1%. Esto implica que nuestra emisión debe estar limitada para cumplir la regulación vigente [48].

3.4 SNR y RSSI.

Para lograr que un sistema radio funcione correctamente es necesario que al receptor llegue un nivel de señal con una potencia suficientemente elevada para superar, en general, tanto la sensibilidad del receptor como el ruido que pueda haber en el ambiente. Es por ello, que existen dos términos que es necesario desarrollar para poder estudiar la viabilidad de la conexión LoRa. Estos dos términos son la relación entre la señal recibida y el ruido (“Signal to Noise Ratio, SNR”) y el indicador de fortaleza de la señal recibida (“Received Signal Strength Indicator, RSSI”).

- **SNR**, el “*signal to noise ratio*”, o relación señal a ruido, se expresa como la diferencia entre la potencia recibida y la potencia de ruido. Se suele utilizar para determinar la calidad de la señal. Como parece lógico, lo normal es que, si el nivel de ruido es superior a la potencia de la señal recibida, sea imposible descifrar la señal. En el desarrollo de este trabajo, se demostrará que la tecnología LoRa sí es capaz de demodular la señal recibida, aunque el nivel del SNR sea negativo. Dependiendo del factor de ensanchado, la siguiente tabla muestra los valores típicos de SNR mínimos que se pueden demodular según las especificaciones técnicas del chip LoRa SX1276 de Semtech, incluido en el T-Beam de Lilygo.

<i>SpreadingFactor</i> (RegModulationCfg)	Spreading Factor (Chips / symbol)	LoRa Demodulator SNR
6	64	-5 dB
7	128	-7.5 dB
8	256	-10 dB
9	512	-12.5 dB
10	1024	-15 dB
11	2048	-17.5 dB
12	4096	-20 dB

Tabla 3. Relación de factores de dispersión con el SNR mínimo [49].

- **RSSI**, “*received signal strength indicator*”, o indicador de la fuerza de la señal recibida, es una medida relativa que nos ayuda a determinar si una señal recibida es lo suficientemente fuerte para obtener una buena conexión inalámbrica. Se mide en dBm y su valor se mide de manera negativa. Cuanto más alto sea el valor de la potencia recibida, su valor será más cercano a cero. El chip LoRa SX1276 lo calcula mediante la siguiente fórmula obtenida de las características técnicas del chip [49]:

$$RSSI(dBm) = -157 + RSSI \quad (2)$$

en la que el RSSI que se suma es un valor obtenido por el propio chip en la recepción del mensaje.

3.5 BER

La tasa de bit erróneo (“*Bit error Rate*”, *BER*), es un parámetro que se utiliza para cuantificar la calidad de la conexión midiendo la cantidad de bits recibidos de manera errónea, o directamente no recibidos, en una comunicación entre dos dispositivos de entre los bits totales. La siguiente figura muestra la distribución típica de esta probabilidad en función del factor de ensanchamiento SF. Como se puede observar, a medida que aumenta SF la probabilidad de error de bit disminuye para una relación señal a ruido dada.

En la primera gráfica se muestra la tasa de bits erróneos frente al Eb/No. La segunda gráfica aclara de manera más gráfica uno de los factores diferenciadores de LoRa. Que es capaz de recibir mensajes con SNR negativos y aun así teniendo BER muy bajos. Como resulta evidente, los mensajes con SF más altos tienen una robustez mayor, y con niveles más altos de ruido tienen una tasa de bits erróneos mucho menor.

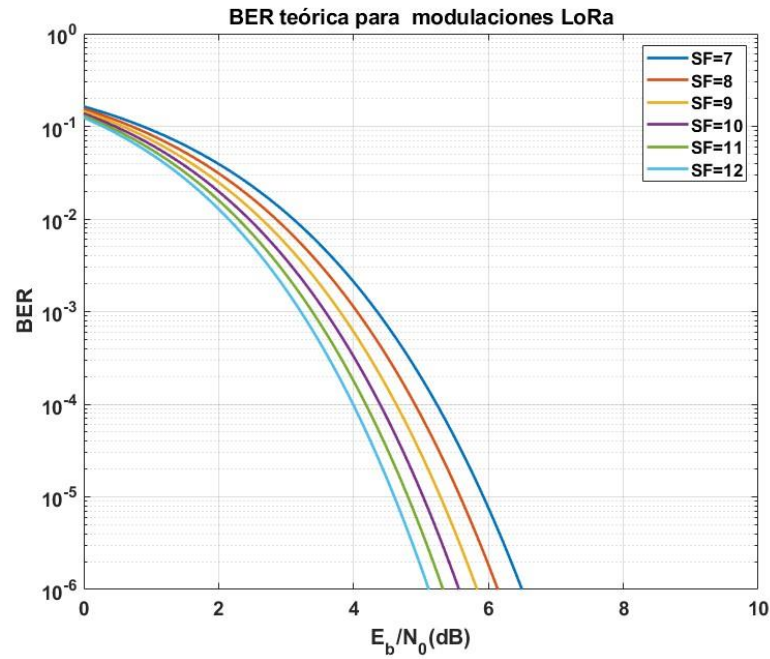


Figura 3-6. Variación del BER frente al E_b/N_0 . Matlab.

Figura 3-7. Variación del BER frente al E_b/N_0 . Matlab.

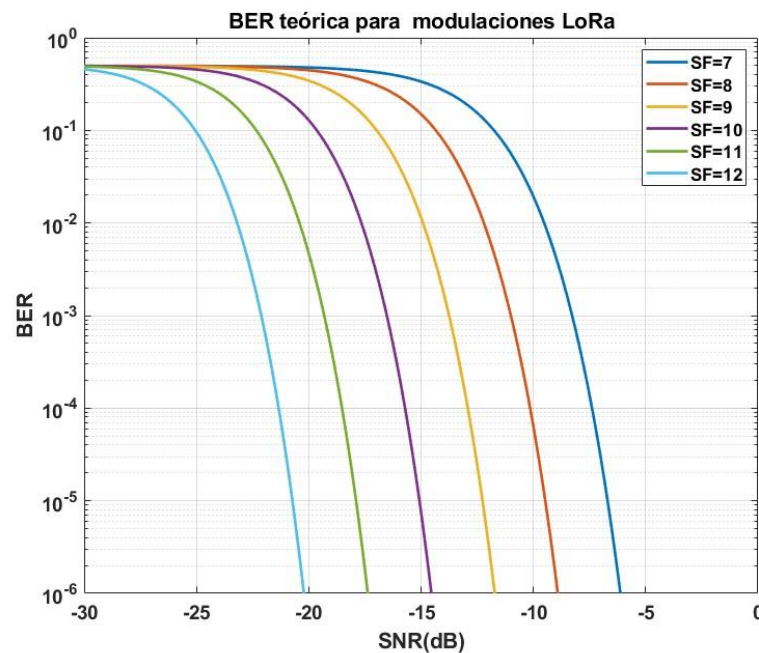


Figura 3-8. Probabilidad de error con relación al SNR para los distintos factores de dispersión. Matlab.

El BER puede variar en función de distintos factores relacionados a la señal LoRa. Los principales son:

- **SNR**, la relación señal a ruido, como se muestra en las gráficas, es un elemento determinante en la tasa de bits erróneos de una transmisión, a mayor SNR se presupone que habrá una BER menor[50].

- El **ancho de banda**, un ancho de banda más estrecho mejora la sensibilidad y reduce la BER, con la contraposición de que reducirá la tasa de bits.
- **Potencia de transmisión**, a medida que la potencia aumenta se reduce la posibilidad de que se produzcan errores en la transmisión de los bits.
- **Distancia**, como resulta evidente, a medida que la distancia entre nodos aumenta la posibilidad de que surjan errores aumenta, ya que la señal llegará con menos potencia al receptor.
- **Tasa de Codificación**, la función principal de esta tasa es la de solventar posibles errores en la transmisión del paquete, por lo que una tasa con más bits de redundancia reducirá la posibilidad de que se produzcan errores en la comunicación.
- **Factor de ensanchado**, como se ha reflejado previamente, este factor tiene una influencia directa en la posibilidad de que se reciban bits de manera errónea[51].

La BER en LoRa se puede caracterizar mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{E_b}{N_o} = SNR \times \frac{B}{R} \quad (3)$$

siendo B el ancho de banda y R la tasa de símbolos por unidad de tiempo. La sensibilidad, medida en mW, viene dada a partir del nivel de ruido N_o en unidades logarítmicas por:

$$N_o = 10^{\frac{N_o(dBm)}{10}} \quad (4)$$

3.6 LoRaWAN.

En la capa de red, la tecnología LoRa se implementa mediante LoRaWAN, un protocolo que proporciona control de acceso al medio (MAC). LoRaWAN permite la comunicación entre multitud de dispositivos a través de gateways, que actúan como routers que unen la red LoRa a Internet. De esta forma, las redes que no están conectadas directamente por radiofrecuencia pueden comunicarse con otras que sí lo están a través de estas pasarelas.

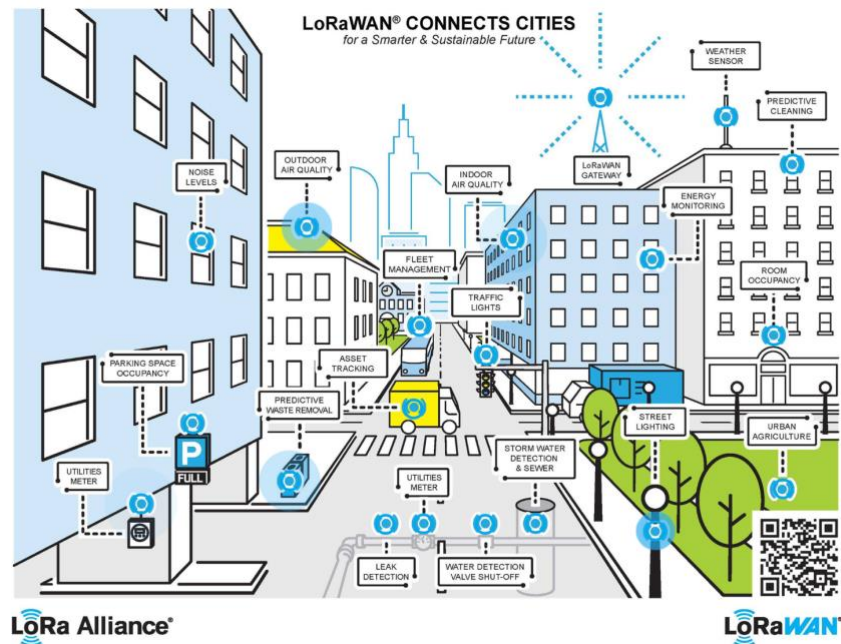


Figura 3-9. Ejemplo de ciudad inteligente con LoRaWAN[52].

Un ejemplo de aplicación de estas redes, basadas en LoRaWAN, es el que se hace en “*The Things Network*”. Un proyecto que usa gateways de particulares para crear una red con alcance prácticamente a nivel global. En la página web “ttnmapper.com” se puede comprobar los nodos disponibles en tiempo real y algunos datos históricos sobre su cobertura. De este modo, se dispone de una red descentralizada en la que cualquier dispositivo puede conectarse a un nodo público para transmitir su información.

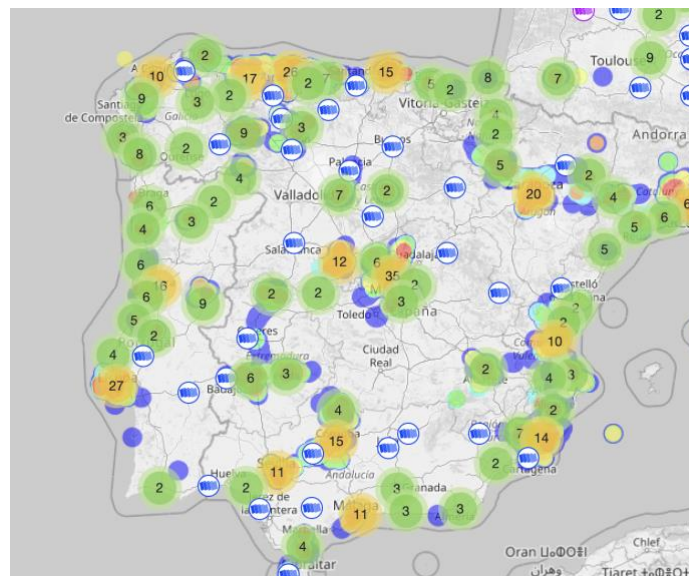


Figura 3-10. Imagen de la cobertura de TTN en España [53].

3.6.1 Topología de LoRaWAN

La arquitectura de una red LoRaWAN se implementa en lo que se conoce como una topología de “estrella de estrellas”, en la que las pasarelas transmiten los mensajes de los dispositivos conectados a la red a un servidor central. Estas pasarelas funcionan de manera transparente. Es decir, transmiten directamente los paquetes que le llegan mediante radiofrecuencia convirtiéndolos en IP y viceversa [54].

En la siguiente figura, se puede observar la topología de una red LoRaWAN, en la que los dispositivos finales se conectan directamente a sus routers (o gateways), y se crean redes comunicadas entre sí mediante el protocolo MAC.

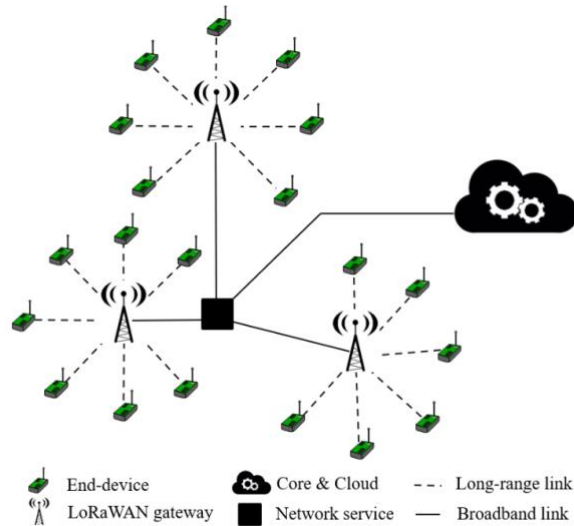


Figura 3-11. Topología de una red LoRaWAN [41].

4 DESARROLLO DEL TFG

Una vez realizado un breve análisis de los sistemas de comunicaciones navales, de los métodos de posicionamiento de buques y de las tecnologías de IOT existentes en la actualidad; centrándonos especialmente en la tecnología LoRa y exponiendo las características que la convierten en la tecnología óptima para el desarrollo de una red de mando y control alternativa, en el presente capítulo se expondrá el desarrollo de la red y las pruebas que se han llevado a cabo para comprobar su rendimiento.

Asimismo, se desarrollarán los distintos equipos que se han utilizado como nodos de la red, con sus características principales de trabajo. La configuración que se ha tenido que realizar para el correcto funcionamiento de esta, centrándose especialmente en la realizada para la prueba de alcance y para el establecimiento final de la red. Teniendo en cuenta los principios de **seguridad**, mediante el cifrado de las comunicaciones entre los nodos; **rapidez**, teniendo en cuenta la tasa de bits asociada a cada modo de envío y **confianza**, comprobando la tasa de pérdida de bits con cada factor de dispersión.

4.1 Descripción de los equipos.

4.1.1 Lilygo t-beam Meshtastic.

El componente central del proyecto es la placa de la marca Lilygo®, concretamente la placa T-Beam. Es un dispositivo de comunicación basado en la tecnología LoRa, con un gran alcance y bajo consumo, con un gran número de posibilidades y prestaciones que se desarrollarán a continuación.

La placa está basada en el microcontrolador ESP-32, un chip que incluye WI-FI de 2,4 GHz y BLE (“*Bluetooth low energy*”). Además, dispone de un conector micro-USB y tres botones para la interacción entre el dispositivo y el usuario.

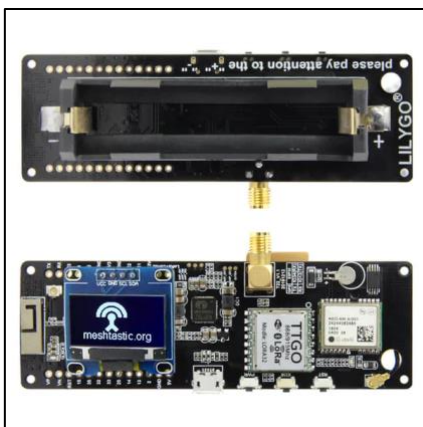


Figura 4-1. Placa Lilygo T-Beam [55].

4.1.1.1 Transceptor LoRa.

El transceptor LoRa SX1276 tiene una frecuencia de trabajo de 868 Mhz, la frecuencia permitida y de banda libre en Europa para tecnología LoRa. El transceptor LoRa es capaz de transmitir 300 kbps y tiene una sensibilidad que puede alcanzar los -148 dBm para determinadas configuraciones. La potencia de transmisión del dispositivo está limitada por la normativa europea a 14 dBm (ó 25 mW) [48], aunque podría llegar a trasmitir 16 dBm (ó 40 mW).

4.1.1.2 Módulo GPS.

La situación GPS de la placa se obtiene mediante el módulo NEO-6M que trabaja con un voltaje de 3,3V y tiene capacidad de obtener la posición cada 27 segundos. Está específicamente diseñado para trabajar con microcontroladores como Esp32 o Arduino. Dispone de una antena cerámica con -156 dBm de sensibilidad. Tiene una precisión en la posición de 2m, que mejora a medida que aumentan las conexiones satelitales, en la velocidad de 0,1 m/s y en el rumbo de 0,5 grados. Por último, su velocidad máxima es de 500 m/s.

4.1.2 Batería Li-Ion 18650.

Esta batería es la encargada de proporcionar al dispositivo la energía necesaria para funcionar. Tiene una capacidad de 2400 mAh. Proporcionan una tensión mínima de 2,75V y una máxima de 4,2V a carga completa. Tiene una vida útil de 600 ciclos de carga/descarga [56].



Figura 4-2. Baterías Li-Ion [56].

4.1.3 Pantalla Oled.

El dispositivo cuenta con una pantalla Oled de 0,96 pulgadas que permite visualizar la mayoría de la información relevante para el funcionamiento de la red. La pantalla se incluye con la placa, con la posibilidad de obtenerla soldada o sin soldar al circuito.



Figura 4-3. Pantalla OLED integrada en la T-Beam [55].

4.1.4 Antena LoRa.

En el proyecto se utilizará una antena LoRa de 1 dB de ganancia, incluida en el paquete del T-Beam. La antena tiene la longitud adecuada para emitir la señal a una frecuencia de 868 MHz, ya que al ser una antena de tipo dipolo esta longitud garantiza una máxima ganancia (por tener una longitud igual a la mitad de la longitud de onda transmitida, es decir, 0,1725 metros).

Debido a que los nodos operarán en un ambiente húmedo, en el que es posible que las condiciones meteorológicas sean adversas, se ha decidido poner los nodos dentro de cajas con estanqueidad IP55, es decir, protección contra chorros de agua y polvo [57]. Por ello, la antena está conectada con un cable coaxial al dispositivo, dejándola así fuera de la caja. Quedando el montaje del hardware como se refleja en la siguiente figura.



Figura 4-4. Hardware montado para el proyecto. Autoría propia.

4.2 Configuración inicial de la red.

Como se ha señalado previamente, Meshtastic permite realizar un gran número de ajustes para optimizar el uso de la red en función del uso que queramos darle. Una vez se ha instalado el firmware de Meshtastic en el dispositivo, es necesario establecer la región en la que se encuentra el dispositivo, por ejemplo, en Europa a 868 MHz. Para ello, es necesario conectarse previamente al T-Beam.

Existen tres maneras para hacerlo en función de la tecnología utilizada:

- Por bluetooth, tanto desde la aplicación como desde la web “*client.meshtastic.org*”, en la que será necesario vincularse mediante un pin, generado aleatoriamente con cada nueva conexión, y que será mostrado en la pantalla OLED del dispositivo.
- Por cable serial, en este caso solo se podrá establecer la conexión desde la web.
- De manera inalámbrica, desde la web. En este caso hará falta conectarse a la dirección IP mostrada en la pantalla OLED del T-Beam.

A continuación, con la región ya establecida, se pueden comenzar a configurar el resto de los parámetros de la red. La configuración se divide en dos partes, configuración de la radio y configuración de los módulos. En los siguientes puntos se desarrollarán las opciones que se han modificado en el proyecto.

4.2.1 Configuración de la radio.

En este apartado se recogen las configuraciones que permiten variar el funcionamiento interno de la radio:

- “**Channels**”, en este apartado podremos establecer nombres para los canales. Es necesario que exista, como mínimo, un canal principal. Aparte de este, se pueden añadir hasta ocho canales secundarios. Además, se puede establecer una clave de encriptación para el canal, teniendo opción de elegir entre no encriptar el canal, hacerlo con AES-128 (16 bytes) o hacerlo con AES-256 (32 bytes). Es importante resaltar que para que la comunicación sea funcional es necesario establecer la misma clave en todos los nodos que tengamos dentro del canal.
- “**Device**”, sirve para modificar los roles de cada nodo. Existen 9 roles distintos, los dos únicos que destacaremos son:
 - “Cliente”, es el modo por defecto. Tiene todas las funciones activadas, y se puede controlar el nodo desde las aplicaciones.
 - “Router”, útil en el caso de que se quiera tener un nodo fijo por el que pasen los mensajes de la red. Para ello es necesario que esté en una posición estratégica. Activar este modo desactiva automáticamente el sistema de la WIFI y del Bluetooth y le da prioridad a la hora de retransmitir mensajes del resto de los nodos.

Otro parámetro importante que se puede variar en este apartado es “*node info broadcast seconds*”, que permite variar el tiempo en el que el nodo transmitirá al resto de la red información relevante sobre el mismo, como el estado de la batería.

- “**Display**”, permite variar elementos como:
 - Duración de la pantalla OLED encendida.
 - Activar una brújula en la pantalla que siempre apunte al norte.
 - Variar el formato del GPS.
 - Cambiar entre unidades del sistema métrico internacional o el sistema imperial.
- “**LoRa**”, en este apartado se modifican aspectos relativos a la señal. Para este trabajo es, si no el más importante, si el que más va a modificarse; ya que se medirá la variación de parámetros como la SNR o el RSSI con relación a la distancia y se comparará con los distintos valores de ancho de banda, factor de propagación y tasa de codificación. Los apartados modificables son:
 - **Región.** Es el primer parámetro que hay que establecer. En función de la zona geográfica y la frecuencia que va a ser utilizada en nuestra red, en el caso de este trabajo, se selecciona Europa 868 MHz.
 - “**Modem preset**”, en este apartado se puede establecer un modo de comunicación predefinido en la que los tres parámetros mencionados previamente se modifican para proporcionar hasta ocho modos distintos. Desde “*short fast*”, el modo más rápido, con el mayor ancho de banda, el menor factor de ensanchado y el menor alcance; hasta “*very long slow*”, con el menor ancho de banda, mayor factor de ensanchado y mayor alcance.
 - “**Max hops**”. Establece el número de saltos que realiza un mensaje en su transmisión. Está establecido por defecto en tres y como máximo se puede cambiar a siete.



Figura 4-4. Ejemplificación de los saltos de un mensaje [37].

- **Potencia de transmisión.** Si se establece en cero, emitirá con la potencia máxima permitida en la región que se haya determinado. Por defecto viene establecida en 30 dBm.
- **Ancho de banda.** Se puede variar desde 31,25 kHz hasta 625,0 kHz. Este parámetro se puede cambiar independientemente del modo predefinido seleccionado anteriormente. Si se selecciona un ancho de banda menor de 62,6 kHz será necesario hardware adicional para decodificar la señal.
- **Factor de ensanchado.** Permite seleccionar un factor de ensanchado del espectro entre 7 y 12. Permite establecer el número de chirps por símbolo.

- **Factor de codificación.** Al igual que con el ancho de banda y el factor de ensanchado, este apartado permite variar entre los distintos disponibles para LoRa.
- **Limitación del ciclo de trabajo.** Para Europa está limitado al 10%, aquí se puede desactivar la limitación para poder transmitir sin límite.
- **Ganancia de recepción.** Si se activa este parámetro, el chip LoRa es capaz de mejorar la ganancia que tiene en la recepción de la señal a cambio de un ligero aumento en el consumo del chip.
- **“Red”.** En el presente apartado se puede activar el WIFI para conectarse a una red y conectarse por este medio a la radio. Es importante destacar que una vez se enciende el WIFI el Bluetooth se desconecta. Además de encender el WIFI, el apartado de red permite algunos cambios como establecer una IP fija o conectar la radio por Ethernet.
- **“Posición”.** En los ajustes de la radio existe la posibilidad de modificar los parámetros relacionados con el GPS. Entre otros ajustes, permite:
 - Modificar el **intervalo de actualización** del GPS.
 - Establecer una **posición fija**, en el caso de que no se vaya a mover el nodo.
 - **Posición inteligente**, para evitar consumos muy altos en la radio, se puede configurar de modo que, en el caso de que la posición no varíe en el tiempo, esta no vuelva a retransmitirse por la red.
 - **Modificar qué datos se retransmiten.** Dependiendo de la aplicación que se quiera dar al dispositivo, se puede decidir qué datos se retransmiten por la red. Como la altitud, la velocidad o el número de satélites que se tienen a la vista.
- **“Usuario”.** En este apartado se establece el nombre que se le quiere dar al nodo. Se puede elegir un nombre largo, que es el que saldrá en la aplicación al buscar al resto de nodos; y un nombre corto, que es el que saldrá al conectarse por bluetooth.

4.2.2 Configuración de los módulos.

Los módulos son funcionalidades que se han ido añadiendo al firmware de Meshtastic para que los usuarios puedan optimizar el uso que dan a la red. Los módulos más importantes y que tienen mayor relación con el proyecto son:

- **Mensajes enlatados.** Este módulo permite establecer mensajes predefinidos para que la radio sea capaz de enviarlos sin la necesidad de conectarse a la aplicación móvil o del ordenador. Para ello, es necesario seleccionar los mensajes que se querrán enviar previamente y los pines de la radio en la que estará conectado el teclado o el codificador rotatorio.

Esta funcionalidad es especialmente útil para personal de infantería de marina que lleve el dispositivo, ya que le permitiría enviar mensajes al resto de batallón sin la necesidad de cobertura móvil o un teléfono conectado.

- **MQTT.** Gracias a este módulo, si un nodo está conectado a internet, puede comunicar dispositivos de otras redes con los de la red del nodo. Existe un servidor público en el que se

puede conectar el dispositivo, pero también existe la posibilidad de crear un servidor privado para comunicar de manera más privada los nodos.

- **Test de alcance.** Este módulo es el que más importancia cobra en el trabajo, ya que se realizarán pruebas de alcance de la red y se comprobará como disminuye la potencia recibida a medida que la distancia aumenta. En el Anexo III se muestra una variación que fue realizada en el código disponible por el fabricante para poder mostrar el RSSI, ya que con el código original que estaba incluido en el firmware no se contemplaba esa necesidad.

En la prueba de alcance, además, se puede seleccionar el intervalo con el que se mandarán mensajes de prueba y la posibilidad de que se guarden los resultados en un archivo .xml (debido a que el módulo ESP32 dispone de 8 MB de memoria PSRAM y 4 MB de memoria Flash) que luego podrá ser utilizado, como es en el caso de este proyecto, para comprobar los alcances y la variación de la potencia recibida.

- **“Traceroute”.** Este módulo tiene una utilidad especial a la hora de conocer la topología de la red, ya que permite conocer cuál es el camino que sigue un mensaje al tratar de comunicarse con un nodo. En el caso de que un mensaje de saltos por otros nodos quedará reflejado.

Una vez explicadas las modificaciones que se pueden realizar en las radios, se pasará a desarrollar las pruebas que se han realizado para implementar la red.

4.2.3 Configuración para las pruebas de alcance.

Para realizar las pruebas de alcance se van a crear tres redes independientes con dos nodos cada una de ellas y configuraciones distintas, para así observar cómo varía la señal con la distancia dependiendo de la configuración y determinar cuál es la configuración óptima para crear la red mallada en la flota de lanchas.

Para la primera prueba de alcance las redes utilizadas fueron las reflejadas en la siguiente tabla:

Nombre	Nodos	SF	BW	CR	N. Saltos	Potencia
Long Fast	1 y 4	11	250	4/5	1	27 dBm
Short Fast	5 y 6	7	250	4/5	1	27 dBm
Long moderate	2 y 3	11	125	4/8	1	27 dBm

Tabla 4. Configuraciones de señal elegidas para la prueba. Elaboración propia.

Como se ha señalado previamente, el módulo de “Range test” proporciona un archivo .csv que puede ser visualizado conectándose al servidor creado por la placa Esp32 introduciendo en el buscador “IP/rangetest.csv”.

Este archivo muestra, en forma de tabla, los siguientes datos:

- **Time**, hora del envío del paquete.
- **From**, Identificador del nodo que envía.
- **sender name**, nombre asociado a ese nodo.

- **sender Lat**, latitud del nodo que envía.
- **Sender long**, longitud del nodo que envía.
- **Rx Lat**, latitud de recepción.
- **Rx long**, longitud de recepción.
- **Elevation**, elevación del nodo receptor.
- **rx snr**, SNR que obtiene el receptor.
- **rx rssi**, RSSI del paquete recibido.
- **Distance**, distancia entre ambos nodos.
- **Hop limit**, límite de reenvío de nodos que se ha establecido.
- **Payload**, datos que se envían en el paquete, en este caso (seq1, seq2...).

Una vez decidido que modos usar para la prueba, es necesario crear las tres redes con sus respectivas configuraciones. Para ello y a modo de ejemplo, se va a desarrollar la configuración de una de las redes, habiéndose realizado de manera análoga con las otras dos.

De las configuraciones explicadas previamente, es necesario modificar cuatro de ellas:

- **“Channels”**, en el que se establece un nombre para la red, en este caso el nombre es similar al de la configuración que se va a realizar, por ejemplo, “long fast”. Y además se crea una clave de encriptación de 256 bits para añadir seguridad a la red.
- **“LoRa”**, en este apartado se establece el modo de trabajo, “long fast”, y se establece el límite de saltos, que para la prueba de alcance se fija en 1, para evitar que el mensaje salte en ningún otro nodo y aumente el alcance real.
- **Posición**, es necesario reducir el intervalo de actualización del GPS para que este sea menor que el intervalo de mensajes de la prueba de alcance.
- **“Range test”**, finalmente es también necesario activar en ambos módulos la prueba de alcance; activar el intervalo de envío de paquetes, establecido en 30 segundos para el presente ensayo y activar la opción para que se guarden los datos en el csv.

Tras haber realizado estas modificaciones, se puede generar un código QR que lleva integrada toda la configuración que se ha realizado en el nodo. Incluyendo el canal, la clave de encriptación y la configuración de LoRa (Factor de ensanchado, tasa de codificación y ancho de banda). Por lo que en el segundo nodo que se va a emparejar únicamente será necesario fotografiar el QR con un teléfono emparejado al nodo y automáticamente se aplicarán todas las configuraciones de la red.



Figura 4-5. Ejemplo de QR generado por un nodo. Elaboración propia.

Con las tres parejas configuradas, el siguiente paso a seguir es elegir los puntos en los que realizar la prueba de alcance. Se ha elegido realizarla en la ría de Pontevedra, estableciendo un nodo de cada pareja fijo en la Escuela Naval y otro móvil en las lanchas de instrucción, aprovechando sus salidas a la mar para adiestramiento de los alumnos.

Realizando una estimación con los parámetros asociados a nuestros dispositivos y la configuración que le hemos dado a la red, se espera una cobertura de nuestra red similar a la que se muestra en la siguiente figura. Esta cobertura se ha obtenido a partir de un software de simulación de señales ampliamente utilizado en el mundo de las radiocomunicaciones, “*tower coverage*” [58].

Cabe destacar que la simulación se ha realizado con una comunicación entre dos nodos sin saltos, pero en cuanto la red esté compuesta por varios nodos realizando saltos entre ellos, el aumento de alcance será significativamente mayor.

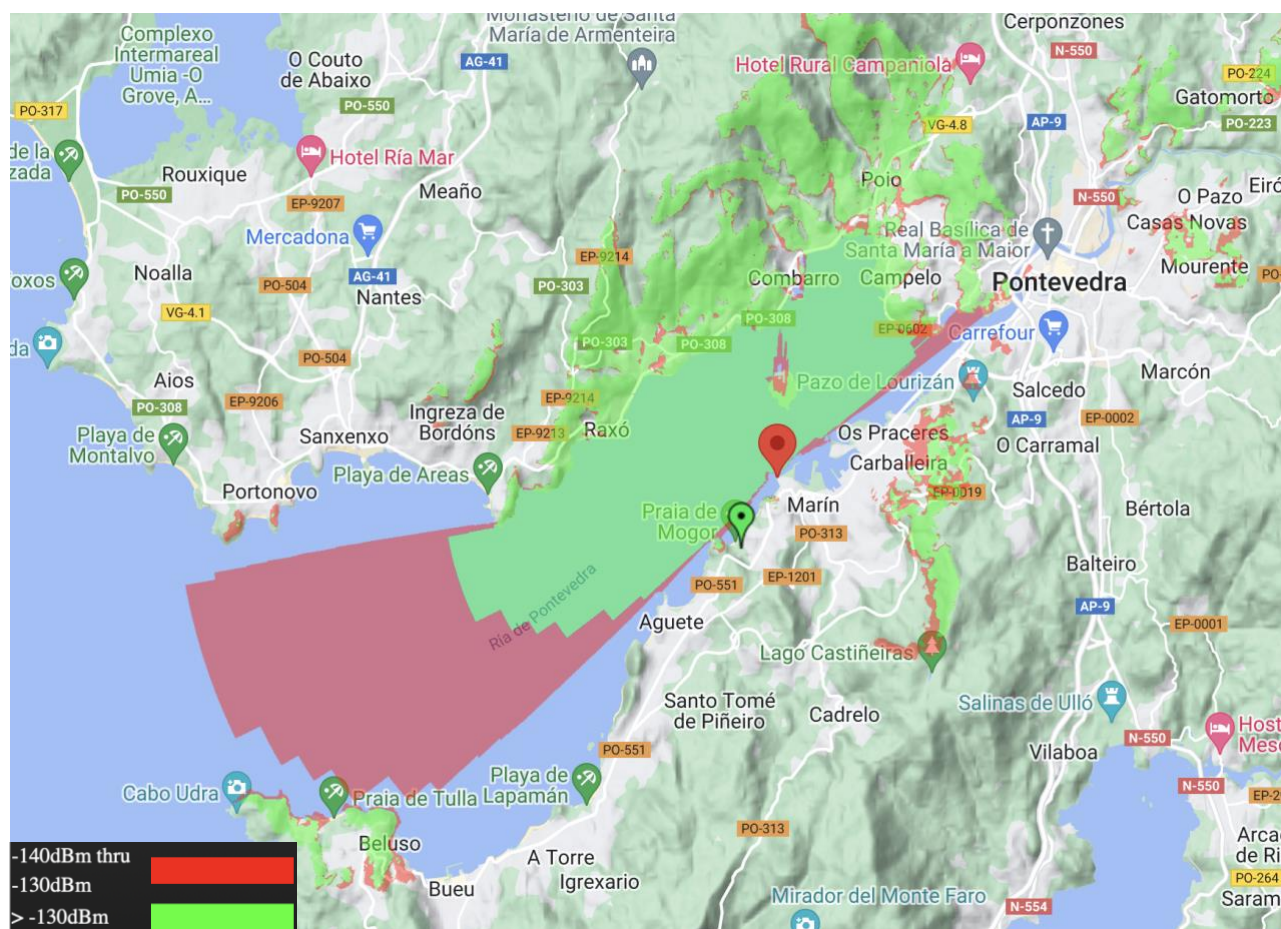


Figura 4-6. Cobertura teórica de la antena situada en la Escuela Naval[58].

Antes de ejecutar la prueba descrita, se realizó una prueba con dos nodos en la que se configuraron ambos en modo Long Range. La prueba se hizo en la pista militar de la Escuela Naval, en espacio libre con línea directa de visión. Los datos extraídos de la misma se exponen en el apartado de resultados.

4.2.4 Configuración para el establecimiento de la red de mando y control.

Una vez realizada la prueba de alcance con resultados satisfactorios, el siguiente paso a seguir es implantar la red de mando y control de las lanchas de instrucción. Para ello, es necesario decidir los parámetros de la red para optimizar su uso.

Atendiendo a las tres características previamente mencionadas: rapidez, confianza y seguridad; los parámetros de la red que es necesario tener en cuenta son los siguientes:

- Con relación a la **seguridad**, es evidente que es necesario que la comunicación sea cifrada, por lo que se establecerá un cifrado simétrico AES256 con una clave que se cambiará cada día de navegación. Asegurando así la seguridad en las comunicaciones.
- La **confianza** y la **rapidez**, en este caso van parejas, ya que los enlaces con mayor alcance, es decir, con mayor factor de ensanchado; son a su vez los que tienen una tasa de bits menor. Es por ello por lo que se ha decidido equilibrar las prestaciones entre ambas estableciendo la señal en la definida previamente como “Long Fast”, con un factor de ensanchado de 11, ancho de banda de 250 kHz y tasa de codificación de 4/5.

Una vez elegidas las características de la señal LoRa, es necesario implementarla en cada nodo de la red. Para ello el siguiente paso a seguir es modificar los siguientes apartados desde la aplicación móvil o del ordenador:

- En el apartado de “**LoRa**” se establece el canal predefinido como Long fast, con un “*number of hops*” de 3.
- En “**Channels**”, se crea un canal secundario con el nombre “ENM” y se establece una clave de encriptación de 256 bits. La clave se puede escribir, pero también puede generarse de manera aleatoria.
- En el apartado “**Device**” se pone el rol de cliente en todos los nodos.
- En **Posición** se establece un intervalo de actualización de 1 minuto, para mantener a la fuerza informada de la ubicación del resto de unidades.
- Por último, a cada nodo se le asigna el nombre de la lancha

Una vez esa configuración se ha realizado en uno de los nodos, esta puede ser trasladada al resto simplemente mediante una fotografía al código QR, que se propone que sea enviado junto a la instrucción de lanchas semanal, de manera que la configuración de los nodos sea más eficaz.

Tras haber establecido la red en todos los nodos, la presentación de la aplicación queda reflejada como se muestra en la siguiente figura, en la que se puede acceder una información variada de los dispositivos de la red, como su nivel de batería, su ubicación o la potencia con la que se recibe su señal.

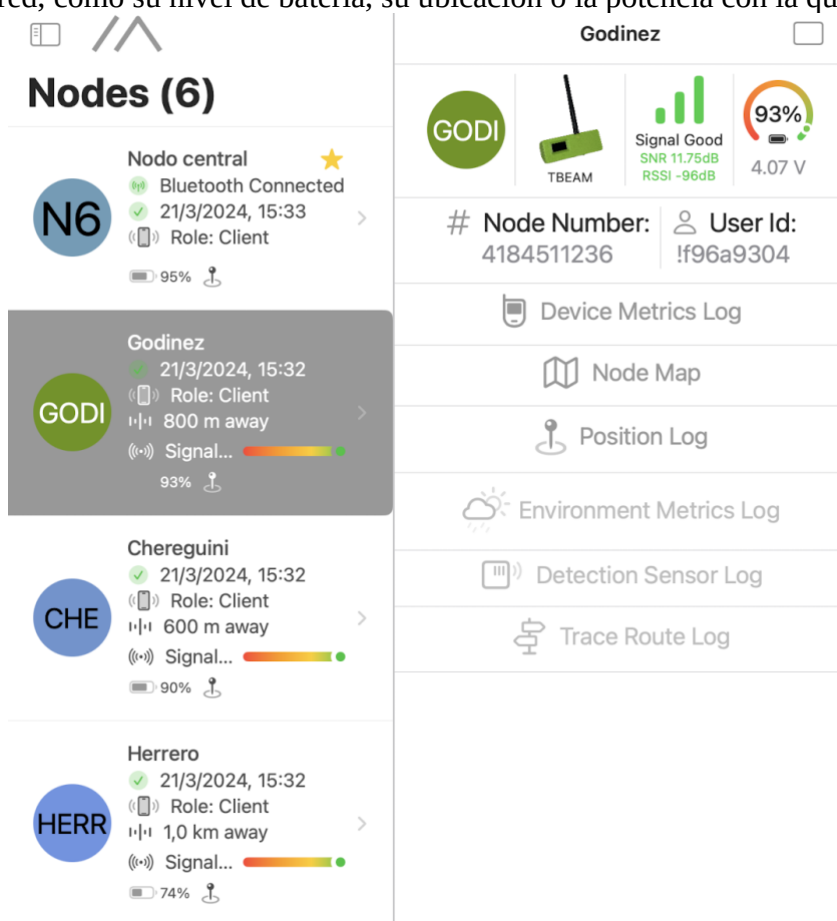


Figura 4-7. Captura tomada de la aplicación. Autoría propia.

5 RESULTADOS

5.1 Pruebas de alcance.

En el presente apartado, se van a mostrar los resultados obtenidos a partir de las dos configuraciones matizadas en el capítulo anterior. Por un lado, se mostrarán los resultados de las pruebas de alcance y por otro lado el establecimiento de la red de mando y control.

5.1.1 Prueba de alcance inicial en la pista militar de la Escuela Naval Militar.

Para validar la correcta configuración de los distintos dispositivos Lora y su vinculación a la red, en primer lugar, se hizo una prueba de alcance en la pista militar. Tras realizar esta, con una distancia máxima de 335 metros, se obtienen los resultados mostrados en las siguientes figuras, en los que se ve como la RSSI mínima que se recibe es de -121 dBm, es decir, se recibe una señal óptima en todo el experimento.



Figura 5-1. Escenario de la primera prueba con el RSSI (dBm) en cada punto. Google Earth.

Profundizando más en los resultados obtenidos, se muestran a continuación las gráficas realizadas con Matlab en las que se muestran, por un lado, la RSSI frente a la distancia y por otro la RSSI con relación al SNR de cada paquete.

Las gráficas muestran de manera inequívoca que los paquetes recibidos llegan con un nivel de potencia (en particular de RSSI) muy superior a la sensibilidad mínima requerida para cada configuración, que según el pliego técnico del chip SX1272 esta sensibilidad es de -134,5 dBm para una modulación LoRa con un ancho de banda de 125 kHz y un factor de ensanchado de 11 [50]. Evidentemente y como era de esperar el nivel de RSSI disminuye con la distancia, pero al tratarse de puntos muy cercanos al transmisor se encuentran siempre por encima de la sensibilidad mínima.

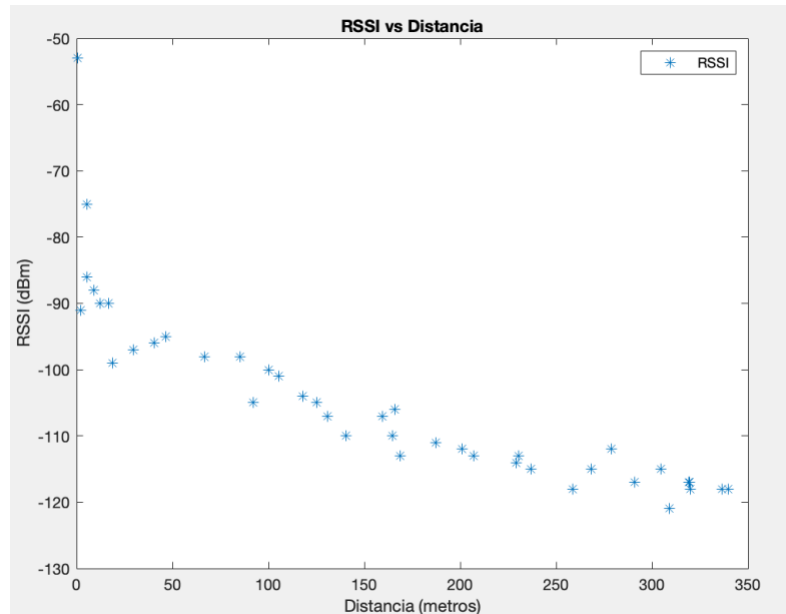


Figura 5-2. RSSI frente a la distancia.

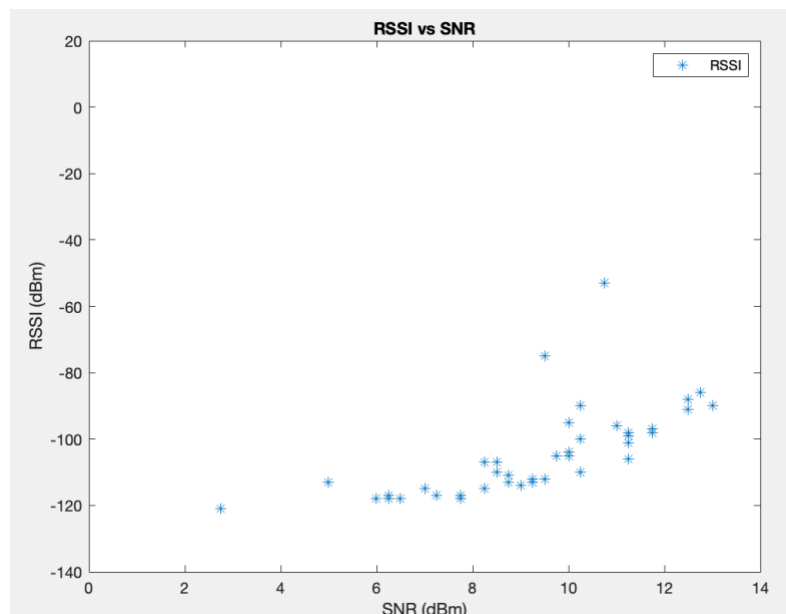


Figura 5-3. RSSI frente al SNR.

5.1.2 Prueba de alcance en la ría de Pontevedra.

Una vez validada la configuración de la red LoRa tras la realización de la prueba de corto alcance, comprobando la variación de RSSI únicamente hasta una distancia total de 350 metros, la siguiente prueba de validación se realiza con los seis nodos en parejas de dos a dos dando lugar a 3 redes independientes, tal y como se ha señalado en el capítulo 4.2.3.

Como resultado de esta prueba, se obtienen alcances de hasta 4500 metros, no limitados por la potencia que reciben los dispositivos sino por la distancia a la que se alejan las lanchas por motivos de su instrucción. En las siguientes figuras se muestran datos relativos a la prueba realizada.

En la Figura 5-4, se muestra una captura de Google Earth en la que están reflejados todos los puntos GPS en los que el receptor recibe paquetes de datos y el valor del RSSI en cada uno de ellos. Es importante destacar que en la imagen se mezclan todos los canales, tanto los que tienen un factor de ensanchado de 11 como los que lo tienen de 7.

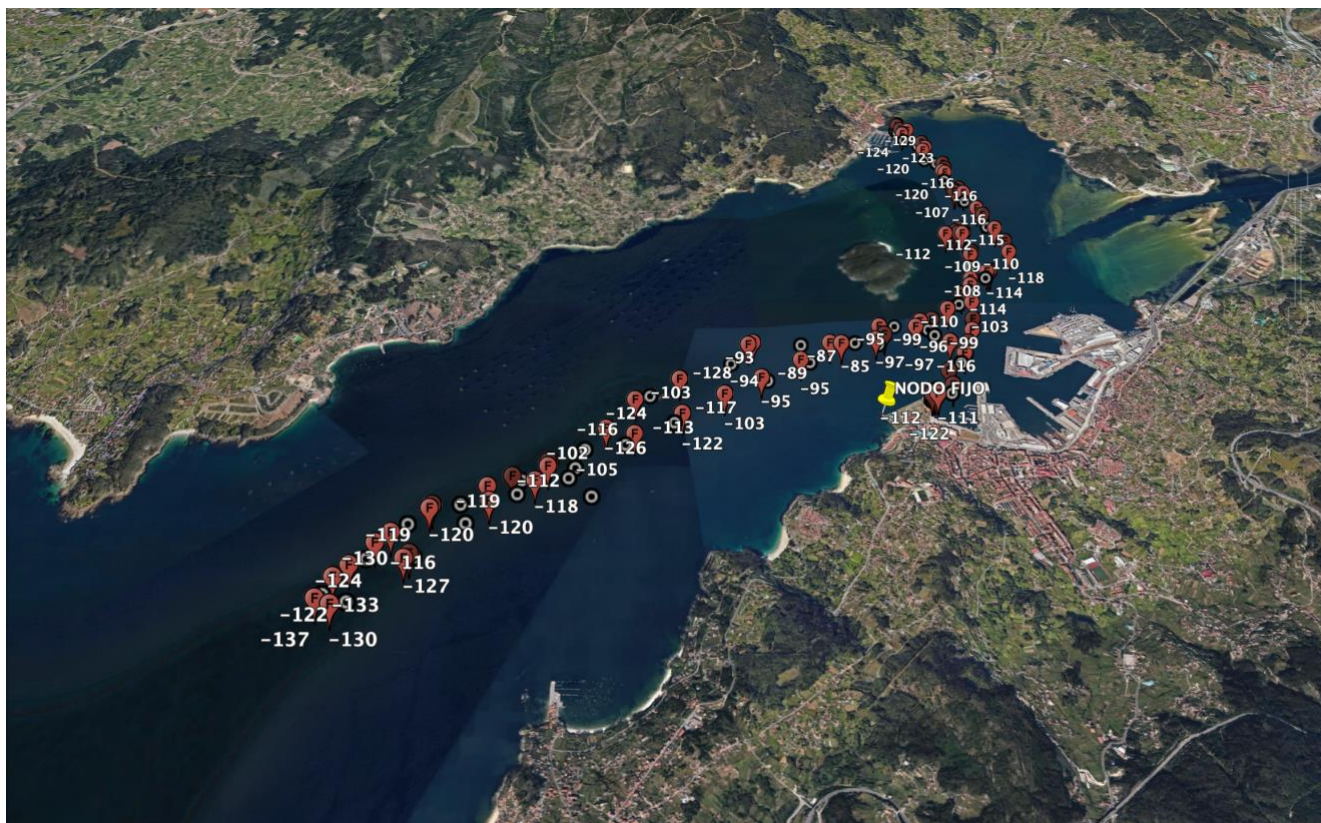


Figura 5-4. Trayectoria de la lancha de instrucción durante la prueba de alcance en la que se muestran los RSSI (dBm) en cada punto. Google Earth.

A continuación, se muestra otra figura con tres imágenes generadas con Matlab que muestran las trayectorias de cada nodo diferenciando todos los factores de ensanchado.

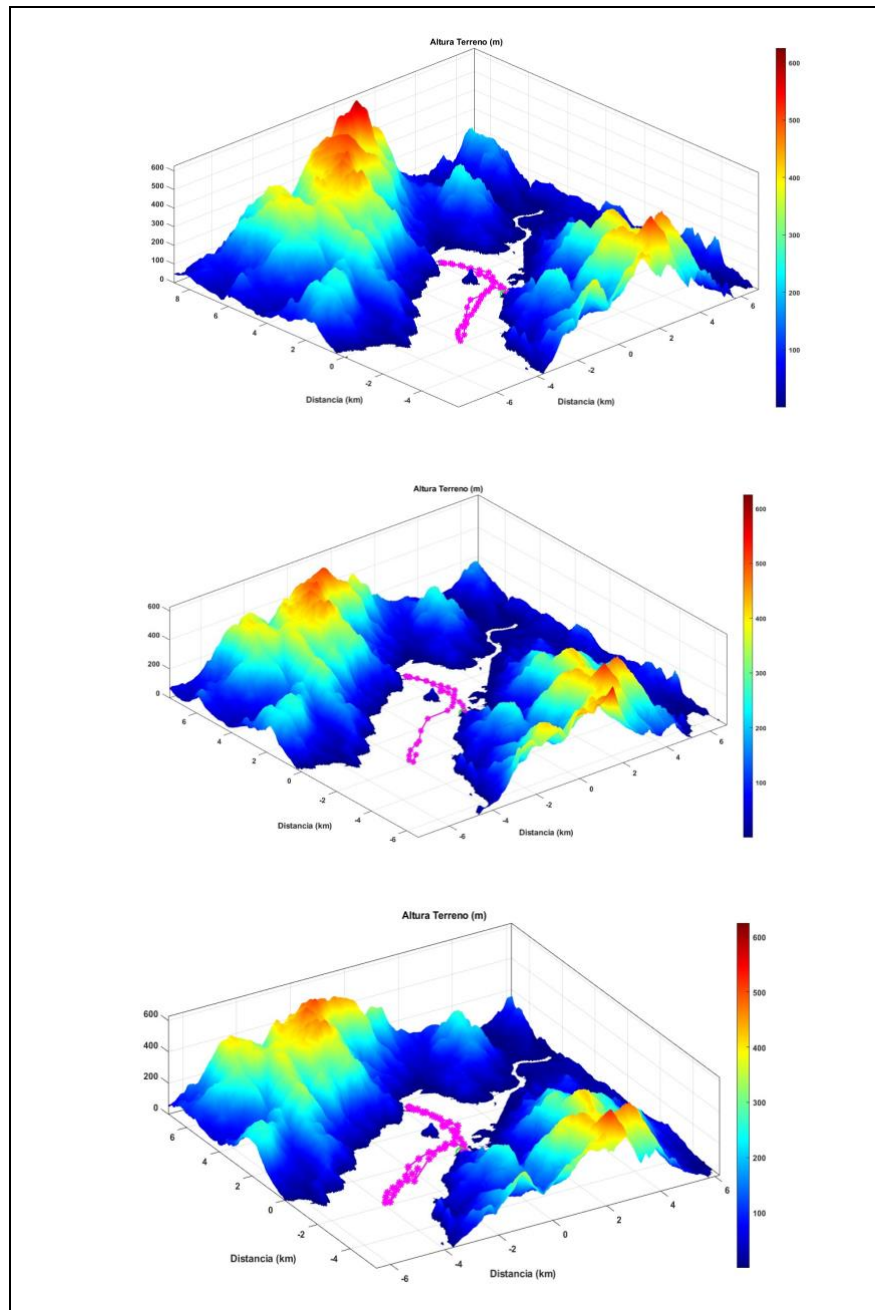


Figura 5-5. Trayectoria seguida diferenciada por los SF. Matlab.

En las siguientes figuras se muestran las tres gráficas de RSSI frente a la distancia para los nodos 3, 4 y 5. Teniendo en cuenta que los nodos trabajaban con la modulación Long Moderate (SF:11), Long Fast (SF:11) y Short Fast (SF:7); se pueden obtener, comparando las tres gráficas, múltiples conclusiones:

- Los nodos con un factor de ensanchado mayor son capaces de recibir mensajes con un RSSI menor que los que tienen un factor de dispersión bajo.
- Pese a que la sensibilidad en el modo con el factor de ensanchado más bajo es notablemente menor que en el resto, en este el descenso del RSSI es también menos agravado, por lo que se esperan menos fluctuaciones en la calidad de la comunicación mientras esta sea funcional.

- Por último, se ve como en el modo long moderate los paquetes solo llegan en torno a -10 dB de SNR, mientras que el *long fast* llega hasta -15 dB. Aunque esto puede hacer llegar a pensar que el modo *long fast* es más robusto, esto no es así. El motivo es que el *Long moderate* no llega a sufrir un SNR tan negativo durante la prueba.

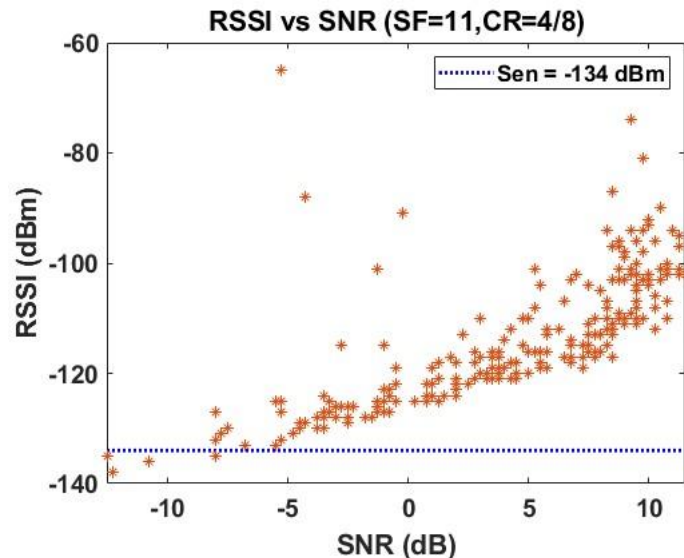


Figura 5-6. RSSI frente al SNR en el Long Moderate. Matlab

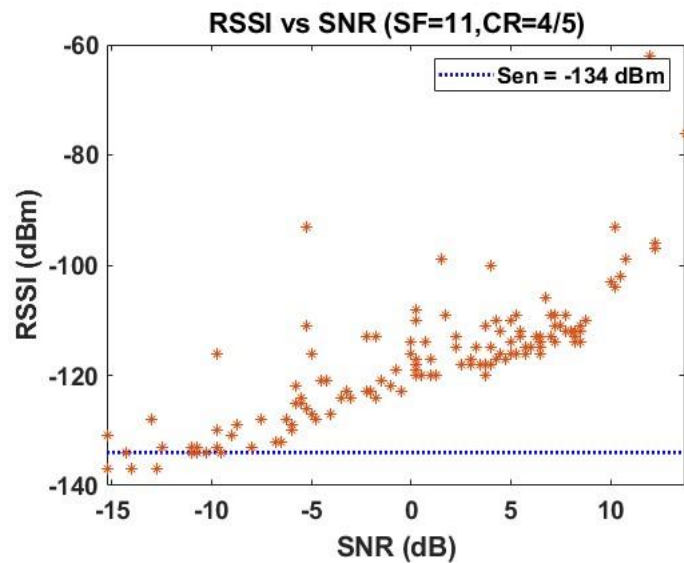


Figura 5-7. RSSI frente al SNR en el Long Fast. Matlab

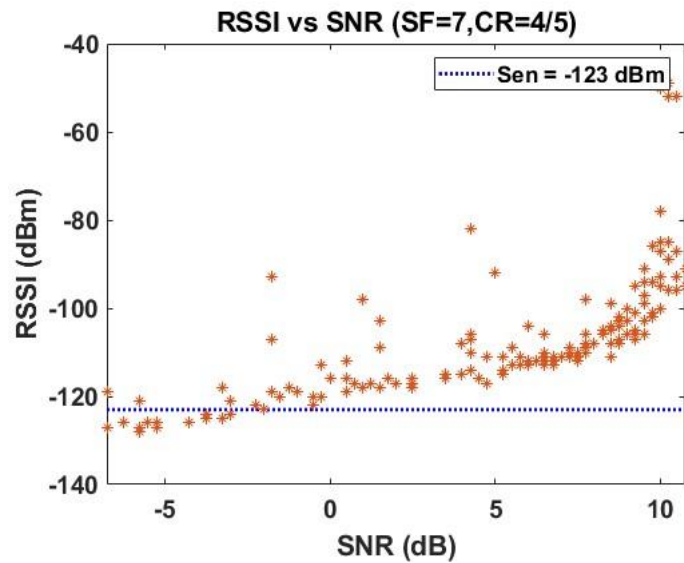


Figura 5-8. RSSI frente al SNR en el Short Fast. Matlab

A continuación, se muestran tres figuras con dinámica similar a las anteriores, siendo la primera en modo Long Moderate, la segunda en Long Fast y la tercera en Short Fast.

Las figuras muestran como disminuye la RSSI, es decir, la potencia recibida en cada paquete, a medida que los dos nodos se alejan. El fin de esta prueba es determinar cómo se comporta cada configuración a medida que se aumenta la distancia.

El modo **Long Moderate**, aplicando la teoría, es el que debería tener mayor alcance debido a la configuración de la señal que tiene. Tiene establecido el mismo factor de ensanchado que el *long fast*, pero una tasa de codificación mucho mayor. Esta diferencia en la tasa de codificación causa que la comunicación sea más robusta pero mucho más lenta que el *long fast*. De hecho, como se aprecia en las gráficas, el modo *Long Moderate* tiene un numero mucho mayor de paquetes a los 4000 metros que el *long fast*. Hay que destacar que se mandaban mensajes entre cada pareja cada 30 segundos, por lo que se puede deducir viendo la densidad de puntos en cada gráfica que se pierden más paquetes en el *long fast*.

Finalmente, el modo *short fast*, pese a ser el que tiene una tasa de bits mayor, se ve que tiene un alcance menor, con prácticamente ningún paquete en la barrera de los 4000 y con una sensibilidad mucho menor que los otros dos.

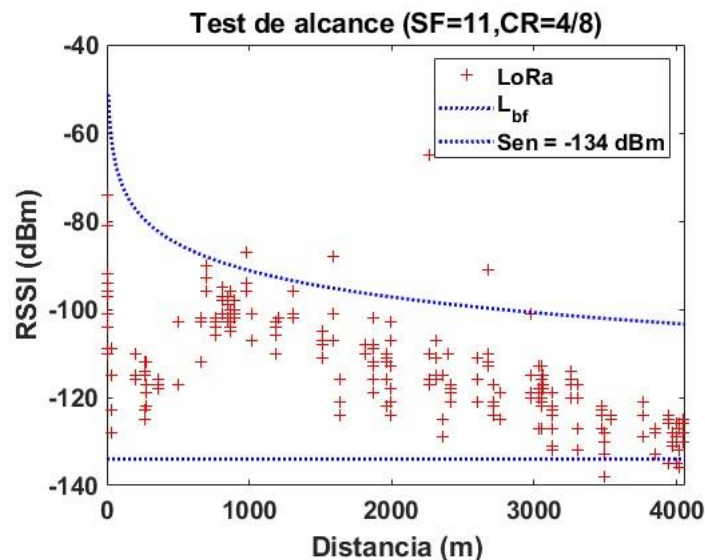


Figura 5-9. Test de alcance en Long Moderate. Matlab.

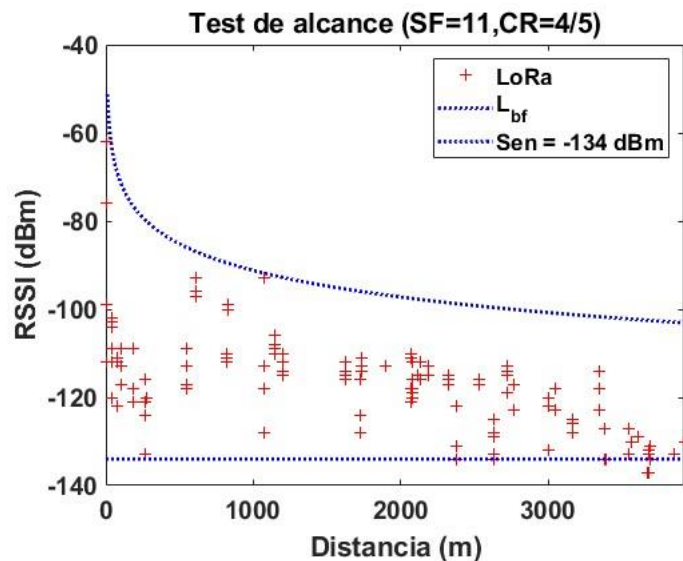


Figura 5-10. Test de alcance en Long Fast. Matlab

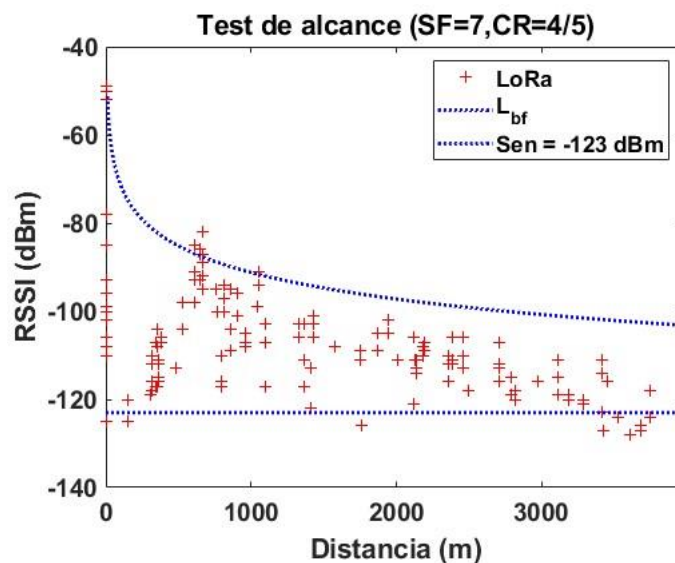


Figura 5-11. Test de alcance en Short Fast. Matlab.

Como se ha mencionado en el presente capítulo, un factor importante a tener en cuenta no es solo el alcance, sino que para evaluar la calidad de la comunicación hay que tener muy en cuenta los errores que se producen en esta. La siguiente gráfica muestra la probabilidad de que se reciba un paquete para cada configuración y para la probabilidad de recibir un paquete erróneo.

En línea punteada se muestran los datos reales y en línea continua los teóricos, como se puede apreciar solo se ven variaciones en el de SF 7 ya que comienza a tener errores antes que los otros dos, mientras que con las otras dos configuraciones no se llega a una situación tan desfavorable como para que se muestre gráficamente.

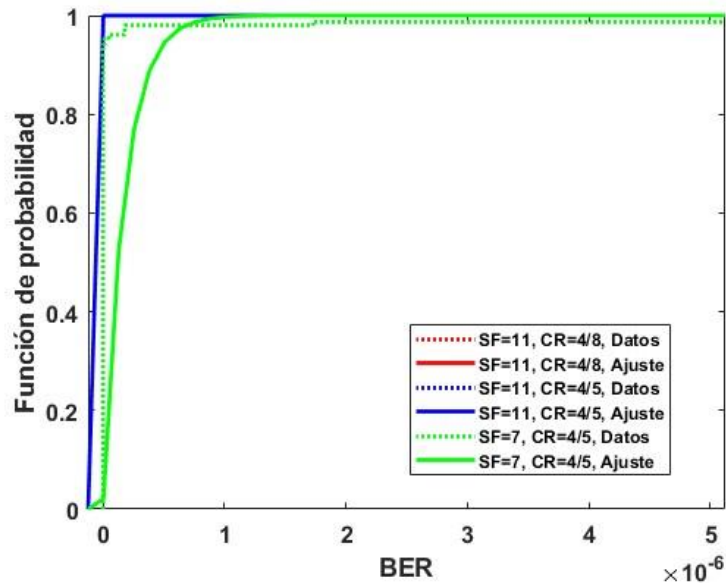


Figura 5-12. Probabilidad de comunicación frente al BER para cada configuración. Matlab.

En la Figura 5-13 se muestra una comparativa entre los datos teóricos y los datos obtenidos en las pruebas de alcance que muestran como a medida que el SNR aumenta la probabilidad de que la comunicación sea satisfactoria aumenta. Se ve, como se podía comprobar con la gráfica de la Figura 3-8, las señales con un factor de ensanchado mayor tienen menos probabilidad de sufrir errores con SNR negativos.

La gráfica muestra por un lado los datos reales tomados en la prueba de alcance (línea de puntos) y por otro los obtenidos de forma teórica, graficados con una línea continua.

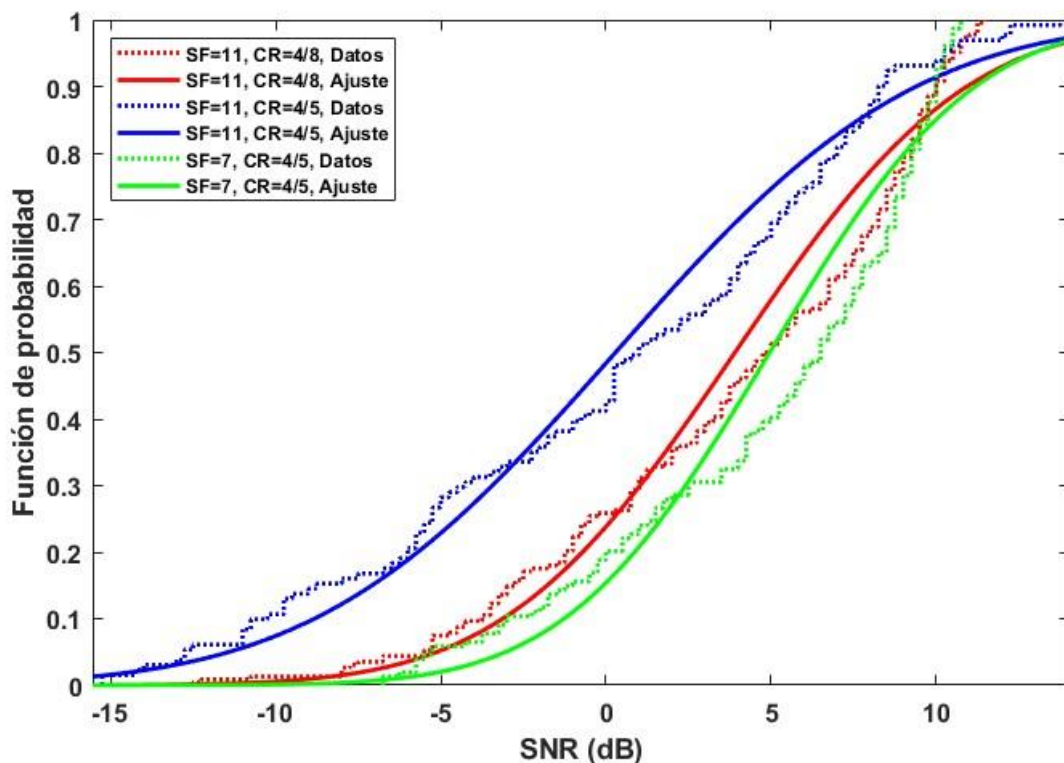


Figura 5-13. Probabilidad de Transmisión sin errores en función del SNR para cada configuración de la señal. Comparación entre datos reales y teóricos. Matlab.

Finalmente, en la Figura 5-14 se muestra, de nuevo, la probabilidad de que un paquete llegue de manera correcta pero esta vez comparándola con el RSSI que con el que se recibe cada paquete de datos. Se puede ver como otra vez los paquetes con SF=7 tienen menos sensibilidad y tiene más probabilidad de perder paquetes que el resto de las configuraciones.

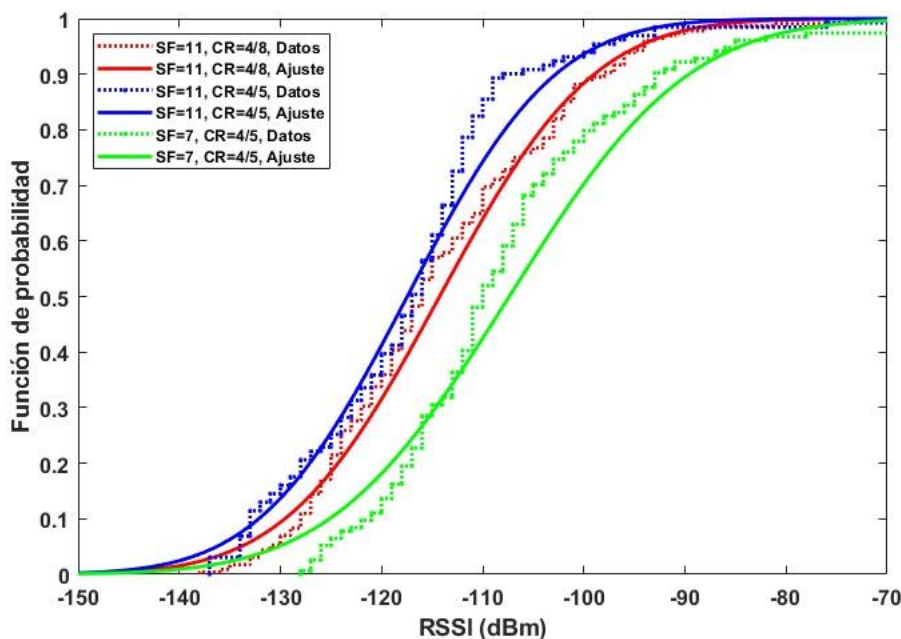


Figura 5-14. Probabilidad de Transmisión correcta en función del RSSI recibido para cada configuración de la señal. Comparación entre datos reales y teóricos. Matlab.

5.2 Establecimiento de la red de mando y control.

Tras haber realizado las pruebas de alcance de manera satisfactoria, y haber elegido una configuración de la red, se crea la red de mando y control para conectar las lanchas. Esta red consta de seis nodos, 5 de ellos situados en las lanchas de instrucción y un último nodo para monitorizar la red basado en tierra. Los nodos de cada lancha se sitúan en el puente alto, a una altura de dos metros respecto al nivel del mar y están operados por los alumnos que están en la cabina del CIC, compartimento inferior al puente alto.

El objetivo del presente experimento era el de comprobar la utilidad práctica de la red, su versatilidad y facilidad de uso e implantación y si cumple los criterios para su uso como red de mando y control. tras una breve explicación sobre el uso del software para familiarizar a los usuarios con el mismo, enseñando las funcionalidades que podían utilizar para el mando y control del resto de lanchas, los resultados obtenidos se muestran a continuación.

En la siguiente figura se muestra el punto en el que la red estaba más alejada del nodo en tierra, a una distancia de 9 km. Es importante destacar que durante el transcurso de la navegación no se perdió el contacto con las lanchas en ningún momento, es decir, que el límite de alcance no es debido al alcance de los dispositivos sino a la propia navegación de las lanchas de instrucción.

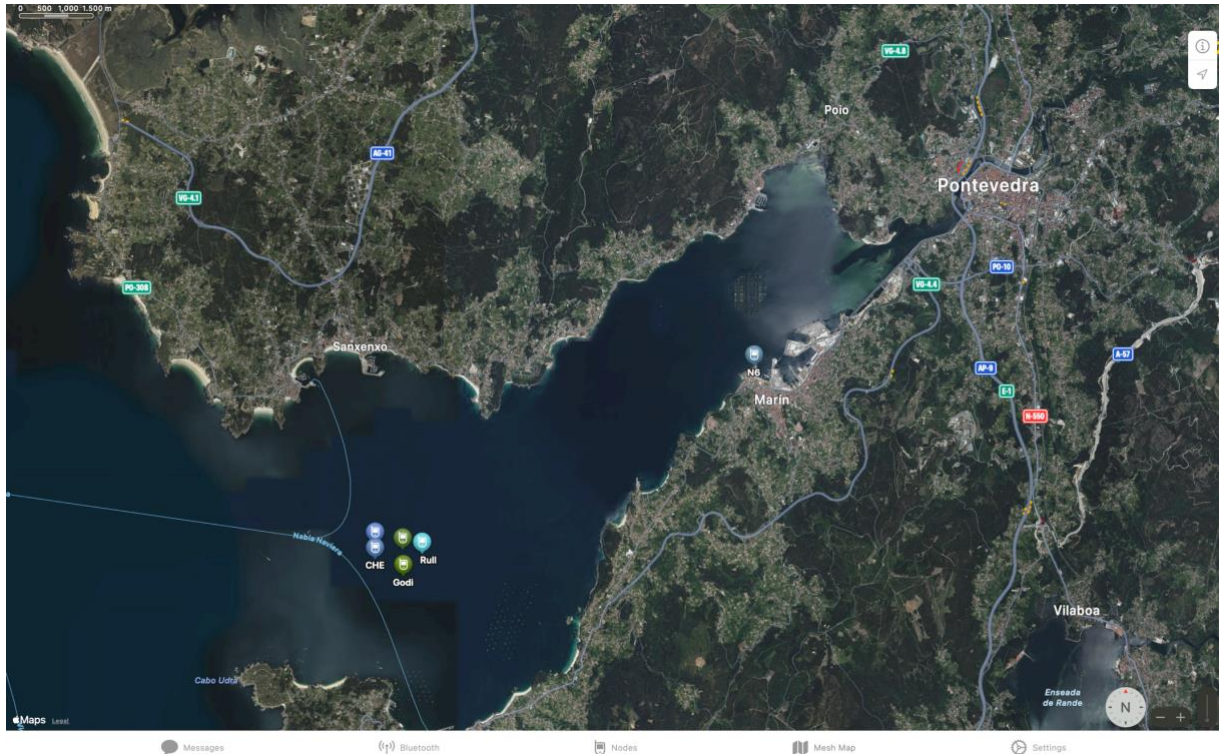


Figura 5-15. Presentación del mapa con la flota de lanchas en el lado opuesto de la ría. Captura de Meshtastic

Poco antes de ese momento, a 8.8 km de distancia, el nodo de tierra recibía un SNR de -4.5dB y un RSSI de -124 dBm. Valores que, pese a ser bajos, permitían un uso con total normalidad de la red. En la siguiente figura se muestra una captura de la aplicación en la que se muestran todos los datos que se pueden comprobar de un nodo conectado. En los que se muestran el SNR y RSSI señalados previamente.

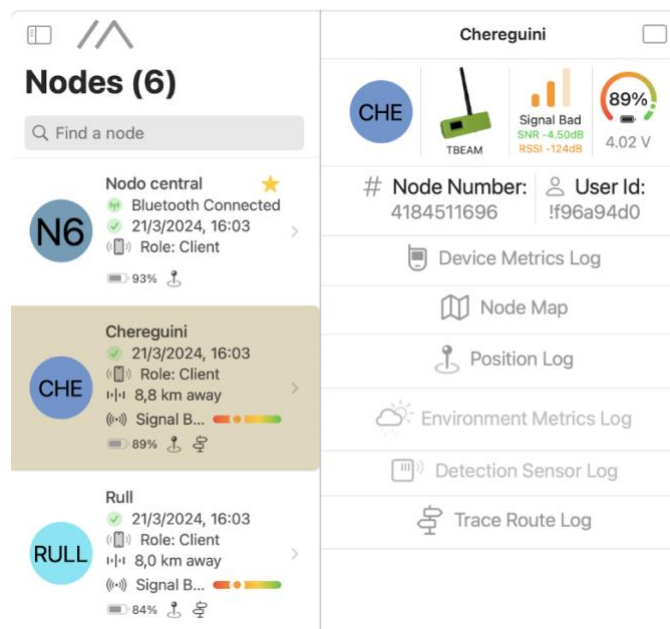


Figura 5-16. SNR y RSSI asociados a la lancha de instrucción Chereguini, a 8.8 Km de distancia. Captura de Meshtastic.

Durante el desarrollo de la prueba, se han realizado comunicaciones entre las lanchas para aclarar asuntos relativos a las maniobras o para solicitar acciones entre ellas. Los alumnos disponían de un canal común de comunicaciones en el que están todas las lanchas y por otro lado la posibilidad de enviar mensajes privados a otras lanchas sin que el resto tuviese la posibilidad de leerlos.

En la siguiente figura se reflejan algunas de las citadas comunicaciones, mostrando su uso de manera efectiva como una herramienta muy positiva para facilitar el adiestramiento de los alumnos.

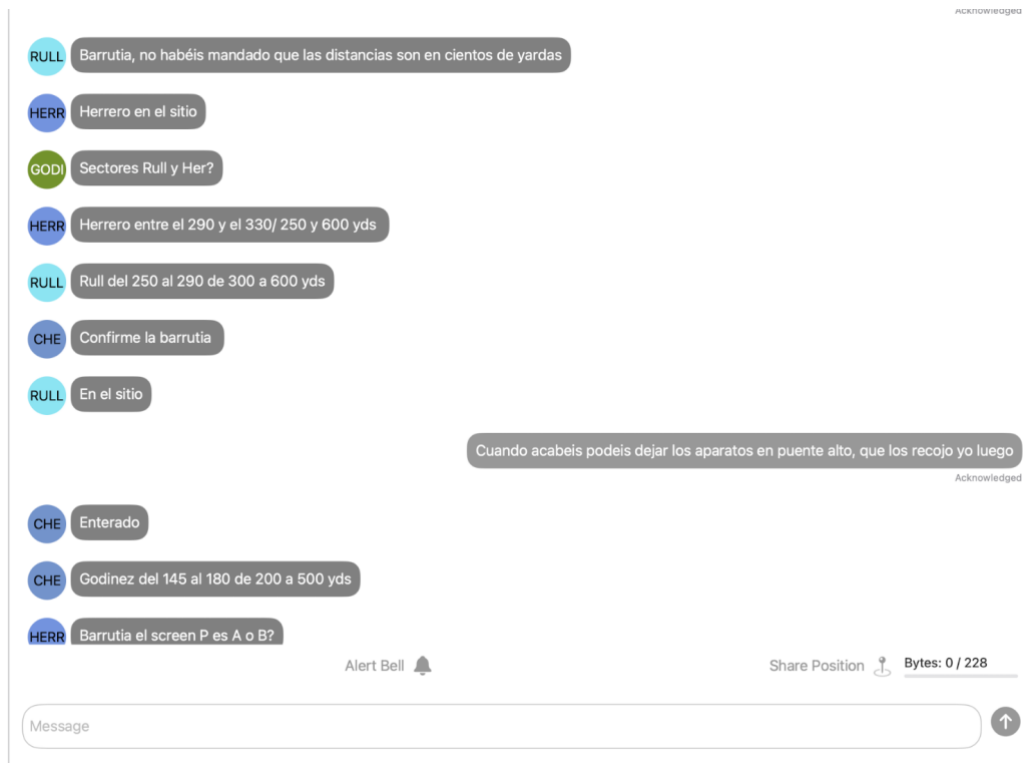


Figura 5-17. Fragmento de conversación realizada entre las distintas lanchas de instrucción. Captura de Meshtastic

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1 Conclusiones.

Al inicio del presente Trabajo de Fin de Grado se planteaba la necesidad que tiene la Armada de buscar nuevos métodos de comunicación para las unidades, y de investigar en las tecnologías que proporcionen a la fuerza seguridad en la comunicación y capacidad de mando y control en entornos degradados. En palabras del Jefe del Estado Mayor de la Defensa (JEMAD), cuando era aún Almirante Jefe de Estado Mayor de la Armada (AJEMA), “En la actualidad disponemos de una Armada reducida, que puede seguir siéndolo, pero siempre que siga estando en la punta de lanza de la tecnología disponible que le proporcione la necesaria superioridad en el combate, supliendo la cantidad por calidad y eficacia”[59].

La principal conclusión que se puede obtener es que LoRa es una tecnología que tiene muchas posibilidades en el ámbito de las comunicaciones marítimas, y que la Armada tiene un nicho en estas tecnologías que debe explotar para asegurarse un acceso al espectro electromagnético seguro y resistente a ataques por parte de potencias extranjeras. Si bien es cierto que las tecnologías satélites suponen un activo con mejores prestaciones, las tecnologías de IOT pueden proporcionar un seguro en el caso de que estas fallen o se vean perturbadas.

Mediante el Software Meshtastic se proporciona una capacidad innegable de implementar de manera rápida, sencilla y segura una red de mando y control con prestaciones muy capaces para coordinar una flota de barcos. Mediante el uso del chat se pueden transmitir las órdenes tradicionalmente enviadas por voz, dejando constancia de ellas para su posterior consulta y solucionando el recurrente problema de malentendidos debido a pronunciación u otros motivos relacionados con el habla. Además, el software muestra en tiempo real la ubicación de los distintos miembros de la red, proporcionando una visión en conjunto del estado de la fuerza. Por último, el hecho de que las comunicaciones estén cifradas proporciona un valor añadido al software, ya que la seguridad, como se ha recalcado varias veces a lo largo del presente trabajo, es un factor determinante en el establecimiento de una red.

Con relación a los objetivos expuestos al inicio del documento, se puede afirmar que han sido cumplidos de manera positiva. El principal objetivo era diseñar e implementar una red operativa eficiente de mando y control que nos permitiese localizar a las embarcaciones y alcanzar toda el área de operaciones de las lanchas de instrucción. Esto se ha logrado implementando meshtastic en 5 lanchas de instrucción y suponiendo un activo útil de comunicación entre las lanchas, sin perder en ningún momento

comunicaciones ni entre ellas ni entre el nodo basado en tierra, que se utilizaba para monitorizar las mismas. Entre los objetivos secundarios se encontraba establecer un método para distribuir las claves de cifrado de manera que no sea vea comprometida la seguridad de la red. Esto se ha cumplido proponiendo distribuir el código QR con toda la configuración de la red entre las dotaciones mediante la instrucción semanal de lanchas. Otro objetivo secundario era el de adaptar el sistema al ambiente marino, como se muestra en la Figura 4-4, se ha optado por encapsular los dispositivos en cajas estancas con la antena en su exterior. Tras haberlo utilizado en días lluviosos se puede afirmar que no se ve afectado por la meteorología. Finalmente, se planteaba como objetivo determinar la variación del RSSI en función de los distintos parámetros de la señal. Se reflejan los resultados en Resultados.

Meshtastic proporciona también a los oficiales encargados de evaluar a los alumnos en las lanchas de instrucción la capacidad de, mediante la monitorización de la red, comprobar si se siguen los procedimientos de seguridad y, además, evaluar el desempeño de estos. Descargando los datos de ubicación de cada lancha y recreando si estas han seguido, por ejemplo, la canal por la que iban a ser evaluados.

Para terminar, y pese a no ser el objetivo del apartado, quiero destacar que el desarrollo del presente documento me ha proporcionado conocimientos en el ámbito de las comunicaciones navales y de los sistemas de mando y control. Además, me ha proporcionado información técnica sobre las señales de radio producidas por software y más concretamente sobre LoRa, tecnología que ya conocía, pero de manera mucho menos técnica y profunda. Finalmente, me ha dado también información relevante sobre la comunicación por radio en contraposición con las comunicaciones móviles o satélites. Estas, las comunicaciones por radio tendrán en mi opinión una importancia clave en las comunicaciones estratégicas, ya que en el futuro incierto que se presenta por la proa las comunicaciones por satélite y móvil serán un objetivo clave del oponente.

6.2 Líneas Futuras.

Tras haber tratado de sembrar la semilla de lo que podría ser utilizado como red de mando y control de unidades de la Armada, al menos como red de emergencia en caso de una posible pérdida de comunicación, se plantean varias líneas futuras en las que se podría desarrollar este campo.

- En primer lugar, es necesario crear un software específico para la Armada atendiendo a las necesidades propias del medio en el que operan los buques y optimizando este para lograr aumentar tanto el alcance como la capacidad de transmisión de datos. Hilado con esto, se plantea también la necesidad de buscar transmisores, antenas y equipos con mayor potencia de trabajo y, por lo tanto, prestaciones.
- En segundo lugar, se propone ahondar en la investigación del *plugin* de ATAK para proporcionar a las fuerzas de Infantería de Marina, operatividad en entornos remotos o degradados.
- Por otro lado, se propone buscar la aplicación del software en la flota de lanchas de instrucción de la Escuela Naval Militar, añadiendo esa capacidad de mando y control que le faltan a las lanchas y proporcionando, además de una primera aproximación a los “chats tácticos” que se utilizan en las operaciones de la Armada, una capa más de seguridad para los alumnos y los barcos.
- Finalmente, se propone el desarrollo de un método de evaluación de los “PILOTEX” ejercicios de navegación de precisión en los que se simula una canal dragada. Mediante Meshtastic se puede obtener un registro de las situaciones GPS seguidas a lo largo del ejercicio, y con un código similar al propuesto en el ANEXO 3, se puede comprobar la exactitud en la navegación.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Dixon, «Azerbaijan's drones owned the battlefield in Nagorno-Karabakh — and showed future of warfare», *Washington Post*, 12 de noviembre de 2020. Accedido: 9 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.washingtonpost.com/world/europe/nagorno-karabakh-drones-azerbaijan-aremenia/2020/11/11/441bcbd2-193d-11eb-8bda-814ca56e138b_story.html
- [2] M. Abalo Cores, «Las comunicaciones y sistemas de información en la Armada. Hacia dónde vamos.», *RGM*.
- [3] L. F. Calviño García, «Los CIS a bordo de los buques de la Armada en 2025», *RGM*.
- [4] «Heliógrafo de Campaña – Museo ETSIT». Accedido: 4 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://museotelecomvlc.webs.upv.es/heliografo-de-campana/>
- [5] L. S. Howeth, *History of Communications Electronics in the United States Navy*. U.S. Government Printing Office, 1963.
- [6] charterm, «Código Internacional de banderas marítimas», Merak Charter. Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.merakcharter.com/codigo-internacional-de-banderas-maritimas/>
- [7] «ETSI de Telecomunicación: Código Morse». Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.etsit.upm.es/escuela/unidades-administrativas-y-servicios/biblioteca/museo-de-telecomunicacion-profesor-joaquin-serna/exposiciones/el-telegrafo-primer-medio-de-comunicacion-instantanea/evolucion-de-la-telegrafia-electrica/codigo-morse.html>
- [8] «Marconi y la primera transmisión por radio de la historia», [historia.nationalgeographic.com.es](https://historia.nationalgeographic.com.es/a/marconi-y-primera-transmision-por-radio-historia_14204). Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://historia.nationalgeographic.com.es/a/marconi-y-primera-transmision-por-radio-historia_14204
- [9] G. Cruz, «COMUNICACIONES DE ALTA FRECUENCIA», *Revista Española de Defensa*, octubre de 2023.
- [10] S. M. Vélez, «EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS LINK EN EL LHD JUAN CARLOS I. LINK 22».
- [11] «BBC Mundo - Sucedió en el Siglo XX - La conquista del espacio: la carrera espacial». Accedido: 8 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.bbc.co.uk/spanish/seriesigloxx03a.shtml>
- [12] I. J. Joskowicz, «Historia de las Telecomunicaciones», 2012.

- [13] M. Abalo Cores, «El Futuro de las comunicaciones en HF de la Armada.», *Rev. Gen. Mar.*, may 2011.
- [14] I Sistema de Observación y y Prospectiva Tecnológica (SOPT), «NETWORK CENTRIC WARFARE / NETWORK ENABLED CAPABILITY», *CATÁLOGO Gen. PUBLICACIONES Of.*
- [15] A. A. Nofi, «Defining and Measuring Shared Situational Awareness».
- [16] «Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa ETID - 2020».
- [17] J. Vernet, *Historia de la ciencia española*. Madrid, 1975.
- [18] F. J. G. González, «Del “Arte de marear” a la navegación astronómica: Técnicas e instrumentos de navegación en la España de la Edad Moderna», vol. 135, 2006.
- [19] G. Céspedes del Castillo, *América hispana (1492-1898)*. Barcelona, 1988.
- [20] G. García Francos, *Historia del arte y ciencia de navegar*. Madrid, 1947.
- [21] L. Ferrer Maldonado, *Imagen del mundo sobre la esfera*. Alcalá, 1626.
- [22] M. Sellés, *Instrumentos de navegación: Del Mediterráneo al Pacífico*. Barcelona, 1994.
- [23] «X». Accedido: 27 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://twitter.com/Armada_esp/status/1508379661709025281
- [24] J. M. Martínez Hidalgo, *Historia y leyenda de la aguja náutica*. Barcelona, 1946.
- [25] «GPS - NASA». Accedido: 27 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/gps/>
- [26] J. Fernández, «Engañar al GPS: así ha logrado Rusia inutilizar el arma más temida de Ucrania (y EEUU)», *elconfidencial.com*. Accedido: 27 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2024-02-19/gps-rusia-ucrania-himars-guerra-putin-zelenski_3832975/
- [27] «Sistemas de navegación inercial - Una amplia gama de INS y INS/GNSS», SBG Systems. Accedido: 27 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sbg-systems.com/es/sistema-de-navegacion-inercial-ins/>
- [28] T. H. Bryne, «Nonlinear Observer Design for Aided Inertial Navigation of Ships».
- [29] D. Gislason, *Zigbee Wireless Networking*. Newnes, 2008.
- [30] A. Lavric, A. I. Petrariu, y V. Popa, «Long Range SigFox Communication Protocol Scalability Analysis Under Large-Scale, High-Density Conditions», *IEEE Access*, vol. 7, pp. 35816-35825, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2903157.
- [31] «Use Cases», Sigfox 0G Technology. Accedido: 13 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sigfox.com/use-cases/>
- [32] M. Bor, J. Vidler, y U. Roedig, «LoRa for the Internet of Things».
- [33] «smart-agriculture-use-case-catalog-05-02-23.pdf».
- [34] «tektelic-careband-tracking-dementia-patients.pdf».
- [35] F. Turcinovic, J. Vukovic, S. Bozo, y G. Sisul, «Analysis of LoRa Parameters in Real-World Communication», en *2020 International Symposium ELMAR*, Zadar, Croatia: IEEE, sep. 2020, pp. 87-90. doi: 10.1109/ELMAR49956.2020.9219028.
- [36] R. S. Sinha, Y. Wei, y S.-H. Hwang, «A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT», *ICT Express*, vol. 3, n.º 1, pp. 14-21, mar. 2017, doi: 10.1016/j.icte.2017.03.004.
- [37] «Radio Settings | Meshtastic». Accedido: 16 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en:

<https://meshtastic.org/docs/overview/radio-settings/>

- [38] «US Federal Agency Selects 4K Solutions® to Deliver ATAK Solutions | 4K Solutions®». Accedido: 27 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://4ksolutions.com/news/general/us-federal-agency-selects-4k-solutions-to-deliver-atak-solutions/>
- [39] «Airborne signallers take ‘tactical smartphone’ into the jungle». Accedido: 19 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.army.mod.uk/news-and-events/news/2023/02/airborne-signallers-take-tactical-smartphone-into-the-jungle/>
- [40] R. Sanchez-Iborra y M. D. Cano, «State of the art in LP-WAN solutions for industrial IoT services. *Sensors* 2016, 16, 708.».
- [41] R. Sanchez-Iborra, I. G. Liaño, C. Simoes, E. Couñago, y A. Skarmeta, «Tracking and Monitoring System Based on LoRa Technology for Lightweight Boats», *Electronics*, vol. 8, n.º 1, p. 15, dic. 2018, doi: 10.3390/electronics8010015.
- [42] «Spreading Factors», The Things Network. Accedido: 8 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/spreading-factors/>
- [43] «LoRa: Symbol Generation». Accedido: 8 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.sghosly.com/p/lora-is-chirp-spread-spectrum.html>
- [44] N. E. Rachkidy, A. Guitton, y M. Kaneko, «Decoding Superposed LoRa Signals», en *2018 IEEE 43rd Conference on Local Computer Networks (LCN)*, Chicago, IL, USA: IEEE, oct. 2018, pp. 184-190. doi: 10.1109/LCN.2018.8638253.
- [45] «Forward Error Correction and Code Rate», The Things Network. Accedido: 9 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/fec-and-code-rate/>
- [46] M. Anjum, M. A. Khan, S. Ali Hassan, A. Mahmood, y M. Gidlund, «Analysis of RSSI Fingerprinting in LoRa Networks», en *2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Tangier, Morocco: IEEE, jun. 2019, pp. 1178-1183. doi: 10.1109/IWCMC.2019.8766468.
- [47] «Duty Cycle», The Things Network. Accedido: 11 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/duty-cycle/>
- [48] «BOE-A-2013-4845.pdf». Accedido: 22 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/2013/05/09/pdfs/BOE-A-2013-4845.pdf>
- [49] «DS_SX1276-7-8-9_W_APP_V7.pdf».
- [50] T. Elshabrawy y J. Robert, «Analysis of BER and Coverage Performance of LoRa Modulation under Same Spreading Factor Interference».
- [51] T. Elshabrawy y J. Robert, «Closed-Form Approximation of LoRa Modulation BER Performance», *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, n.º 9, 2018.
- [52] «LoRaWAN for Smart Cities», LoRa Alliance®. Accedido: 28 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://lora-alliance.org/cities-vertical-market/>
- [53] «TTN Coverage». Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ttnmapper.org/heatmap/>
- [54] «What is LoRaWAN® Specification», LoRa Alliance®. Accedido: 11 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>
- [55] «T-Beam Meshtastic», LILYGO®. Accedido: 22 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.lilygo.cc/products/t-beam-v1-1-esp32-lora-module>

- [56] «Pack Baterías Recargables Li-ion 18650 - 2400mAh, 3.7V Sparkfun 18650-2400-M | BricoGeek.com». Accedido: 22 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://tienda.bricogeek.com//baterias-lipo/1438-pack-de-2-baterias-li-ion-18650-2400mah-37v-18650-2400MAH.html>
- [57] «Grados de protección | auersignal.com». Accedido: 18 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.auersignal.com/es/datos-tecnicos/normas/grados-de-proteccion-ip/>
- [58] «Tower Coverage», Tower Coverage. Accedido: 18 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.towercoverage.com/>
- [59] «Armada_Lineas_Generales_2.0_reducido_5sept2017.pdf».

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS Y AMBIENTALES

Implicaciones Sociales.

Del presente Trabajo de Fin de Grado se puede sacar conclusiones relacionadas con la conciencia social y de seguridad y salud, ya que proporciona a la Armada, y más concretamente a la Escuela Naval, una red de mando y control para situaciones críticas, en las que se dota de localización GPS a todos los elementos que la componen. Además, aumenta seguridad en los ejercicios de las lanchas de instrucción aumentando la coordinación entre ellas.

Implicaciones Ambientales.

Atendiendo a la conciencia ambiental, se debe subrayar que la tecnología LoRa se caracteriza por un muy reducido consumo de energía y por operar con dispositivos de bajo coste, reduciendo la huella de carbono asociada a su uso y adquisición. Además, los dispositivos emiten a baja potencia con prestaciones similares a otros con una emisión mucho más alta.

De hecho, se pueden crear nodos alimentados por placas solares que, debido al bajo consumo de los chips, no necesiten ningún tipo de energía más allá de la proporcionada por las placas.

Implicaciones Económicas.

Para finalizar, con relación a las implicaciones económicas, es importante destacar el precio reducido de los dispositivos y el hecho de que estas redes nodales reducen la dependencia de una infraestructura fija, de precio muy elevado y menor versatilidad.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

En el desarrollo del presente trabajo se ha explorado la tecnología LoRa y las redes malladas, centrándose en su capacidad de crear redes de comunicación off-grid, es decir, sistemas capaces de operar sin depender de redes eléctricas centralizadas, torres de telefonía móvil u otros medios de comunicación convencionales. Este nuevo método de comunicación, además de suponer un avance técnico importante, plantea diversas consideraciones éticas y sociales que merecen ser discutidas.

En primer lugar, atendiendo a la perspectiva ética, la tecnología LoRa y las redes malladas democratizan el acceso a las comunicaciones, ya que por poco más de 80 euros se pueden crear redes con familiares o amigos, ofreciendo una alternativa en situaciones donde las infraestructuras tradicionales son inexistentes, inaccesibles o han sido destruidas. Esto se puede aplicar a áreas rurales o remotas, como en la España Vacía o en caso de desastres naturales o conflictos que destruyan la infraestructura existente y en los que esa comunicación es crucial para la coordinación en el rescate de víctimas. Además, la comunicación realizada en esas redes nodales es completamente libre y no puede ser tutelada por terceras partes como grandes corporaciones o estados.

Si bien es cierto que esta tecnología, como cualquier otra, lleva de la mano algunas implicaciones sociales relacionadas en gran medida con la edad, ya que puede aumentar lo que ya se conoce en la sociedad con el concepto de “brecha digital”, la tecnología es relativamente sencilla de utilizar y no debería suponer una diferencia sustancial con las clásicas radios de radioaficionado que se utilizaban en la época de nuestros abuelos.

La tecnología LoRa es un activo a tener en cuenta para la comunicación off-grid y cobrará importancia en el futuro para asegurar la comunicación libre entre la ciudadanía en situaciones adversas.

ANEXO III: MODIFICACIONES AL FIRMWARE ORIGINAL.

En el presente anexo se muestran los cambios realizados en el módulo de prueba de alcance “*range test*” del software proporcionado por Meshtastic.

El principal cambio realizado es que el firmware original del proyecto no incluye un dato que era primordial para la realización del trabajo, el nivel del indicador de la fuerza de la señal recibida (“*recieved signal strenght indicator*”, *RSSI*). Un valor relativo, medido en dBm y siempre negativo que está directamente relacionado con la potencia recibida en los nodos.

Para el mencionado cambio fue necesario descargar el firmware y el programa “*Visual Studio Code*” para poder modificarlo. Una vez descargado el firmware, hubo que cambiar la tasa de baudios con la que se debía comunicar el ordenador. Este cambio se realizaba en el archivo “*esp32.ini*” definiendo la tasa de baudios como `upload_speed = 115200`.

Una vez realizado este cambio para poder subir el nuevo código directamente al dispositivo, se modificó el archivo “*rangetest.cpp*” para realizar las pruebas de alcance. En él, se añadió la última línea que se lee en la Figura A3-0-1, que añade un elemento, declarado como número entero, que muestra el RSSI recibido. Además, también hubo que añadir columnas al “*.csv*” para que concordasen.

```
fileToAppend.printf("%d,", getFrom(&mp)); // From
fileToAppend.printf("%s,", n->user.long_name); // Long Name
fileToAppend.printf("%f,", n->position.latitude_i * 1e-7); // Sender Lat
fileToAppend.printf("%f,", n->position.longitude_i * 1e-7); // Sender Long
fileToAppend.printf("%f,", gpsStatus->getLatitude() * 1e-7); // RX Lat
fileToAppend.printf("%f,", gpsStatus->getLongitude() * 1e-7); // RX Long
fileToAppend.printf("%d,", gpsStatus->getAltitude()); // RX Altitude

fileToAppend.printf("%f,", mp.rx_snr); // RX SNR
fileToAppend.printf("%d,", mp.rx_rssi); // RX RSSI
```

Figura A3-0-1 Código del Range test para añadir elementos al .csv.

Por último, también se modificó el archivo “*screen.cpp*” para personalizar la pantalla de inicio al encender los dispositivos. De manera que esta muestre el logo de la ENM creado mediante una imagen XBM, una imagen creada mediante ceros y unos que representa los bits de pantalla. La siguiente imagen representa la pantalla que se muestra al iniciar el dispositivo.

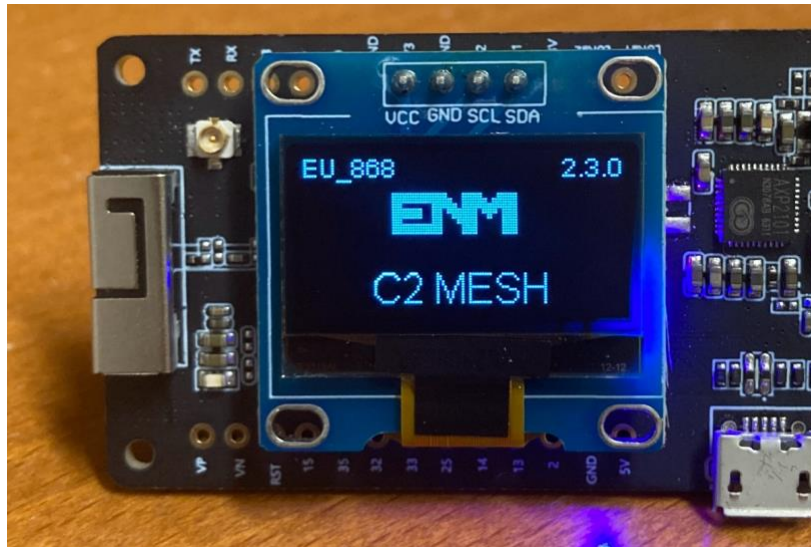


Figura A3-0-2 Detalle de la pantalla Oled del Dispositivo. Autoría propia.

ANEXO IV: CÓDIGO PYTHON PROPUESTO PARA LA EVALUACIÓN DE LOS PILOTES.

Ejemplo de código en Python que podría servir para la evaluación de los alumnos. Este código compara dos archivos .csv, uno de ellos con la información relativa a la canal que estaba previsto seguir y el otro con la información real del GPS del dispositivo.

Al comparar los datos proporciona un porcentaje de puntos en los que se ha mantenido dentro de la canal. Proporcionando información objetiva al evaluador del alumno.

```
1  import pandas as pd
2  import geopandas as gpd
3  from shapely.geometry import Point, LineString
4
5  # Leer los archivos CSV
6  waypoints_deseados_df = pd.read_csv('canal.csv')
7  waypoints_gps_df = pd.read_csv('wp.csv')
8
9  # Convertir DataFrames a GeoDataFrames
10 gdf_waypoints_deseados = gpd.GeoDataFrame(waypoints_deseados_df,
11     geometry=gpd.points_from_xy(waypoints_deseados_df.Longitude, waypoints_deseados_df.Latitude))
12 gdf_waypoints_gps = gpd.GeoDataFrame(waypoints_gps_df,
13     geometry=gpd.points_from_xy(waypoints_gps_df.Longitude, waypoints_gps_df.Latitude))
14
15 print(waypoints_deseados_df.columns)
16 # Crear líneas entre waypoints deseados
17 lineas = []
18 for i in range(len(gdf_waypoints_deseados) - 1):
19     punto_inicio = gdf_waypoints_deseados.geometry.iloc[i]
20     punto_final = gdf_waypoints_deseados.geometry.iloc[i + 1]
21     linea = LineString([punto_inicio, punto_final])
22     lineas.append(linea)
23
24 # Verificar si los waypoints GPS están cerca de alguna línea
25 margen = 20 # 20 metros
26 puntos_cercanos = 0
27 for punto in gdf_waypoints_gps.geometry:
28     cercano = any(punto.distance(linea) <= margen / 1000 for linea in lineas)
29     # La distancia se da en grados, por lo que se convierte el margen a grados aproximadamente
30     if cercano:
31         puntos_cercanos += 1
32
33 # Calcular el porcentaje de puntos cercanos
34 porcentaje_cercanos = (puntos_cercanos / len(gdf_waypoints_gps)) * 100
35 print(f"Porcentaje de puntos GPS cercanos a la ruta deseada: {porcentaje_cercanos:.2f}%")
```

Figura A4-0-1 Código ejemplo de evaluador de alumnos. Elaboración Propia.

ANEXO V: CÓDIGO MATLAB PARA LECTURA DE .CSV Y GENERACIÓN DE GRÁFICAS BER.

El código presentado en la Figura A5-0-1 sirve para generar, a partir de la lectura de un archivo “.csv”, tablas con todos los datos necesarios para crear las gráficas que se han utilizado a lo largo del trabajo.

Por otro lado, la segunda figura muestra el código con el que se han generado las gráficas relacionadas con el BER

```

1  %Read .csv file
2
3  clear all;
4
5  %Busca archivos .csv en la carpeta Measurements.
6  folfer_in='Measurements/';
7  files_in=dir(strcat(folfer_in,'*.csv*'));
8
9  % Abre los archivos que encuentra para ordenar los datos en tablas.
10 opts1 = detectImportOptions(strcat(folfer_in,files_in.name));
11 dataTable1 = readtable(strcat(folfer_in,files_in.name),opts1);
12
13 %Procesa la información temporal.
14 %tiempo1=datetime(dataTable1{:,1},'InputFormat','yyyy-MM-dd HH:mm:ss.S');
15
16 %Hum=dataTable1{:,2};
17
18
19 % rxLat=dataTable1.rxLat;
20 % rxLong=dataTable1.rxLong;
21 % txLat=dataTable1.senderLat;
22 % txLon=dataTable1.senderLong;
23 % rxSNR=dataTable1.rxSnr;
24 % rxRssi=dataTable1.rxRssi;
25 % distance=dataTable1.distance;
26 % txName=dataTable1.senderName;
27
28 [dataTable1.rxUTMx,dataTable1.rxUTMy]=deg2utm(dataTable1.rxLat,dataTable1.rxLong);
29 [dataTable1.senderUTMx,dataTable1.senderUTMy]=deg2utm(dataTable1.senderLat,dataTable1.senderLong);
30
31 HeightProfile
32
33 figure;
34
35 plot(dataTable1.distance,dataTable1.rxRssi,'*')
36
37
38
39 figure;
40
41 plot(dataTable1.rxSnr,dataTable1.rxRssi,'*')
42

```

Figura A5-0-1 Código para la generación de gráficas desde el .csv. Matlab.

```

1  %% SF and BW initializing
2  SF = [ 7 8 9 10 11 12 ] ;
3  M = 2.^SF ;
4  BW = 125e3 ;
5  SNR_theory = linspace(-30,30,1e3) ;
6  %% Analytic
7  for valueSF=1:length(SF)
8      EbNo_theory = SNR_theory + 10.*log10(M(valueSF)/SF(valueSF)) ;
9      EsNo_theory = EbNo_theory + 10.*log10(SF(valueSF)) ;
10     % Theoretical BER Calculations
11     BER_nCOH_AWGN_Theory(valueSF,:) = 0.5.*qfunc(sqrt(10.^(SNR_theory./10).*2.*M(valueSF)) -
12         sqrt(1.386.*SF(valueSF)+1.154)) ; % T. Elshabrawy and J. Robert, "Closed-Form Approximation of LoRa Modulation BER Performance,"
13         in IEEE Communications Letters, vol. 22, no. 9, pp. 1778–1781, Sept. 2018, doi: 10.1109/LCOMM.2018.2849718.
14 end
15 %% Plots
16 % BER
17 figure(4)
18 clf
19 ax = gca ;
20 hold on
21 plot(SNR_theory,BER_nCOH_AWGN_Theory(1,:), 'Linewidth',2)
22 plot(SNR_theory,BER_nCOH_AWGN_Theory(2,:), 'Linewidth',2)
23 plot(SNR_theory,BER_nCOH_AWGN_Theory(3,:), 'Linewidth',2)
24 plot(SNR_theory,BER_nCOH_AWGN_Theory(4,:), 'Linewidth',2)
25 plot(SNR_theory,BER_nCOH_AWGN_Theory(5,:), 'Linewidth',2)
26 plot(SNR_theory,BER_nCOH_AWGN_Theory(6,:), 'Linewidth',2)
27 set(gca, 'YScale', 'log')
28 ylim([1e-6 1])
29 xlim([-30 0])
30 box
31 grid on
32 xlabel('SNR(dB)')
33 ylabel('BER')
34 title('BER teórica para modulaciones LoRa')
35 set(gca, 'fontsize',14, 'FontWeight', 'bold')
36
37 legend('SF=7', 'SF=8', 'SF=9', 'SF=10', 'SF=11', 'SF=12')
38
39 figure(5)
40 clf
41 ax = gca ;
42 hold on
43 EbNo_theory = SNR_theory + 10.*log10(M(1)/SF(1)) ;
44 plot(EbNo_theory,BER_nCOH_AWGN_Theory(1,:), 'Linewidth',2)
45 EbNo_theory = SNR_theory + 10.*log10(M(2)/SF(2)) ;
46 plot(EbNo_theory,BER_nCOH_AWGN_Theory(2,:), 'Linewidth',2)
47 EbNo_theory = SNR_theory + 10.*log10(M(3)/SF(3)) ;
48 plot(EbNo_theory,BER_nCOH_AWGN_Theory(3,:), 'Linewidth',2)
49 EbNo_theory = SNR_theory + 10.*log10(M(4)/SF(4)) ;
50 plot(EbNo_theory,BER_nCOH_AWGN_Theory(4,:), 'Linewidth',2)
51 EbNo_theory = SNR_theory + 10.*log10(M(5)/SF(5)) ;
52 plot(EbNo_theory,BER_nCOH_AWGN_Theory(5,:), 'Linewidth',2)
53 EbNo_theory = SNR_theory + 10.*log10(M(6)/SF(6)) ;
54 plot(EbNo_theory,BER_nCOH_AWGN_Theory(6,:), 'Linewidth',2)
55 set(gca, 'YScale', 'log')
56 ylim([1e-6 1])
57 xlim([0 10])
58 box
59 grid on
60 xlabel('Eb/N0(dB)')
61 ylabel('BER')
62 title('BER teórica para modulaciones LoRa')
63 set(gca, 'fontsize',14, 'FontWeight', 'bold')
64
65 legend('SF=7', 'SF=8', 'SF=9', 'SF=10', 'SF=11', 'SF=12')

```

Figura A5-0-2 Código para la generación de la gráfica de BER teórica. Matlab.