



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Sistema localizador GPS: análisis e implementación

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Luis Alberto Cornejo Mogrovejo

DIRECTORES: Alicia Vázquez Carpentier

CURSO ACADÉMICO: 2020-2021

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Sistema localizador GPS: análisis e implementación

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Infantería de Marina

Universida_d de Vigo

RESUMEN

Existen en el mercado dispositivos que permiten geolocalizar tanto a seres vivos (personas o animales) como objetos (mercancías, medios de transporte...). En un ámbito militar la geolocalización de tropas o individuos es de importancia tanto en misiones reales como de entrenamiento. Los dispositivos de localización más habituales a nivel de usuario suelen implicar un gasto periódico a mayores del gasto inicial de la adquisición del dispositivo. Esto puede solventarse con un diseño basado en tecnología abierta al mercado y que no dependa de tarjetas SIM para el envío de señales.

En este trabajo se estudiarán múltiples posibilidades en las que basar un diseño de un dispositivo de geolocalización barato, con un alcance medio, sin exigencia de pagos posteriores, y que permita incluir un sistema de visualización directa sobre un mapa de la localización o itinerario seguido durante una actividad.

Se implementará el diseño y se harán estudios preliminares sobre su funcionamiento en varios tipos de terreno: rural, urbano, costero.

PALABRAS CLAVE

Localizador GPS, GPS más antena LoRa, Arduino

AGRADECIMIENTOS

A mi tutora Alicia Vázquez Carpentier por sus consejos y ayuda para superar los problemas encontrados durante el desarrollo del proyecto.

A mi esposa, hijo y familia que han sido un pilar fundamental en este periodo en la Escuela Naval Militar. Los cuales siempre me han dado su apoyo y confianza para convertirlo en una fortaleza y completar este desafío.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	7
1 Introducción y objetivos	9
1.1 Motivación del proyecto	9
1.2 Objetivos	11
1.3 Organización de la memoria	11
2 Estado del arte	13
2.1 Empleo de sistemas de localización.....	13
2.2 Sistema de posicionamiento global (GPS).....	13
2.3 Redes inalámbricas	16
2.3.1 Tipos de redes inalámbricas	17
2.3.2 Internet of Things (IoT)	24
3 Desarrollo del Proyecto	33
3.1 Composición del sistema	33
Dispositivo GPS emisor (GPS-Tx).....	34
Dispositivo central receptor (DRx).....	34
Dispositivo con acceso a internet (DAI).....	34
3.2 Material empleado.....	35
3.2.1 Dispositivo GPS-Tx	35
3.2.2 Dispositivo DRx	40
3.3 Configuración del sistema.....	40
3.4 Envío de datos de posición.....	41
3.5 Recepción de datos de posición	42
4 Resultados / Validación / Prueba.....	43
4.1 Prueba y resultado	43
4.1.1 Zona urbana.....	43
4.1.2 Prueba en zona rural	44
4.1.3 Prueba Escuela Naval Militar (ENM).....	48
4.2 Resultados y validación	51
5 Conclusiones y líneas futuras	55
5.1 Conclusiones	55
5.2 Líneas futuras	56

6 Bibliografía.....	57
Anexo I: Siglas usadas	61
Anexo II: Código usado	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Denuncias totales y denuncias activas por desaparición [1].....	10
Figura 1-2 Logo MOVILOC [3]	10
Figura 1-3 Logo SoyMomo [5]	11
Figura 2-1 Segmento espacial [6].....	14
Figura 2-2 Segmento de control [6]	15
Figura 2-3 Segmento del usuario.....	15
Figura 2-4 Aplicación de sistema infrarrojo.....	18
Figura 2-5 Logotipo de tecnología Bluetooth [13].....	19
Figura 2-6 Posibles conexiones de la tecnología Bluetooth.....	20
Figura 2-7 Logotipo tecnología WiFi.....	21
Figura 2-8 Clasificación de tecnologías en función del tipo de red usada	22
Figura 2-9 Representación de transmisión WiMAX	22
Figura 2-10 Conectividad de los diferentes elementos	23
Figura 2-11 Cuadro de las diferentes tecnologías en función a su alcance de transmisión [22].....	24
Figura 2-12 Logo IoT	25
Figura 2-13 Logotipo Tecnología SigFox	26
Figura 2-14 Cobertura de tecnología SigFox	26
Figura 2-15 Logotipo tecnología NB-IoT [22].....	27
Figura 2-16 Logotipo TECNOLOGÍA LoRa	27
Figura 2-17 Componentes del sistema LoRa.....	29
Figura 2-18 Comparativa principales tecnologías LPWAN [18]	29
Figura 2-19 Comparativa principales tecnologías LPWAN [24]	30
Figura 3-1 Partes que conforman el GPS-Tx y su conexión	34
Figura 3-2 Antena GPS GT-7U	36
Figura 3-3 Módulo TTGO ESP32 V2 con antena LoRa	38
Figura 3-4 Módulo lector de tarjeta micro SD	39
Figura 3-5 Configuración de dispositivo GPS-TX.....	41
Figura 3-6 Visualización de la pantalla del DRx.....	42
Figura 4-1 Datos obtenidos por GPS-Tx [28]	44
Figura 4-2 Imagen de comprobación [28]	44
Figura 4-3 Imagen de referencia [28]	45
Figura 4-4 Vegetación durante itinerario realizado.....	45
Figura 4-5 Datos obtenidos del dispositivo GPS-Tx [29]	46

Figura 4-6 Coordenadas almacenadas en tarjeta microSD con imagen extraída de Google Earth Pro [30]	46
Figura 4-7 Imágenes obtenidas por aplicación de Garmin	47
Figura 4-8 Datos de alcance de enlace. [30]	47
Figura 4-9 Imagen de la zona de realización de prueba en ENM [28]	48
Figura 4-10 Datos y referencia de puntos inicial y final.	48
Figura 4-11 Datos obtenidos por el DRx	49
Figura 4-12 Comparación entre datos de la aplicación de Garmin y datos obtenidos por el GPS-Tx.	50
Figura 4-13 Distancia de enlace y transmisión de datos [30]	50
Figura 4-14 Distancia entre coordenadas obtenidas por el dispositivo y su comprobación [31]	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Comparativa tecnologías inalámbricas [34]	18
Tabla 2 Diferencia entre Bluetooth LE y Bluetooth clásico [13]	19
Tabla 3 Clasificación de tipos de sistemas Bluetooth. [13]	20
Tabla 4 Datos de tecnología NB-IoT [23]	27
Tabla 5 Estructura Tecnología LoRa [24]	28
Tabla 6 Parámetros comparativos tecnologías LPWAN, Aspecto Radio [24]	30
Tabla 7 Parámetros comparativos tecnologías LPWAN. Aspectos de tráfico [24]	31
Tabla 8 Parámetros comparativos tecnologías LPWAN. Aspectos de eficiencia [22] [23] [24] [25]	31
Tabla 9 Características antena GPS GT-U7.	35
Tabla 10 Características antena NEO 6M	36
Tabla 11 Características antena LoRa.	37
Tabla 12 Características módulo TTGO ESP V2 [8]	38
Tabla 13 Características de la batería.	39
Tabla 14 Resultados de las pruebas realizadas.	53

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Motivación del proyecto

A lo largo de la historia al ser humano le ha interesado poder localizar a sus familiares, trabajadores, tropas militares, buques y bienes. La evolución de la sociedad y la tecnología han ido de la mano aumentando el interés por mejorar los sistemas de localización y seguimiento; este interés ha generado que se inviertan millones de euros en la investigación de sistemas de localización tanto en el ámbito civil como militar.

Los primeros sistemas de localización fueron creados en el ámbito militar por la necesidad de los mandos de conocer la ubicación exacta de sus unidades y unidades enemigas. Estos primeros sistemas se realizaban por medio de referencia de las unidades de reconocimiento que estaban desplegadas a vanguardia de la posición del mando. De esta forma se representaban en los mapas facilitando el planeamiento de acciones militares y el reaprovisionamiento de las unidades.

Los físicos *James Maxwell* y *Heinrich Herz* plantearon el uso de las ondas electromagnéticas para la localización. Muchos países durante la primera mitad del siglo XXI realizaron investigaciones y diversas pruebas sobre esta materia. En 1935 *Robert Wattson* patentó un sistema de localización con ondas electromagnéticas llamada “*Radio Detection Finding*”. Actualmente a este sistema se le conoce como *Radio Detection and Ranging* (radar).

La motivación de este proyecto empieza por la creciente demanda de la sociedad por servicios de localización y seguimiento de personas, animales y vehículos, ya que los casos de desaparecidos y robos no disminuyen. Por este motivo se ha realizado un estudio sobre esta situación. Con plataformas online como *EpData* y *RACE* se pueden obtener valores numéricos del aumento de la preocupación de padres por saber la localización de sus hijos. De la misma forma, grandes y pequeñas empresas buscan controlar la ubicación de sus flotas de vehículos. Como consecuencia ha aumentado la demanda de servicios de localización y seguimiento.

La plataforma *EpData* creada por *Europa Press* con el objetivo de facilitar datos sobre personas desaparecidas en España, señala que desde el año 2010 hasta diciembre del 2019 se realizaron hasta 19.031 denuncias de personas desaparecidas, de las cuales 5.529 personas continuaban desaparecidas al final del periodo de estudio [1].

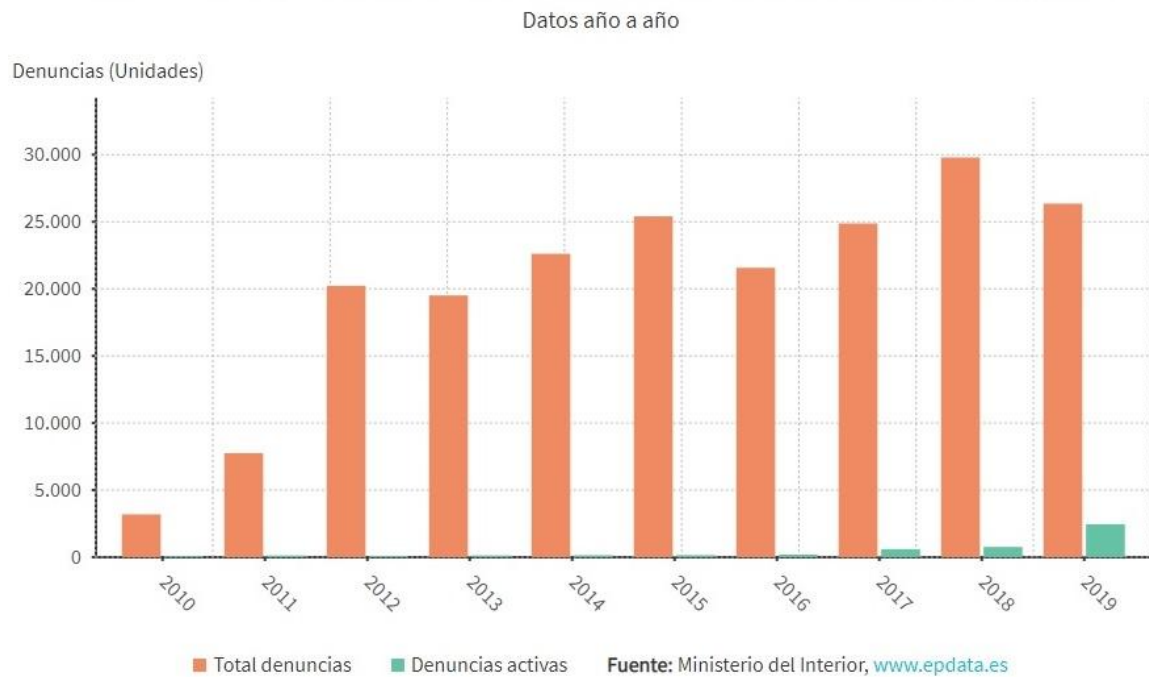


Figura 1-1 Denuncias totales y denuncias activas por desaparición [1]

De la misma forma, el periódico *La Vanguardia* publicó que según datos oficiales del *Real Automóvil Club de España (RACE)* en España se roban 120 vehículos de promedio diario, de los cuales el 80 % son automóviles. [2] [3]

Con los avances tecnológicos y la aparición de nuevos sistemas de seguimiento y localización, han surgido nuevas empresas como *MOVILOC* [4] que ofrece el servicio de rastreo y localización de flotas de vehículos, o la empresa *SoyMomo* [5] que vende productos como relojes de seguimiento y rastreo para niños. Actualmente en el mercado existen diferentes dispositivos de rastreo y seguimiento con una gran variedad de tamaños, servicios y formas. Estos dispositivos tienen en común que los usuarios que deseen hacerse con estos servicios deben realizar pagos periódicos (mensuales o anuales mayormente) ya sea por la contratación de una tarjeta SIM con servicios de internet a una compañía telefónica o el pago a la empresa que ofrezca el servicio.

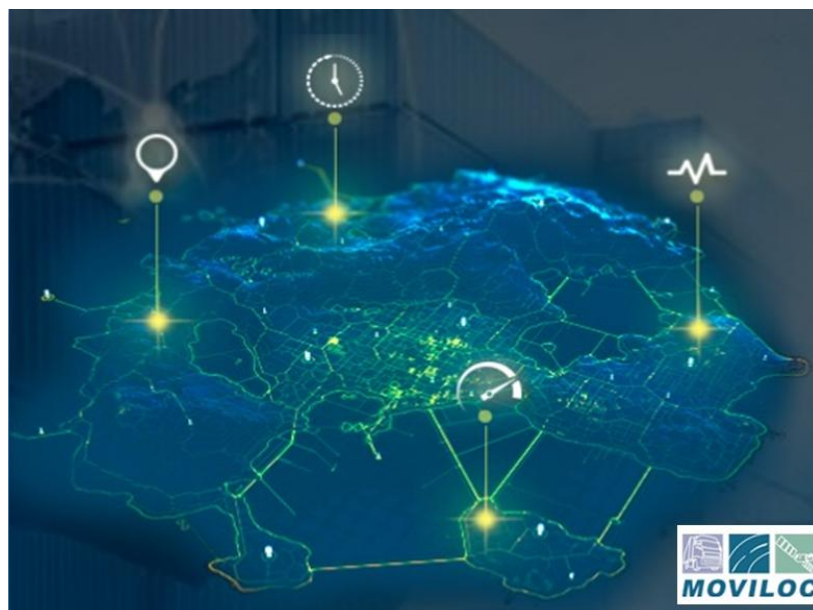


Figura 1-2 Logo MOVILOC [3]



Figura 1-3 Logo SoyMomo [5]

El hecho de que en el mercado no haya un dispositivo que ofrezca un servicio donde los usuarios no deban realizar pagos mensuales o anuales, ha motivado la creación de este proyecto con el objetivo de diseñar un dispositivo de seguimiento en tiempo real, que memorice el itinerario realizado tanto por personas, animales o vehículos sin coste adicional al dispositivo.

Otra de las motivaciones de este proyecto es realizar el seguimiento de unidades militares y flota que facilite el mando y control de los Mandos, y aumente la seguridad de la tropa en la realización de ejercicios en diferentes tipos de terreno.

1.2 Objetivos

En este proyecto se pretende crear un dispositivo GPS con las siguientes aplicaciones:

- Análisis del mercado y dispositivos disponibles comercialmente.
- Análisis y comparación de componentes para la creación de dispositivos GPS.
- Consecución del menor tamaño del dispositivo
- Montaje y configuración del dispositivo GPS.
- Obtención de datos del posicionamiento (latitud y longitud) en tiempo real.
- Visualización de pruebas de campo con el fin de determinar las capacidades del sistema orientas a un uso militar.
- Visualización de coordenadas en los dispositivos emisor y receptor.
- Pruebas de campo, aunque debido a la Covid-19 serán limitadas:
 - Creación de itinerarios.
 - Seguimiento de un dispositivo GPS emisor en tiempo real de corto/medio alcance.
 - Almacenamiento de coordenadas en tarjeta microSD.

1.3 Organización de la memoria

La memoria se organiza mediante capítulos donde se explica más detalladamente el desarrollo del sistema, funcionamiento, y pruebas realizadas junto a sus resultados. El contenido de estos capítulos se distribuye de la siguiente manera:

- En el capítulo 2 se explican empleo y conceptos de geolocalización por medios del *Sistema de Posicionamiento Global (GPS)* junto con las partes indispensables para el funcionamiento de este sistema.
- En el capítulo 3 se describe el desarrollo del sistema localizador GPS, materiales usados, la composición y configuración del sistema, envío y recepción de datos al igual que su visualización.
- En el capítulo 4 se detalla el proceso para la realización de las diferentes pruebas del sistema, resultados obtenidos y la validación del sistema.

- En el capítulo 5 se exponen las conclusiones derivadas del estudio del sistema y sus diferentes líneas futuras para su mejora.
- En el capítulo 6 se expone la bibliografía conformada por todas las referencias como recursos web, libros y artículos, usados durante el desarrollo de este proyecto.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Empleo de sistemas de localización

La idea de conocer la posición de personas, barcos y cosas no es exclusiva de la sociedad de las últimas décadas, ya que desde las primeras civilizaciones ya existió la necesidad de este conocimiento. Desde los primeros sistemas de navegación o las primeras grandes inmigraciones se buscaba el conocimiento de su posición con el objetivo de conocer nuevos territorios; esto lo realizaban por medio del estudio del movimiento del sol, la luna y la posición de las estrellas.

Con el paso de los siglos, el desarrollo de las sociedades y el aumento de sus conocimientos en campos como la geometría, trigonometría y la matemática y posteriormente con la aparición de la brújula y cartografía mejoró las técnicas de geolocalización. Esto permitió la apertura de nuevas rutas de comercio y el descubrimiento de otras culturas llegando hasta la situación actual del conocimiento del planeta.

Desde la aparición de los primeros sistemas inerciales del siglo XIX, la creación del ordenador y el lanzamiento al espacio de satélites artificiales a mediados del siglo XX la geolocalización ha dado pasos agigantados hasta llegar a la actualidad. Hoy en día no se puede entender una sociedad sin la localización en tiempo real.

En la actualidad la investigación en el campo del sistema de localización genera cientos de millones de euros cada año. Esto es consecuencia de la necesidad de la sociedad actual del conocimiento exacto de la posición en tiempo real.

El sistema de localización es necesario para poder continuar con el concepto de mundo globalizado ya que es utilizado en campos tan importantes como la navegación en las diferentes rutas marítimas y aéreas que transportan mercancías y personas, y que representa el motor principal de la economía mundial. Otro ejemplo es su utilización en el replanteo para la construcción de edificios y carreteras o la realización de mapas y planos.

2.2 Sistema de posicionamiento global (GPS)

El sistema de posicionamiento global es un sistema de radionavegación, creado por *Estados Unidos* y manejado por la defensa del mismo, que se basa en el espacio y proporciona posicionamientos fiables de navegación, de forma gratuita a usuarios civiles del todo el mundo.

Actualmente este sistema de navegación es de suma importancia en la vida diaria, ya que se encuentra al alcance de todos los pequeños receptores portátiles, haciendo más fácil la vida a las personas, a las que permite tener ubicación con exactitud, además de ser utilizado por todos los

sistemas de transporte del mundo, transporte marítimo, espacial y terrestre, sin contar con la ayuda que supone para la ubicación en casos de emergencia y socorro.

Este sistema se compone de tres elementos: satélites en órbita alrededor de la Tierra, estaciones terrestres de seguimiento y control, receptores GPS; su funcionamiento depende de la señal que transmiten los satélites y es recibida por los receptores. [6]

Segmento espacial

El segmento espacial consiste en una constelación de 24 satélites operativos que transmiten señales de radio a los usuarios, que Estados Unidos se ha comprometido a mantener disponibles el 95% del tiempo. Por ello las Fuerza Aéreas mantiene en órbita 31 satélites operativos.

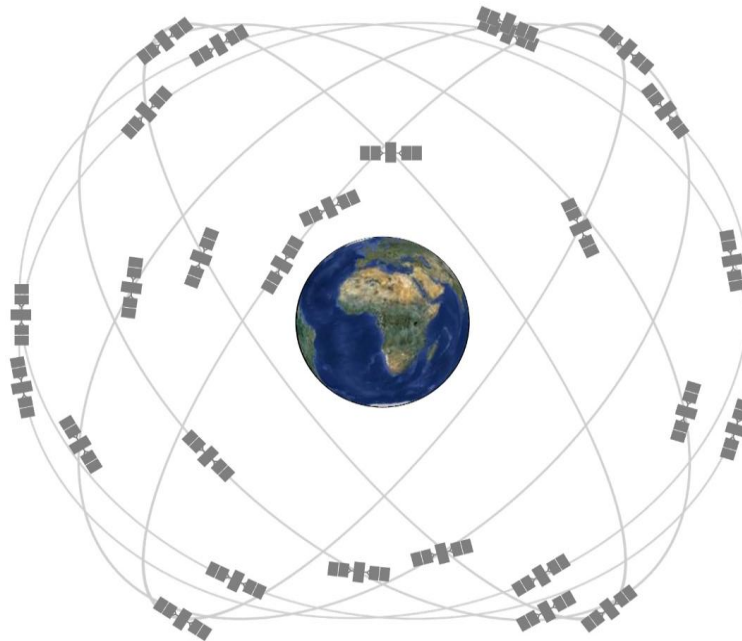


Figura 2-1 Segmento espacial [6]

Los satélites GPS vuelan en órbita terrestre media, a una altitud aproximada de 20.200 kilómetros. Estos satélites están dispuestos en seis planos orbitales igualmente espaciados que rodean la Tierra y cada plano contiene cuatro ranuras ocupadas por satélites de línea base. Lo que nos da un resultado de 24 ranuras y que permite que cualquier usuario pueda ver cuatro satélites desde cualquier punto del planeta. [6]

Segmento de control

El segmento de control consiste en instalaciones terrestres en red, que funcionan como seguimiento y control de los satélites GPS, monitoreando sus transmisiones y controlando el flujo de datos y comandos a la constelación. El sistema de control actual consta de una estación de control maestra, una estación de control alternativa, 11 antenas de comando y control y 16 de monitoreo.

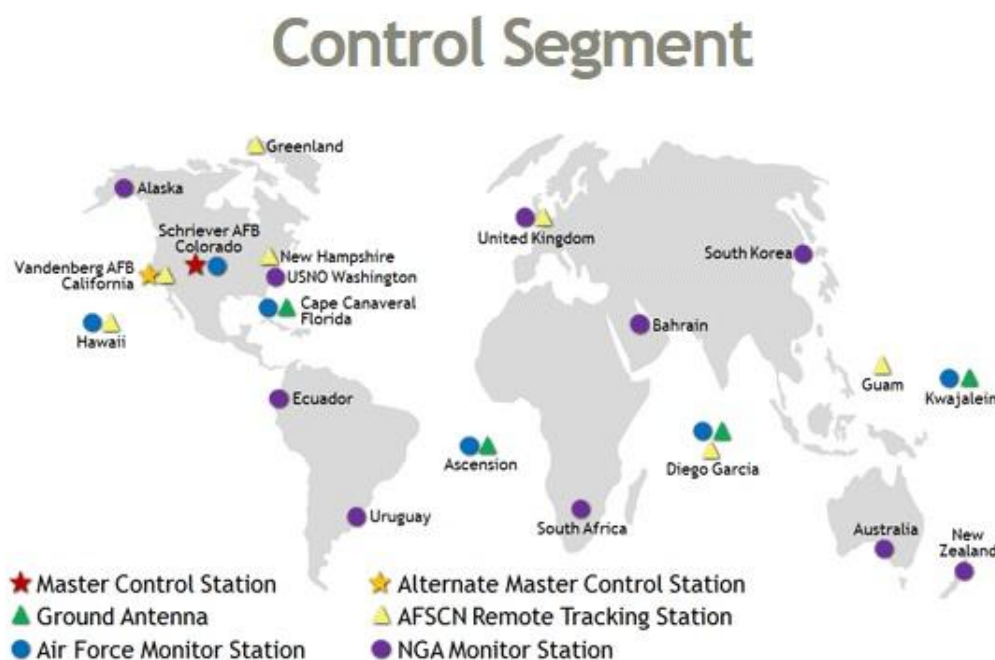


Figura 2-2 Segmento de control [6]

La información obtenida de este seguimiento es enviada a una estación principal, en la que se calculan las órbitas futuras de los satélites como una función del tiempo. Los cálculos realizados y las correcciones de los relojes de los satélites están introducidos en el mensaje de navegación. [6]

Segmento del usuario

Consta de los receptores GPS que sintonizan las señales emitidas por los satélites, decodificando el mensaje de navegación y el retardo de la señal desde el transmisor hasta el receptor, permitiendo ayudar a la navegación y almacenamiento de datos entre otras cosas.



Figura 2-3 Segmento del usuario

En general se conoce como receptor GPS a un equipo constituido por una antena preamplificada, para captar las señales emitidas por los satélites, y un receptor que permite seguir, registrar, controlar, almacenar y visualizar los datos, cálculos y presentación de resultados. Hay diversos tipos de receptores clasificables según varios criterios como, la señal que reciben y procesan, su sistema de medición, modo de funcionamiento, entre otros. [6]

Funcionamiento del sistema

Su funcionamiento se basa en un principio matemático llamado trilateración o triangulación: un receptor comunica con tres satélites y se mide la distancia a la que está cada uno de estos. De esta forma se conoce la ubicación exacta del receptor relativa a los satélites.

Se necesitan 3 satélites para localizar al receptor en un punto de la superficie de una esfera, con centro en el propio satélite, de radio la distancia total hasta el receptor, determinando una circunferencia, resultante de la intersección de las esferas. Para poder obtener la altitud del punto se necesita un cuarto satélite. [6]

2.3 Redes inalámbricas

La transmisión inalámbrica surgió a raíz de una serie de descubrimientos tecnológicos realizados a finales del siglo XIX. El científico físico matemático de origen inglés *James Clerk Maxwell* fue una pieza fundamental para la creación de las redes inalámbricas contribuyendo con el desarrollo de la teoría clásica de la radiación electromagnética describiendo matemáticamente el funcionamiento de la electricidad y el magnetismo. También comprobando que una carga eléctrica en movimiento crea un campo electromagnético, declarando que la luz es una radiación electromagnética. Además, predijo la existencia de otras frecuencias de radiación y describió el espectro electromagnético.

El científico *Heinrich Rudolf Hertz* en 1888 construyó un oscilador que producía ondas capaces de viajar por el espacio y eran detectadas por un cable eléctrico que cumplía la función de antena. La válvula electrónica o tubo al vacío creada en 1904 por el científico británico *John Ambrose Fleming* y perfeccionada posteriormente por el inglés *Lee De Forest* permitió el desarrollo de moduladores que acoplaban una señal de sonido a una de radiofrecuencia para su transporte en el espacio (de forma inalámbrica) creando la amplitud modulada (AM).

Desde los primeros avances del siglo XIX hasta la actualidad, con dependencia de la sociedad actual de la tecnología inalámbrica, nos encaminamos a un mundo de comunicación cada vez menos dependiente de cables. Las redes inalámbricas consisten en la utilización de señales de radio con una determinada frecuencia, que es utilizada generalmente en informática, sin necesidad de cableados o redes alámbricas. Un sistema de comunicación eléctrico no funciona con alambres conductores, sino a través de diversos nodos y sin el uso de una conexión física, mediante de ondas electromagnéticas.

Las ondas que se necesitan para lograr una red inalámbrica son variadas. En primer lugar, se encuentran las ondas de radio, de frecuencia baja y una orientación a cualquier dirección. En segundo lugar, se encuentran las microondas por satélite, que se emiten desde la tierra hacia un satélite en órbita, y son reenviadas con forma amplificada. En tercer lugar, están las microondas terrestres que necesitan de antenas parabólicas alineadas para poder realizar la transmisión de datos.

En la actualidad las redes inalámbricas son una tecnología que ha contribuido notoriamente a cambiar la forma de desarrollo de las comunicaciones, con muchas líneas abiertas de investigación y desarrollo, y de potencialización. Las mismas significan un verdadero progreso que nos permite estar conectados de una forma más fácil.

Se puede explicar el funcionamiento de las redes inalámbricas operativas y sin uso de cables de la siguiente forma: los ordenadores utilizan códigos binarios, que se codifican en ondas de radio y se transmitirán a través de una antena. Quien realiza esta función es la tarjeta Ethernet que se encuentra integrada a los ordenadores, que a su vez tiene un puerto (este conector es de tipo *RJ45*) donde se conecta la antena para el envío de la información. Estos datos en forma de onda de radio son recogidos por el ordenador receptor mediante su antena para ser decodificados por la tarjeta ethernet en datos binarios que pueden ser interpretados por el ordenador. Así pues, además los recursos antes mencionados los ordenadores, tanto el que envía la información como el receptor, deben tener un programa que interprete la información.

Si se desea conectar a una red con internet, será necesario un *router* inalámbrico, que funcione como la antena anteriormente explicada recogiendo a recepción de datos, codificándola y enviando en forma de ondas de radio. Si la otra red en este caso la receptora es internet, codifica los datos de la señal de radio de ordenador que envía para que sean capaces de viajar por el cable de internet y llegar al receptor que se ha programado desde el que envía.

El *router* tiene la capacidad de descodificar los datos que llegan al mismo o codificar los datos que envía a otra red, y además conocer a qué aparato debe enviar la información. Cuando se construye una red inalámbrica se deben considerar los siguientes elementos: [34]

- Dispositivos electrónicos como ordenador, *tablets*, *smartphones*, televisión entre otros.
- Dispositivos con capacidades de red inalámbricas la mayoría tendrán capacidades inalámbricas integradas, de 802.11b / g, 802.11b / g / n, o incluso 802.11ac.
- Tarjeta Ethernet.
- Programa o software para envío y gestión de datos.
- Router inalámbrico o puerto RJ45 para la conexión a internet.
- Conexión a internet.

Existen dos modos de funcionamiento de la red inalámbrica o modo de operación que según la normativa IEEE 802.11 son modo de infraestructura y modo Ad-Hoc. En el modo de infraestructura se necesita que los dispositivos en la red se comuniquen con un punto de acceso que puede ser el enrutador inalámbrico, mientras que en el modo Ad-Hoc o también llamado punto a punto los dispositivos en las redes inalámbricas se conectan entre sí, no necesitando un punto de acceso.

Al hablar de redes inalámbricas, se debe hablar de su señal inalámbrica y sobre todo de la intensidad de la señal. En una red inalámbrica se utiliza la potencia de las señales recibidas por un dispositivo para su medición. Es importante no olvidar que el rendimiento y buen funcionamiento de la señal va a depender de ciertos aspectos como la cantidad de clientes en la red, la cantidad de aplicaciones en funcionamiento a la vez y la tasa de datos deseada.

La forma más sencilla y consistente de expresar la señal es con decibelios con relación a un mW de potencia o en su forma dBm, generalmente entre -30 dBm a y100 dBm, siendo siempre en negativa y siendo - 30 dBm mejor señal que -100dBm, ya que -100 dBm es un número más bajo.[11] [34]

2.3.1 Tipos de redes inalámbricas

Las redes inalámbricas pueden ser clasificadas según el alcance de la señal y el área de aplicación. Veamos su clasificación que se realiza en función del alcance de la señal:

Tipo de red	Nombre	Banda de frecuencia	Rango nominal	Máxima velocidad de transmisión.
WPAN	Infrarrojos	2.4/5 GHz	1m	4 Mbps
	Bluetooth	2,4 GHz	10m	720 kbps
WLAN	Wi-Fi	2,4/5 GHz	100m	1 Mbps
		5 GHz	100m	48 Mbps
		2.4 GHz	100m	11 Mbps
		2.4 GHz	100m	54 Mbps
		2.4/5 GHz	250m	600 Mbps

		5 GHz	250m	1.3 Mbps
WMAN	WiMAX	2-11 GHz y 10-66 GHz	50 km	70 Mbps
	LMDS	3.5 GHz	35 km	45 Mbps
WWAN	SigFox	868 MHz (Europa)	Urbano 3-10 Km Rural 30-50 Km	100 bps
	NB-IoT	868 MHz (Europa)	Urbano 2-5 Km Rural 15 Km	160-200 kbps
	LoRa	868 MHz (Europa)	Urbano 3-10 Km Rural 30-50 Km	50 kbps

Tabla 1 Comparativa tecnologías inalámbricas [34]

2.3.1.1 Redes Wireless Personal Area Network (WPAN)

Las redes *Wireless Personal Area Network* es la tecnología estándar que permite establecer enlace y transmisión de datos inalámbricamente entre dispositivos que estén a una distancia hasta aproximadamente 10 metros, ya que esta distancia es la establecida como área personal. Entre las principales tecnologías utilizadas podemos encontrar:

Infrarrojos

La tecnología de infrarrojos está basada en el envío de rayos luminosos que permiten la comunicación bidireccional entre dispositivos a una velocidad máxima de 4 Mbps. Esta tecnología necesita que los dispositivos tengan enlace visual directo ya que no es capaz de transmitir datos si existen objetos entre dichos dispositivos. Aunque el alcance de la señal puede ser similar a otras tecnologías como *Bluetooth* o *Zigbee*, la tecnología inalámbrica de rayos infrarrojos está siendo sustituida por estas nuevas tecnologías. [35]



Figura 2-4 Aplicación de sistema infrarrojo

Bluetooth

El sistema Bluetooth tuvo sus inicios en 1989 por el *Dr. Nils Rydbeck, Dr. Jaap Haartsen y el Dr. Johan Ullman* con una idea revolucionaria de diseñar auriculares inalámbricos y de esta forma no depender de la transmisión de datos por medios de cables. En 1999 terminaron el protocolo Bluetooth y presentaron los primeros auriculares inalámbricos consiguiendo el premio *Best in Show* en la exposición y feria de ordenadores *Comdex en Las Vegas (Estados Unidos)*.



Figura 2-5 Logotipo de tecnología Bluetooth [13]

El funcionamiento del protocolo Bluetooth utiliza ondas de radio de 2,4 GHz para transmitir información a dispositivos a corta distancia (mismo funcionamiento que el sistema Wifi) con potencia entre 100 mW y 0,5 mW. Este sistema puede conectarse hasta un límite de 8 dispositivos, estableciendo una red entre dos dispositivos ya que cada uno de estos tiene su propia dirección IP y dispone de la tecnología de salto de frecuencia. Esto es que cambia de frecuencia 1600 veces por segundo entre cada red creada con el objetivo de no tener interferencia ocasionados por otros dispositivos inalámbricos.

	Bluetooth de baja energía (LE)	Bluetooth clásico
Banda de frecuencia	Banda ISM de 2,4 GHz (2.402 - 2.480 GHz utilizados)	Banda ISM de 2,4 GHz (2.402 - 2.480 GHz utilizados)
Canales	40 canales con espaciado de 2 MHz (3 canales publicitarios / 37 canales de datos)	79 canales con espaciado de 1 MHz
Uso del canal	Espectro ensanchado por salto de frecuencia (FHSS)	Espectro ensanchado por salto de frecuencia (FHSS)
Modulación	GFSK	GFSK, $\pi/4$ DQPSK, 8DPSK
El consumo de energía	~ 0.01 a 0.5 x de referencia (dependiendo del caso de uso)	1 (valor de referencia)
Velocidad de datos	PHY LE 2M: 2 Mb/s PHY LE 1M: 1 Mb/s PHY codificado LE (S = 2): 500 Kb/s PHY codificado LE (S = 8): 125 Kb/s	EDR PHY (8DPSK): 3 Mb/s EDR PHY ($\pi/4$ DQPSK): 2 Mb/s BR PHY (GFSK): 1 Mb/s
Potencia máxima de transmisión *	Clase 1: 100 mW (+20 dBm) Clase 1.5: 10 mW (+10 dBm) Clase 2: 2,5 mW (+4 dBm) Clase 3: 1 mW (0 dBm)	Clase 1: 100 mW (+20 dBm) Clase 2: 2,5 mW (+4 dBm) Clase 3: 1 mW (0 dBm)
Topologías de red	Malla de difusión punto a punto (incluida la piconet)	Punto a punto (incluida piconet)

Tabla 2 Diferencia entre Bluetooth LE y Bluetooth clásico [13]

La limitación del alcance de transmisión del sistema Bluetooth está dividida en tres clases. El alcance se ve disminuido con los obstáculos que pueden interferir en el alcance óptimo. Esta

clasificación se realiza según su alcance máximo en el que influye principalmente el tamaño del módulo y el consumo de energía.

Clase	Potencia máx. permitida (mW)	Potencia máx. permitida (mW)	Alcance aproximado
Clase 1	100 mW	20 dBm	100 m
Clase 2	2,5 mW	4 dBm	10 m
Clase 3	1 mW	0 dBm	1 m
Clase 4	0.5 mW	-3 dBm	0,5 m

Tabla 3 Clasificación de tipos de sistemas Bluetooth. [13]

Los dispositivos de clase 1 son dispositivo de mayor tamaño y consumo de energía ya que requieren de una mayor potencia para transmitir datos. Principalmente se utiliza en grandes dispositivos o maquinarias que tengan que transmitir datos hasta una distancia de alcance de aproximadamente 100 metros.

Los dispositivos Bluetooth de clase 2 son de tamaño notoriamente más pequeños que los de clase 1. Este tipo de dispositivos tiene un alcance aproximado de 10 metros, ya que el alcance de conexión entre dispositivos Bluetooth se ve limitado por su tamaño. Suelen disponer de una pequeña batería como es el caso de los teléfonos móviles o auriculares inalámbricos.

Los dispositivos Bluetooth de clase 3 con los que tienen un menor alcance de aproximadamente 1 metro. Al ser dispositivos que requieren menor potencia de transmisión, necesitan de una batería menor y eso se ve reflejado en su tamaño.

La velocidad de transferencia de datos es un punto negativo en el sistema Bluetooth, ya que la versión Bluetooth 5.0 alcanza 50 MBps, siendo mucho mejor que las velocidades de transferencia de datos de otras tecnologías como la Wifi. Por este motivo la tecnología Bluetooth no es recomendable para conexiones a internet, siendo recomendada una conexión LAN. [16]



Figura 2-6 Posibles conexiones de la tecnología Bluetooth

2.3.1.2 Redes Wireless Local Area Network (WLAN)

Las redes *Wireless Local Area Network* son redes que permiten conectar diferentes dispositivos con enlace de señal que va desde los 10 a los 100 metros de. Este sistema es uno de los más conocidos junto con las redes WPAN ya que están presentes en la vida cotidiana de la sociedad, siendo la más conocida el sistema WiFi.

Desde la creación del sistema WiFi en 1999 se unificaron las empresas *Airones*, *3Com*, *Nokia*, *Intersil*, *Symbol Technologies* y *Lucent Technologies* con el objetivo de crear un sistema inalámbrico compatible entre diferentes dispositivos. Esta unión creó la compañía *Alliance Wi-Fi* que con el mismo nombre de sello Wi-Fi garantiza conectividad inalámbrica entre distintos dispositivos por medio de la norma IEEE 802.11.



Figura 2-7 Logotipo tecnología WiFi

En la actualidad el sistema WiFi trabaja en las bandas de frecuencias de 2,4 GHz y 5 GHz. En el caso de trabajar con WiFi a 2,4 GHz puede alcanzar velocidades de 11 Mbps, 54 Mbps y 300 Mbps dependiendo del estándar utilizado, mientras que si se trabaja con la frecuencia de 5 GHz mejora la velocidad de transferencia de datos de 433 Mbps pudiendo alcanzar una tasa de transferencia de datos de 1,3 Gbps por medio del uso de 3 antenas operando en la banda de 5 GHz. [23]

El sistema WiFi trabajando en la frecuencia de 5 GHz tiene la ventaja de que tiene una mejor tasa de transferencia de datos, pero cuenta con la desventaja de que su alcance de conexión es menor siendo de aproximadamente 15 metros en interiores y 30 metros en exteriores. En cambio, si trabaja en la frecuencia de 4 GHz su rango de alcance es mayor siendo de 45 metros en interiores y 90 metros en exteriores aproximadamente. El rango de alcance es en condiciones ideales, ya que estas distancias se ven disminuidas si trabaja con tendidos eléctricos, dispositivos electrónicos, infraestructuras edificadas, árboles, etc.

Aunque los nuevos protocolos 802.11n y 802.11ac ofrecen en condiciones ideales un alcance de 70 metros en interiores y 250 metros en exteriores aproximadamente, ocurre lo mismo que lo explicado anteriormente. [15]

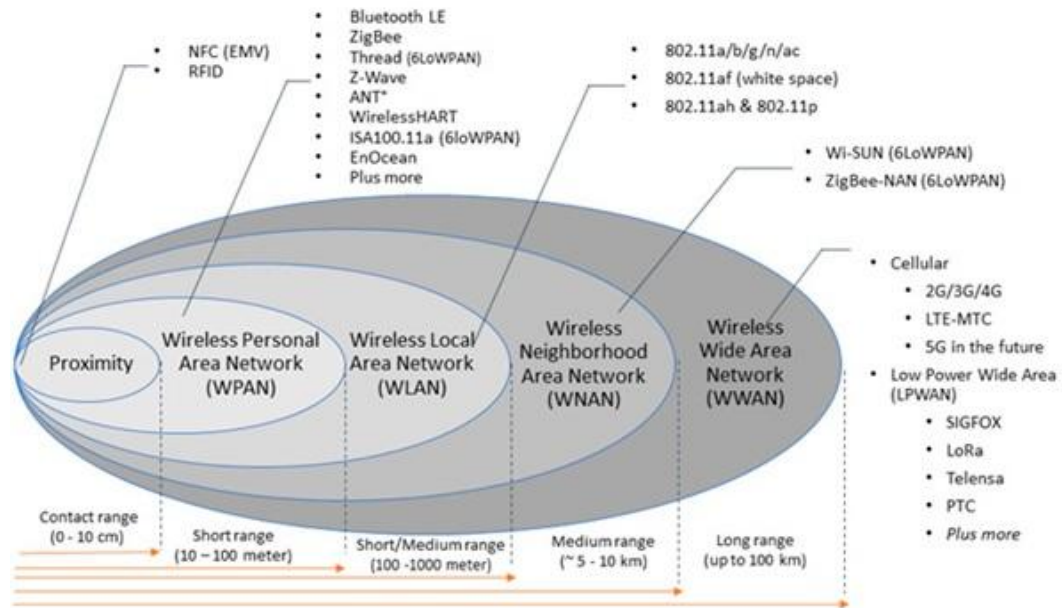


Figura 2-8 Clasificación de tecnologías en función del tipo de red usada

La empresa Alliance Wifi dispone de más protocolo como es IEEE 802.16 (WiMAX) con una tasa de transferencia de datos 124 Mbps y una cobertura de aproximadamente 50 kilómetros, teniendo mejores características que el protocolo IEEE 802.11 de Wifi. El sistema WiMax no entra en estudio ya que su infraestructura es demasiado grande haciendo inviable alcanzar los objetivos de este proyecto. [18]

2.3.1.3 Redes Wireless Metropolitain Area Network (WMAN)

Las redes *Wireless Metropolitain Area Network* están basadas en el estándar IEEE 802.16 de WIMAX y LMDS, tiene un alcance entre 5 a 10 kilómetros; son usadas en aéreas metropolitanas debido a su alcance ya que de esta forma se disminuye costos de cableado como la fibra óptica para el caso del internet y conexiones derivadas de este servicio. Estas redes realizan la transferencia de datos por medio de ondas de radio o luz infrarroja permitiendo un alcance mayor que la red WLAN.

El estándar IEEE 802.16 de comunicaciones *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WIMAX) tiene una arquitectura punto a multipunto con el objetivo de alcanzar una alta velocidad de transmisión de datos de forma inalámbrica creando redes entre ciudades. Esto es posible ya que las redes WMAN pueden estar formadas por varias redes WLAN interconectadas por sistema WIMAX.

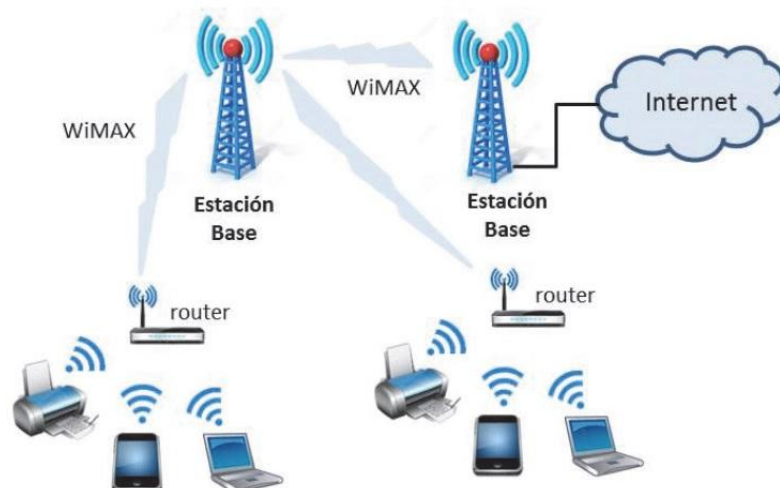


Figura 2-9 Representación de transmisión WiMAX

WIMAX trabaja con la banda con licencia de 2 GHz a 11 GHz y otra sin licencia 10 GHz a 66 GHz que permite a los usuarios disponer de una conexión de banda ancha, que proporcionan a miles de usuarios una velocidad de transmisión de datos de hasta 70 Mbps a 50 kilómetros de distancia. [17]

El sistema *Local Multipoint Distribution Service (LMDS)* es el sistema inalámbrico que trabaja con la frecuencia de ondas microondas de 28 GHz (banda Ka). Debido a su ancho de banda de 3.5 GHz permite ofrecer servicios interactivos a sus usuarios tales como acceso a internet de alta velocidad, conexión de voz, vídeos bajo demanda, entre otros, ya que utiliza una modulación QPSK que permite reducir la interferencia aumentando la reutilización del espectro por el cual se puede obtener hasta un ancho de banda de 1Gbps.

Los sistemas LMDS utilizan estaciones bases distribuidas alrededor de la zona donde se quiere dar un servicio; dichas bases agrupan un número determinado de usuarios como hogares u oficinas generando una estructura de área basada en células donde cada una de estas puede tener un radio de entre 4 y 7 km siendo distancias relativamente cortas. Todas las estaciones bases están interconectadas entre sí, donde cada una de estas tiene la capacidad de dar servicio de transmisión de datos y telefónicos. La comunicación entre la estación base y el usuario es bidireccional por medio de señales de alta frecuencia en la cual el emplazamiento del usuario dispone de dispositivo emisor y receptor con una antena de baja potencia. La señal recibida de 28 GHz es transformada a una frecuencia intermedia compatible con los dispositivos del usuario para su visualización tanto en voz, vídeos o datos. [22]

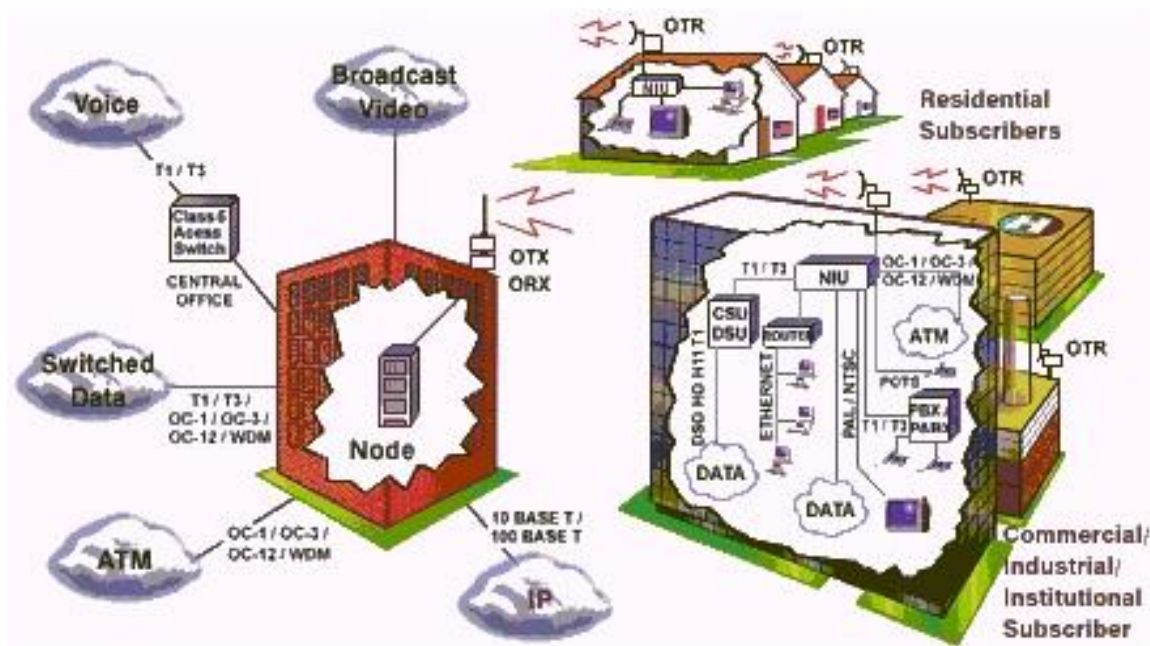


Figura 2-10 Conectividad de los diferentes elementos

2.3.1.4 Redes Wireless Wide Area Network (WWAN)

Las redes WWAN son redes de área extensa con la capacidad de cubrir grandes regiones o países. Esta tecnología es utilizada principalmente para las comunicaciones por voz y transmisión de datos de forma inalámbrica mediante radioenlace o por medio de satélites, pudiendo ser de carácter público o privado.

La conexión en las redes WWAN son establecidas por medio de antenas emisoras que envían la señal geoméricamente a través de sus dispositivos o nodos conectados entre sí de forma punto a punto en distancias cortas, mientras que para mayores distancias se utiliza el modelo de estrella. Además, para mayor seguridad de la red se usan protocolos de encriptamiento y autenticación, ya que dada su naturaleza inalámbrica es más vulnerable que la transmisión de datos o información por cable.

Las redes WWAN tienen una mayor velocidad de transmisión de datos si se compara con una red WAN. Con respecto a la movilidad las redes WWAN son mejores que las redes WAN, pero como punto negativo tiene una mayor tasa de interrupciones de las conexiones. La diferencia principal entre las redes WWAN y WMAN radica en que las redes WWAN usan tecnologías de comunicación móviles que van cambiando según el tipo de tecnología que ese esté utilizando; estos sistemas pueden ser CDPD, CDMA2000, LMDS y HSPA, 3G, 4G, SigFox, LoRa, NB-IoT y la tecnología 5G que se está implementando a nivel global. [22]

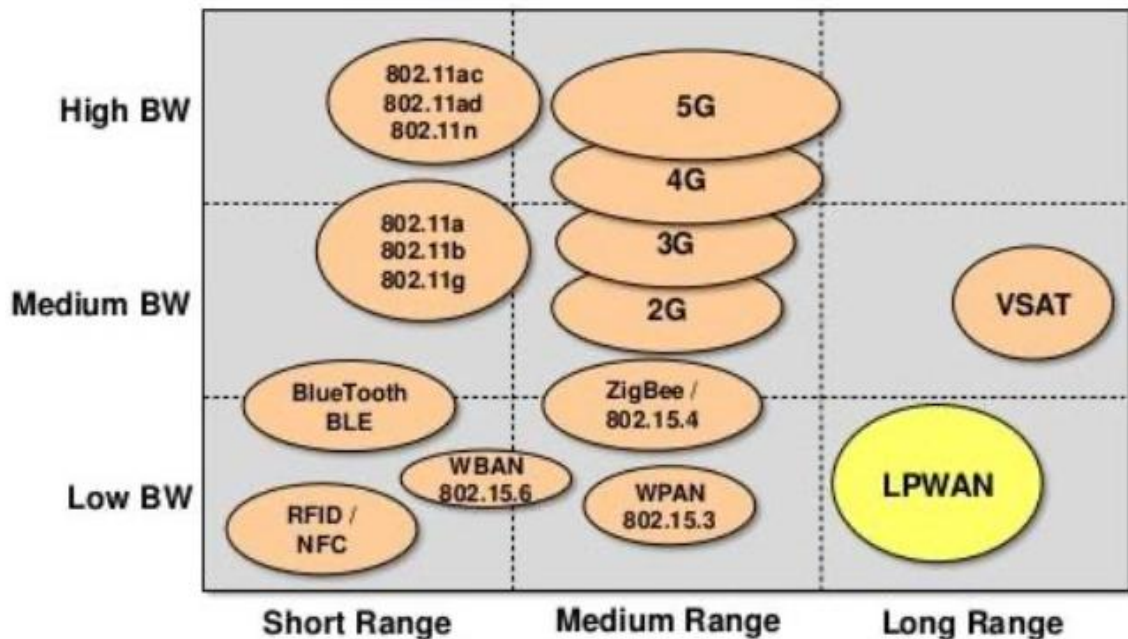


Figura 2-11 Cuadro de las diferentes tecnologías en función a su alcance de transmisión [22]

2.3.2 Internet of Things (IoT)

Desde la creación de los primeros ordenadores, la aparición del internet, los constantes avances de las tecnologías de comunicación, maquinarias, vehículos y electrodomésticos, tuvieron como fin de facilitar la vida a las personas tanto en su vida personal, laboral y en la forma de relacionarse. Desde los años ochenta ya se estudiaba la posibilidad de interconectar maquinarias por medio de sensores e internet para dar información de importancia a servidores, con el objetivo de hacer el trabajo más eficiente. Por ejemplo, en los años ochenta en la *Universidad de Carnegie Mellon* ubicada en *Pittsburgh, Pensilvania*, los programadores por medio de internet podían saber el estado de las bebidas de la máquina expendedora perteneciente a la empresa de Coca-Cola, siendo el primer contacto con la tecnología IoT.

Kevin Ashton, cofundador del *Auto-ID Center en MIT*, fue la primera persona que utilizó el termino “*Internet of Things*” en 1999 con el objetivo de llamar la atención de *P&G* para la *ID de Frecuencia de Radio (RFID)*. El mismo año salió el libro “*When Things Start to Thinks*” del profesor del *MIT Niel Gershernfeld*, en el cual definió con claridad la tecnología IoT, aunque el término no es exactamente por el que hoy es conocida esta tecnología.

Durante las dos últimas décadas hubo un desarrollo constante de la tecnología, a la vez que se buscaba diseñar dispositivos cada vez más pequeños y eficientes tanto por su consumo como por la forma de desarrollar un trabajo. Los avances no se han detenido cuando las personas estuvieron interconectadas por medio de internet y por medio de una gran variedad de dispositivos, sino que ha continuado buscando también la interconectividad entre dispositivos, de forma que mediante un dispositivo central controlado por una persona o por medio de una configuración programada, los

dispositivos receptores o nodos finales realicen tareas sin la necesidad que una persona esté físicamente allí. Se espera que el concepto IoT sea la próxima gran revolución tecnológica. [33]



Figura 2-12 Logo IoT

En la actualidad el concepto IoT está en los sectores de la domótica, industria, salud, eficiencia energética, sector agrícola y turismo. El objetivo para el futuro es crear ciudades inteligentes para facilitar la vida de las personas [23].

El concepto IoT consiste en la conexión de diferentes elementos como son *nodos finales*, *concentrator/Gateway*, *servidor network* y el servidor de la aplicación. Los nodos finales son los sensores que dispone el dispositivo de monitorización. Estos son los responsables de tomar los datos para transmitirlos al *Gateway*. El *Gateway* recopila todos los datos obtenidos de los sensores y los transmite al servidor *network*; dicha transmisión puede ser enviada por diferentes sistemas de transmisión inalámbricos como *WiFi*, *Bluetooth*, *2G*, *3G* y *4G*, entre otros. Una vez los datos obtenidos están en el servidor *network* los procesa para que el servidor de la aplicación muestre los datos al operario. Este paso puede ser no necesario ya que por medio de programación puede realizar la comunicación entre diferentes dispositivos y estos a su vez pueden realizar las tareas sin la intervención humana.

Las principales características de IoT son:

- Bajo consumo eléctrico de los dispositivos, ya que uno de los objetivos es poder utilizar batería que permita que el dispositivo esté trabajando durante largos periodos de tiempo sin la necesidad de cargar o cambiar la batería constantemente.
- Bajo coste de conectividad. Dependiendo del sistema utilizado estos costes pueden ser pequeños pagos periódicos o no tener que pagar por la conectividad.
- Bajo coste de la fabricación de los dispositivos.
- Grandes rangos de cobertura.

[22]

Uno de los objetivos de este proyecto es el diseñar un sistema que pueda transmitir datos a larga distancia con el menor coste posible del dispositivo, que pueda además funcionar durante largos periodos de trabajo sin necesidad de cambiar la batería del dispositivo y sin gastos adicionales de pagos periódicos por el servicio. Para escoger la tecnología más conveniente para este proyecto se realiza la comparación entre las tecnologías más importantes del mercado LoRa, SigFox y NB-IoT.



Figura 2-13 Logotipo Tecnología SigFox

Tecnología SigFox

Sigfox es un operador de red francés que ha desplegado una red IoT basada en la tecnología ETSI *Low Throughput Network (LTN)* y basada en la modulación diferencial *Differential Binary Phase-Shift Keying (DBPSK)* para enviar datos y la modulación GFSK para la recepción de datos. Tanto las bandas de emisión como la de recepción de datos usan la tecnología *Ultra Narrow Band (UNB)* que utiliza la banda libre de 868 MHz en *Europa* y 915 MHz en *Estados Unidos*. Esta tecnología está desplegada en toda la Europa, en la mayoría de los países de América, en Sudáfrica, Japón, entre otros. SigFox es actualmente la tecnología IoT más utilizada.

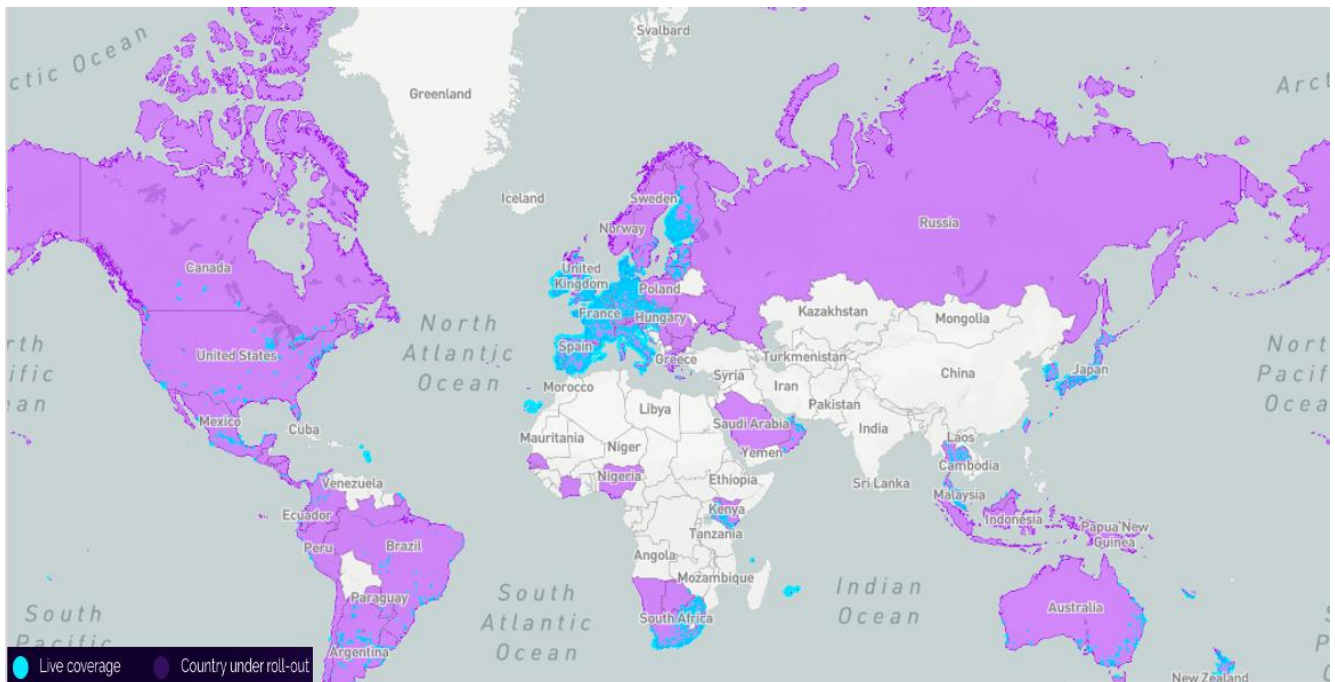


Figura 2-14 Cobertura de tecnología SigFox

Este tipo de tecnologías aprovecha el pequeño tamaño de los paquetes enviados para alcanzar grandes distancias de transmisión. Para una mayor seguridad en la transmisión de datos los paquetes enviados están compuestos por una parte fija y otra variable. La parte fija es la cabecera que está formada por el identificador del dispositivo y otros metadatos con un peso de 12 bytes, mientras que su parte variable cuenta con la trama a transmitir de hasta 12 bytes y por ultimo la autenticación de los parámetros. [22]

Las características positivas a tener en cuenta de la tecnología *SigFox* son la emisión eficaz de datos desde los nodos finales hasta las estaciones base (subida de datos) es eficaz, con una velocidad de hasta 100 bps, y el alcance que ofrece siendo entre 30-50 km en áreas rurales, mientras que en áreas urbanas es de entre 3-10 km. Una de las características más importantes es que disminuyendo el tamaño del mensaje a enviar las distancias de recepción puede ser mucho mayor.

Las características negativas son que los envíos de datos desde la estación base hasta los nodos finales (descarga de datos) es más lenta que la subida de datos, y que para hacerse con los servicios de

esta tecnología hay que pagar una suscripción y posteriormente realizar pagos periódicos por los servicios que permite transmitir hasta 140 mensajes al día con un tamaño máximo de 12 bytes, (esto representa aproximadamente 1 mensaje cada 10 minutos). [22]



Figura 2-15 Logotipo tecnología NB-IoT [22]

Tecnología Narrowband-IoT (NB-IoT)

La tecnología NB-IoT surge por el crecimiento de la tecnología LPWAN, con los objetivos de conectar objetos cotidianos a internet, que no requieren de transmisión de gran tamaño de datos de una forma esporádica, bajo consumo energético y conexiones masivas, e integrarse en redes de Telefonía Móvil del *Third Generation Partnership (3GPP)* como es el *Release 13* o como son las redes *General Packet Radio Service (GPRS)*, *Global System for Mobile (GSM)*, *LTE* y *LT-Advance* aprovechando que estas redes aún existentes en muchos países del mundo. Esta tecnología trabaja en el ancho de banda de 180-200 kHz y la comunicación *Machine to Machine (M2M)*.

Las características principales de la tecnología NB-IoT que la hacen competitiva antes otras tecnologías como LoRa o SigFox son soportar más de 5200 conexiones por celda haciéndola limitada. Cada portadora trabaja con un ancho de banda de 180 kHz. La retransmisión de datos se realiza de forma múltiple con una señal con interferencia a ruido mejorada, el modelo de codificación usado es el QPSK, dispone de excelente cobertura con aproximadamente 20 dB haciéndola mejor que la tecnología GSM y tiene bajo consumo que hace que su batería tenga una duración aproximada de 10 años. [23]

Característica	Descarga de datos	Subida de datos
Modulación	QPSK	QPSK o BPSK
Método de acceso al medio	OFDME	SC-FDMA
Tasa de transmisión	160-250 kbps	160-200 kbps

Tabla 4 Datos de tecnología NB-IoT [23]



Figura 22-16 Logotipo TECNOLOGÍA LoRa

El sistema *Long Range Radio (LoRa)* es un sistema inalámbrico de transmisión de datos *Low Power Wide Area Network (LPWAN)* creada por la empresa francesa *Cycleo*. Posteriormente fue vendida a la empresa *Semtech* que realizó una alianza empresarial con empresas como *Actility*, *Bouygues Telecom*, *IBM*, *KPN*, *Microchip*, *Orange*, *Proximus*, entre otras para formar *Alliance LoRa*.

La tecnología LoRa utiliza una modulación espectral ensanchada de radiofrecuencia con ancho de banda ISM 868 MHz y 915 MHz, que permite el envío bidireccional de datos de punto a punto (P2P). Está destinada a redes M2M e IoT con el objetivo de crear ciudades inteligentes interconectando dispositivos electrónicos. Para esto se creó el protocolo *LoRaWAN* estandarizado IEEE 802.15.4g.

LoRa es un sistema diseñado para conectar enlaces entre dispositivos con rango de entre 2 y 5 kilómetros en zonas urbanas y 15 kilómetros en zonas suburbanas. Estas distancias son aproximadas y en condiciones óptimas de línea de vista. Como contraprestación tiene una baja tasa de transmisión de datos de hasta 50 Kbps siendo ideal para dispositivos que trabajan con batería, teniendo que enviar datos periódicamente a corta-media distancia.

La tecnología *LoRaWAN* tiene una arquitectura de su sistema con el objetivo de ofrecer fiabilidad y robustez en sus capas de red y física garantizando velocidad de datos, administrar las frecuencias de comunicación y la potencia de todos los dispositivos; para que esto sea posible este sistema se divide en *Gateways*, nodos finales, servidores de aplicación y servidores de red.

Aplicación			
LoRa MAC			
Opciones de MAC			
Clase A	Clase B		Clase C
Modulación de LoRa			
Banda Regional ISM			
EU 868 MHz	EU 433 MHz	AS 430 MHz	US 915 MHz

Tabla 5 Estructura Tecnología LoRa [24]

Los dispositivos LoRaWAN se dividen en tres según el funcionamiento: [24]

La clase A son dispositivos que tienen un mayor ahorro de energía. esto se debe a que una vez que envían los datos al Gateway, entran en modo escucha. Esta clase de dispositivos son ideales si se utiliza como fuente de alimentación una batería. Actualmente estos mecanismos son utilizados en campos como la agricultura, plantas de captación solar, estudios de la meteorología, entre otros, que envían datos periódicamente desde un sensor utilizado para monitorizar el funcionamiento adecuado del sistema.

La clase B son dispositivos en los que el usuario establece las ventanas de recepción en tiempos determinados por lo cual el consumo de energía es mayor que los de clase A.

La clase C son dispositivos que se mantienen encendidos recibiendo datos la gran mayoría de tiempo. Cuando se encuentran transmitiendo datos es el único momento en el que no pueden recibir datos. Este tipo de dispositivos es el que tiene mayor consumo energético por lo cual tiene que estar alimentado a la red. Son comunes en actuadores que necesitan ser controlados en cualquier momento como es el caso de las viviendas domotizadas.

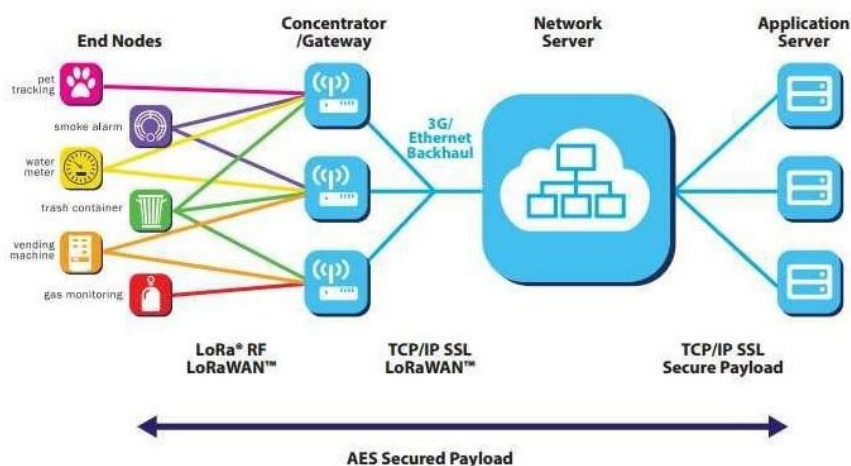


Figura 2-17 Componentes del sistema LoRa

La tecnología LoRa puede ser utilizada en cualquier lugar donde se necesite extraer y enviar datos para tener el control remoto del sistema de forma inalámbrica como son sistemas de alumbrado, alarmas, control de tráfico, entre otras aplicaciones. LoRa está trabajando con aplicaciones que en un futuro a corta plazo puede facilitar el control y monitorización de las cosas, como pueden ser:

- Agricultura inteligente; como es el programa ioTREES que se dedica a la detección temprana del picudo rojo en palmeras. [27]
- Automatización industrial.
- Ciudades inteligentes.
- Intercambio de información entre máquinas remotas.
- Medidores inteligentes.
- Redes de sensores.
- El sistema LoRa puede ser un sistema de red pública o privada.[9]

Comparación



Figura 2-18 Comparativa principales tecnologías LPWAN [18]

Para cumplir con los objetivos de este trabajo se realiza el estudio de las principales tecnologías LoRa, SigFox y NB-IoT que permiten llevar a cabo el concepto IoT, que trabajan con el sistema de LPWAN. Estas tecnologías no compiten entre ellas ya que son complementarias porque cada una ofrecen ventajas compensan las áreas de trabajo de las otras dos tecnologías como se explica más detalladamente en los párrafos siguientes de este apartado.

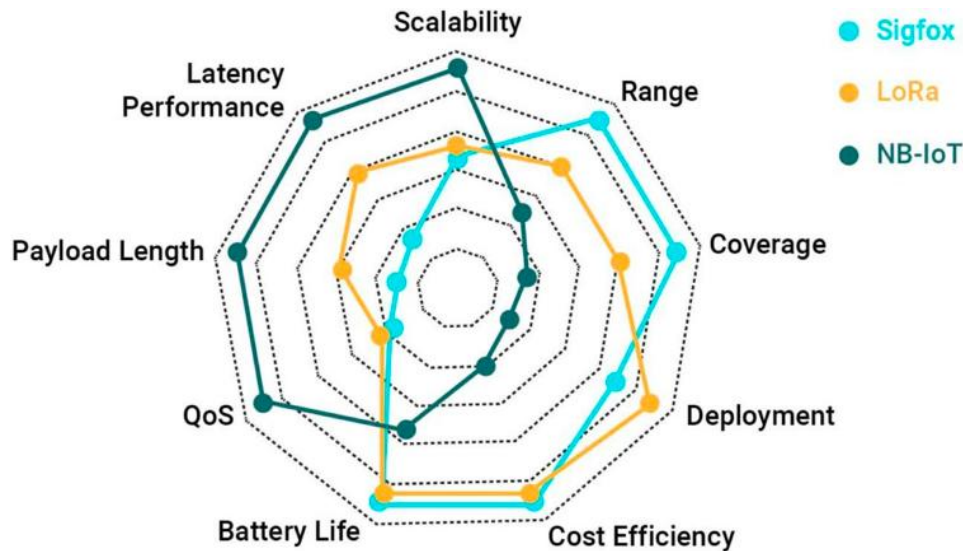


Figura 2-19 Comparativa principales tecnologías LPWAN [24]

Cabe destacar que las tecnologías surgen de las necesidades de usuarios o de mercados significativos, y parten de las diferentes tecnologías existentes donde sus parámetros cubren diferentes medidores. Según sea el alcance local o más amplio además del tipo de trabajo que se necesite cubrir como por ejemplo si se va a utilizar en interiores o exteriores, el tráfico de datos que enviará, la velocidad del envío y recepción de datos, el coste, duración de la batería y mantenimiento, como se refleja en la Tabla 6, dentro las principales tecnologías podemos encontrar Lorawan, NB-IoT y SygFog, cada una teniendo grandes aportaciones para sus diferentes aplicaciones. Principalmente LPWAN, basándose en el diseño propuesto, se caracteriza principalmente por su radio de acción, que a diferencia de otras tecnologías que solo cubren entorno a metros, y pueden servir para redes locales y dispositivos fijos. Lorawan permite generar redes móviles con radios de acción de kilómetros. Este trabajo hará uso de esta tecnología.

	LoRa	SigFox	NB-IoT
Coste UE	Bajo		
Esquema modulación	FSK	GFSK/DBPSK	BPSK, QPSK
Batería	De larga duración (años)		
Ancho de banda (canal)	125 kHz	100kHz	180 kHz
Banda de trabajo MHz	868/915 MHz	915/928 MHz	700,800,900 MHz
Movilidad permitida UE	Inmune a interferencias	Optimiza frecuencia aleatoria para tx canal	Mejor cobertura
Ventaja	Latencia alta	Sin FEC. Interferencia	Sin handoff baja inmunidad al ruido
Inconvenientes	Latencia alta	Sin FEC. Interferencia	Sin handoff, baja inmunidad al ruido

Tabla 6 Parámetros comparativos tecnologías LPWAN, Aspecto Radio [24]

En la Tabla 7 se pueden observar las características referentes al tráfico generado que las distintas tecnologías LPWAN son capaces de gestionar. Dichas características son en condiciones ideales. [24]

	LoRa	SigFox	NB-IoT
Tasa de transmisión (kbps)	50	0.1	200
Latencia (ms)	1-10	1-30	<10.000
Throughput (kbps)	50	0.1	200
Requisitos	Gateway	SigFox modem y Network	SW up grading and SIM
Longitud máxima carga	Sin límite	140 mensajes (1680 bytes) al día vía UL	Sin limite
Ventajas	Tasa adaptativa	Alta fiabilidad	PSM eDRX
Inconveniente	Tamaño máximo de paquete. Sin reconocimiento de paquetes	Poca seguridad	Perdidas acuse de recibo
Número de elementos por celda	<20.000	<20.000	>52.000

Tabla 7 Parámetros comparativos tecnologías LPWAN. Aspectos de tráfico [24]

En la Tabla 8 se puede observar datos de las principales diferencias de las tecnologías usadas más conocidas y usadas en los últimos años. Se muestra el consumo de los dispositivos y eficiencia energética, que se extrae de la vida de la batería, así como la coexistencia, disponibilidad, inmunidad a interferencias, seguridad y movilidad y localización de las tecnologías, para facilitar la comprensión y estudio de cada tecnología.

	LoRa	SigFox	NB-IoT
Vida de batería	105 meses	90 meses	>10 años
Disponibilidad	Actual	Actual	2015
Eficiencia energética	Muy alta	Muy alta	Muy alta
Inmunidad a interferencia	Muy alta	Baja	Baja
Coexistencia	Si	No	No
Seguridad	Si	No	No
Movilidad/localización	Si	Movilidad limitada / no localización	Movilidad limitada / no localización

Tabla 8 Parámetros comparativos tecnologías LPWAN. Aspectos de eficiencia [22] [23] [24] [25]

Tras de realizar el análisis de las tablas comparativas entre las diferentes tecnologías, se puede concluir que la tecnología NB-Iot, es una tecnología de una banda de frecuencia muy estrecha de solo

200 Khz, con poca capacidad de envío de bits, insuficiente para este proyecto, pero de la que cabe destacar su buena cobertura en interiores, exteriores y subterráneos, muy adecuada para tecnologías que transmiten datos solo de forma ocasional. SigFox tiene un gran valor al ofrecer servicio muy completo, pero su desventaja principal es la dependencia de proveedores que involucre el servicio, por lo que no es adecuado para el uso del sistema propuesto, ya que la importancia del diseño es el bajo coste y autonomía sin pagos periódicos. Por ultimo la tecnología de LoRaWAN nos ofrece un abanico de oportunidades, empezando por la capacidad de mantener una distancia considerable y con aparatos móviles, de un bajo coste, y sin necesidad de empresas intermediarias ni existencia de pago de cuotas periódicas por el servicio ofrecido, ajustándose a las necesidades del proyecto planteado, permitiendo una movilidad, flexibilidad, sin mantenimiento.

3 DESARROLLO DEL PROYECTO

El ser humano, a lo largo de su historia, ha buscado desarrollar la tecnología para facilitar ciertas tareas, resultando, en muchas ocasiones, en descubrimientos e inventos que supusieron un impacto importante en la vida de las personas que podían acceder a los mismos. La rueda revolucionó el transporte, la máquina de vapor dio paso a la propulsión de barcos y automóviles. Hasta llegar a la tecnología actual.

La tecnología de las tres últimas décadas ha cambiado radicalmente, transformando una sociedad analógica en una sociedad digitalizada que cada día se acerca más a la tecnología “*make it yourself*”. Esto es posible ya que la información está al alcance de todos, en cualquier lugar y momento; el internet, la comercialización de productos electrónicos, impresoras 3D y todo lo que se puede necesitar, información en tutoriales, hace que las personas estén motivadas a crear los dispositivos que les facilite su trabajo o les haga su vida un poco más cómoda.

La creación de dispositivos Arduino en el 2003 surgió en el *Interaction Design Ivrea* en Italia como una herramienta para alumnos y profesores con el objetivo de crear fácilmente dispositivos que pudiesen interactuar entre sí. Esto ha derivado a que en la actualidad el concepto “*make it yourself*” esté presente en nuestra sociedad.

La revolución del concepto “*make it yourself*” ha logrado solventar problemas y preocupaciones de la sociedad dando paso a infinidad de productos como monitorización de vivienda, seguimiento de personas como es el caso de las pulseras que llevan las personas con órdenes de alejamiento o relojes GPS usados en el campo del deporte/militar o para que los padres sepan de la ubicación de sus hijos en todo momento, entre otros ejemplos.

Dada las ventajas de la tecnología actual, se utiliza esta, para desarrollar este proyecto que tiene como objetivo la creación de un sistema de localización y seguimiento de personas o cosas, tanto en el ámbito civil como en el militar. Este sistema se lleva a cabo utilizando los conceptos “*make it yourself*” e *IoT*, además del uso de diferentes módulos para conformar el sistema GPS como es el dispositivo GPS emisor (GPS-Tx) y el dispositivo receptor (DRx).

3.1 Composición del sistema

El sistema localizador GPS a compuesto por tres elementos. Con la configuración de estos elementos se puede realizar la localización, seguimiento y representación en tiempo real. Los componentes del dispositivo se describen a continuación.

Dispositivo GPS emisor (GPS-Tx)

Llamaremos GPS-Tx es el encargado de enlazar con los diferentes satélites de geolocalización GPS a través de la antena GPS GT-7U, de almacenar los datos de localización (latitud y longitud) en una tarjeta microSD y enviar los datos obtenidos por medio de la antena LoRa al DRx, como se muestra en la Figura 3-1.

El almacenamiento de datos almacenados en la tarjeta microSD pueden ser usados para comprobar el itinerario realizado si el usuario quiere emplearlo como seguimiento de itinerarios o si el GPS-Tx no ha enviado los datos al DRx tanto por estar fuera de alcance de enlace o si se quiere usar individualmente.

Otra aplicación que tiene este dispositivo es la visualización de datos de posicionamiento (latitud y longitud) en tiempo real. Esta visualización se realiza por media de la pantalla OLED de 0,96 pulgadas que viene integrado en el dispositivo.

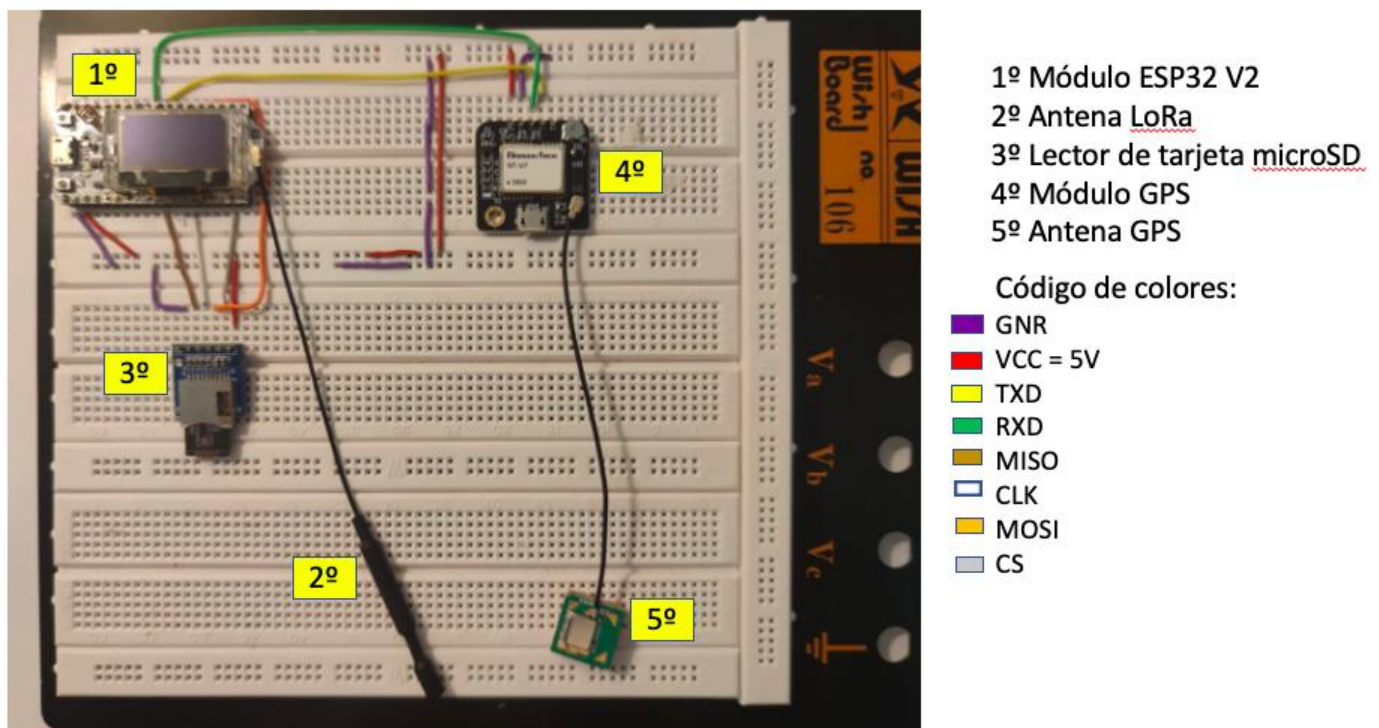


Figura 3-1 Partes que conforman el GPS-Tx y su conexión

Dispositivo central receptor (DRx)

El DRx es el responsable de recibir los datos enviados por el GPS-Tx. Esto se lleva a cabo mediante el enlace existente entre los dos dispositivos a través de la antena LoRa de cada dispositivo.

Una vez recibidos los datos, el DRx lo transmite al dispositivo con acceso a internet (DAI) por medio del cable USB, para su posterior visualización en dicho dispositivo.

Dispositivo con acceso a internet (DAI)

Para la visualización en tiempo real de los datos recibidos, se puede optar por un ordenador o una tableta, ya que la condición que este dispositivo ha de cumplir es que disponga de conexión a internet. El uso de DAI es el mismo tanto para el modo de trabajo de seguimiento y visualización online como para el modo de estudio y visualización de itinerarios.

En el modo de seguimiento y visualización en tiempo real, el dispositivo con acceso a internet tiene que conectarse al DRx; ya que las coordenadas de posicionamiento del GPS-Tx aparecen en la pantalla del DRx pudiendo visualizar dichas coordenadas en las páginas web Google Maps, Iberix,

entre otras. Mientras que si se quiere usar el DAI para el estudio y visualización de itinerarios este dispositivo se tiene que conectar al dispositivo GPS-Tx y usar los datos almacenados en la tarjeta microSD y obtener las coordenadas almacenadas en con el nombre DatosGPS.txt.

La segunda misión de este dispositivo es de suministrar la energía necesaria al DRx para su funcionamiento. Esto se lleva a cabo conectando ambos dispositivos por medio de un cable USB.

3.2 Material empleado

En este apartado se explica la utilidad de cada componente, se comparan las diferentes opciones y se explica el motivo de elección de los elementos para este proyecto. Para una fácil comprensión de los diferentes componentes se diferencian entre los distintos elementos que forman el sistema localizador GPS.

3.2.1 Dispositivo GPS-Tx

3.2.1.1 Antena GPS

La antena GPS con su correspondiente módulo es uno de los componentes más importantes ya que es el sistema responsable de captar la señal de los satélites y estaciones de posicionamiento para posteriormente transmitirlo al Arduino responsable del tratamiento de los datos obtenidos. En la elección de este dispositivo se evalúan las siguientes opciones:

Antena GPS GT-7U

Este módulo GPS es de alta sensibilidad de seguimiento con gran cobertura de posicionamiento, pequeñas dimensiones (siendo uno de los más compactos del mercado) con bajo consumo energético y por lo tanto ideal para aplicaciones de dispositivos de mano como PDA, aplicaciones para vehículos y aplicaciones de GPS; las características del módulo se muestran en la Tabla 9.

Columna 1	Columna 2
Voltaje de funcionamiento	3,3 – 5,2 V
Corriente de funcionamiento	Modo normal 50 mA Modo ahorro 30 mA
Tasa de Baud de puerto de serie	9600 bps
Formato de comunicación	8N1
Tensión lógica de la interfaz	3,3 V o 5 V
Interfaz de antena externa	IPX
Dimensiones	22 x 21 x 0,5 mm
Peso	8,5 g

Tabla 9 Características antena GPS GT-U7.

Antena GPS GY-GPS6MV2/NEO-6M

Esta antena GPS contiene un módulo U-Blox NEO 6M equipado en el *Printer Circuit Board (PCB)*, una pila botón que permite mantener los datos configurados en la memoria *Electrically Erasable Programmable Read Memory (EEPROM)*; las características del módulo se muestran en la Tabla 10.

Columna 1	Columna 2
Voltaje de funcionamiento	3,3 – 5 V
Corriente de funcionamiento	Modo normal 50 mA Modo ahorro 30 mA
Tasa de Baud de puerto de serie	9600 bps
Formato de comunicación	
Tensión lógica de la interfaz	3,3 V o 5 V
Interfaz de antena externa	TTL
Dimensiones módulo	25 x 35 mm
Dimensiones antena	25 x 25 mm

Tabla 10 Características antena NEO 6M

Dado que ambos módulos tienen características de consumo y tasa de Baud iguales, que la diferencia de la interfaz no es tan relevante y siendo la diferencia más importante el tamaño del módulo, se escoge es la antena GPS GT-7U ya que uno de los objetivos es alcanzar el menor tamaño posible del dispositivo.

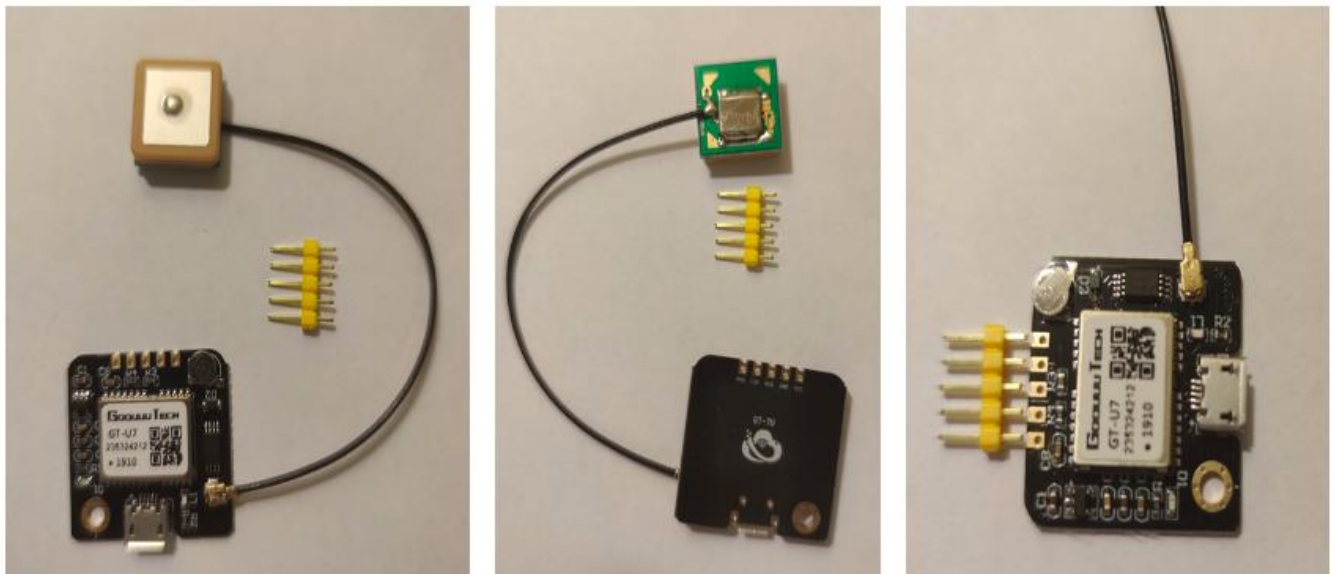


Figura 3-2 Antena GPS GT-7U

3.2.1.2 Módulo ESP

Este módulo es una forma sencilla y económica para proporcionar WiFi y Bluetooth a un Arduino. Este dispositivo es compatible con Windows.

Módulo ESP32

El ESP32 es un procesador del fabricante Espressif. Dispone de conexión Wifi y Bluetooth 4.2 (BR/EDR y BLE), trabaja con un procesador *Tensilaca Xtensa Dual- Core LX6* de 32 bits a 160 o 240

Mhz; dispone de una memoria RAM de 520 Kb y una ROM interna de 448 Kb; la conexión es por medio de una interfaz I2S:

- Procesador *dual core Xtensa LX6* de 32 bit.
- Es compatible Arduino con pluggin.
- Velocidad de reloj: entre 160Mhz y 240 Mhz.
- WiFi integrado: *Aces point & Station*.
- Bluetooth 4.2 2.4 GHz; BT 2.0 y 4.0 BLE.
- 36 GPIO pins.
- 16 x *Analog-to-Digital Conveter (ADC)* de 12 bit de resolución y límite de entrada a 1V, 2V y 4V.
- 2 x *Digital to Analog Converter (DAC)* de 8 bits.
- Pueden definirse hasta 16 canales de PWM.
- 2 x UART o puertas serie.
- 2 x I2C channels y 4 x SPI channels.

Módulo TTGO ESP32 V2 más antena LoRa

El módulo TTGO ESP32 LoRa tiene integrada una antena LoRa y una pantalla OLED de 0,96 pulgadas, haciendo este dispositivo de menor tamaño y añadiendo la conectividad LoRa [8]. Las características del módulo vienen en las Tablas 12 y 13.

Característica de antena LoRa	Valores
Frecuencia	868 / 915 MHz
Interfaz	IPEX
Sensibilidad	> 148 dBm
Potencia de salida	+ 20 dBm
Distancia de transmisión	Corta/media distancia
-	-

Tabla 11 Características antena LoRa.

Características Módulo	Valores
Antena WiFi	Flash de 32 MB
Voltaje de funcionamiento	3,3 V a 7 V
Rango de temperatura de funcionamiento	-40° C a +90° C
Protocolo del software Sniffer	Modos Station, SoftAP y WiFi Direct
Velocidad de datos	150 Mbps a 11n HT40

	72 Mbps a 11nHT20
	54 Mbps a 11g
	11 Mbps a 11b
	19,5 dBm a 11b
Potencia de transmisión	15,5 dBm a 11g
	15,5 dBm a 11n
Sensibilidad del receptor	Hasta -98 dBm
Rendimiento sostenido UDP	135 Mbps

Tabla 12 Características módulo TTGO ESP V2 [8]

Una vez analizadas las características de ambos dispositivos se opta por el módulo *TTGO ESP32* más antena LoRa, al ser un dispositivo más compacto por sus dimensiones y prestaciones; ya que al tener integrada la antena LoRa reduce el tamaño de los dispositivos GPS-Tx y DRx y adicionalmente dispone de una pantalla que facilita la visualización de las coordenadas de localización del sistema emisor.

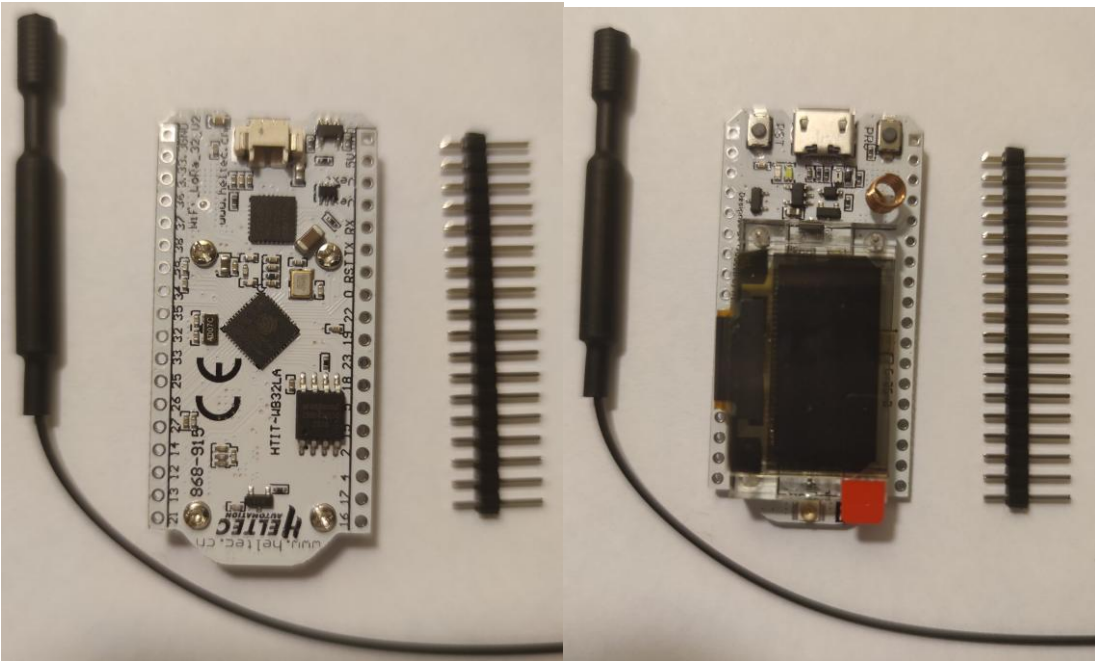


Figura 3-3 Módulo TTGO ESP32 V2 con antena LoRa

3.2.1.3 Módulo lector de tarjeta microSD

El módulo lector de tarjeta microSD es el encargado de leer, escribir información de la tarjeta microSD (encargada del almacenamiento de datos generados por el Arduino). Este módulo cuenta con un zócalo donde va la tarjeta de memoria microSD, pines de conexión para alimentación y conexión al Arduino mediante la interfaz serie SPI, circuitos de regulador lineal y un nivelador de señal de tensión de 5 a 3,3 V ambos impresos en el módulo que permiten poder conectar de forma directa a Arduino con alimentación de 5 V.

La conexión de este módulo se realiza por medio de 6 pines; los pines *CS* (*Slave Select* o *Chip Select*), *SCK* (*Serial Clock*), *MOSI* (*Master Out Slave In*) y *MISO* (*Master In Slave Out*) son

encargados de comunicar con el resto de módulos usando interfaz SPI; los pines VCC y GND son los responsables de alimentar al módulo lector de tarjetas a una tensión de 5 V.

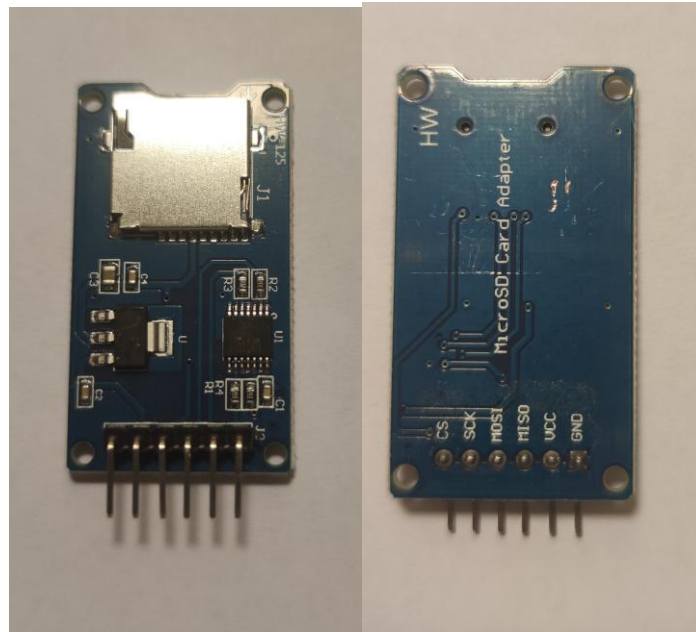


Figura 3-4 Módulo lector de tarjeta micro SD

3.2.1.4 Batería

La batería utilizada para este sistema es un *Power Bank NL-PBCF19-SP* con el cometido de suministrar la tensión de 5 V al GPS-Tx por medio de una conexión micro USB, las características del módulo vienen en la Tabla 14.

Característica	Valores
Tipo	Batería portátil
Tecnología	Li-Ion
Fuente de energía	Batería Litio Recargable
Batería mAh	4000 mAh
Dimensiones	83 x 71 x 23 mm
Fuente	Conectrolinformatica.com
Consumo	< 500 nA
Batería	CR2032 o CR2025 de 3 V

Tabla 13 Características de la batería.



Aunque para el diseño y realización de las diversas pruebas se ha utilizado esta batería, es necesario utilizar una más pequeña y ligera para hacer el producto más atractivo y siendo así coherente con las características buscadas en los otros elementos escogidos.

3.2.2 Dispositivo DRx

3.2.2.1 Módulo TTGO ESP32 V2 más antena LoRa

Este módulo es el mismo que se utiliza en el dispositivo GPS Tx (emisor) explicado anteriormente, cumpliendo con las mismas características y objetivos de tamaños. La diferencia es el cometido y los componentes que acompañan a cada módulo. El cometido en este dispositivo es el de recepción de los datos por medio de la antena LoRa, y su posterior transferencia al dispositivo con acceso a internet.

3.2.2.2 Dispositivo DAI

Para la visualización de los datos de localización (longitud y latitud) emitidos por el módulo GPS Tx es necesario que el elemento DRx esté conectado a un dispositivo con acceso a internet y que será el encargado de almacenar los datos recibidos y mediante web Google Maps para representar la ubicación en tiempo real del dispositivo GPS Tx.

Este dispositivo puede ser un ordenador, tableta o teléfono móvil con acceso a internet siendo la condición necesaria para poder visualizar los datos recibidos o en caso de no disponer conexión a internet se puede visualizar la posición por medio de la aplicación de Google Earth. Dicho dispositivo tiene un segundo cometido el cual es el de proporcionar la energía necesaria al DRx para la recepción de los datos.

3.3 Configuración del sistema

Este sistema está compuesto por los módulos GPS-Tx, DRx y el dispositivo con acceso a internet; la configuración del módulo GPS-Tx está configurada por partes que son el código y el soporte físico montado mediante la unificación de todos los elementos que lo componen, mientras que el dispositivo DRx está compuesto por el código del módulo ESP32 TTGO V2 y por el dispositivo con acceso a internet que no necesita ninguna configuración.

El montaje del dispositivo GPS-Tx se realiza por medio de un tablero de prototipado con el objetivo de facilitar la comprobación de los distintos elementos que componen el dispositivo y la correcta colocación de los cables que transmiten la información o la tensión eléctrica necesaria para el correcto funcionamiento del dispositivo; una vez comprobado que el dispositivo recibe los datos de localización procedentes de los diferentes satélites por medio de la antena GPS GT-7U y por medio del

módulo TTGO ESP32 V2 con antena LoRa (módulo central) envía los datos de posicionamiento al dispositivo al DRx con su correspondiente hora.

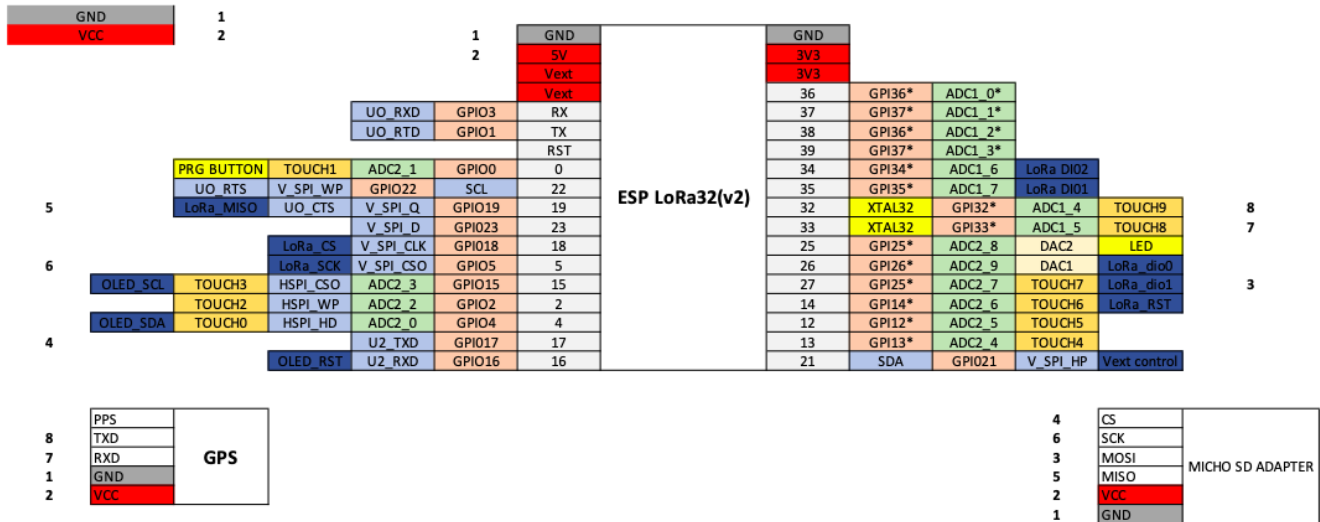


Figura 3-5 Configuración de dispositivo GPS-TX

El dispositivo es alimentado con una tensión de 5 V por medio del puerto micro USB del módulo TTGO ESP32 V2 micro SD adapter y el GPS como se puede ver en las Figuras 3-1 3-5.

El módulo GPS GT-U7 envía los datos recibidos por medio de la salida TXD conectando con el módulo por el puerto32 mientras que los datos enviados desde el módulo central salen por el puesto 33 entrando por el puerto RDx del módulo GPS como se puede apreciar en la Figura 3-5.

El módulo micro SD se conecta al módulo central por medio de los puertos MISO (Master In Slave Out), MOSI (Master Out Slave In), SCK (Serial Clock) y CS (Slave Select o Chip Select) y a los puertos 19, 27, 5 y 17 correspondientemente del módulo central como se muestra en la Figura 3-5.

El sistema Arduino dispone de su propia aplicación en la que se escribe el código y posteriormente se compila, el cual se explica en el siguiente apartado.

3.4 Envío de datos de posición

El programa consta de un único archivo en el que se utilizan diversas librerías disponibles en la web para simplificar la programación de los distintos elementos del sistema, Estas librerías son la librería SD, con funciones que ayudan a programar el guardar datos en la tarjeta SD; heltec, propia del modelo de Arduino utilizado, encargada de manejar la pantalla OLED integrada y el módulo de LoRa integrado; SoftwareSerial, encargada de permitir escoger dos pines de la placa para ser usados como protocolo UART para comunicar con el módulo GPS; y NMEA_Parser, dedicada a convertir los datos recibidos por puerto serie del GPS en datos de latitud, longitud, fecha y hora.

Para el envío de los datos de posición se crearon unas funciones que se procederá a explicar.

La función GPS_check comprueba si existen datos pendientes de leer procedentes del módulo de GPS. En caso de que no haya datos, se mostraría en la pantalla OLED integrada un mensaje especificando que el GPS es incapaz de encontrar los datos necesarios. En caso de existir dichos datos, se guardarían en las variables de latitud y longitud para su próximo envío.

Mediante la función GuardarSD, se tomarían los datos de latitud, longitud, fecha y hora obtenidos del módulo GPS y se guardarían en un archivo de texto (txt) en la tarjeta SD, separados estos datos mediante tabulados para simplificar el proceso de revisión en otro programa tipo hoja de cálculos y mostrando una medición en cada línea.

A continuación, y mediante la función DatosPantallaOLED se mostrarían, como su nombre indica, en la pantalla integrada los datos obtenidos, colocando en las esquinas superiores, derecha e izquierda,

la hora y fecha, respectivamente, y más abajo la latitud y longitud con una precisión de ocho decimales.

Para finalizar el proceso, los datos se envían a través del módulo de LoRa integrado utilizando la frecuencia de 868GHz y anunciando por puerto serie la correcta ejecución del proceso.

Una vez esta sucesión de acciones haya terminado, el dispositivo esperará un tiempo antes de volver a tomar una lectura del sensor GPS. El código implementado en el dispositivo GPS-Tx se puede consultar en el Anexo II (apartado 1 y 2).

3.5 Recepción de datos de posición

El programa del Arduino receptor solamente utiliza la librería heltec, propia del modelo de Arduino para manejar el módulo LoRa y la pantalla integrada OLED.

Mediante el uso de la librería heltec se comprueba si hay datos pendientes de leer por radio, en cuyo caso utilizando la función LeerPaquete obtiene los datos procedentes del LoRa, que con la función ParsePacket se convierten en las variables de latitud y longitud. Estas variables se muestran en la pantalla integrada OLED, como se puede apreciar en la Figura 3-6.

Una vez finalizado el proceso, o si no se detectan datos procedentes de la radio, el programa esperará un determinado tiempo antes de volver a intentar recibir la información. El código implementado en el dispositivo DRx se puede consultar en el Anexo II (apartados 3, 4, 5 y 6) en donde las principales de código están comentadas y explicadas.

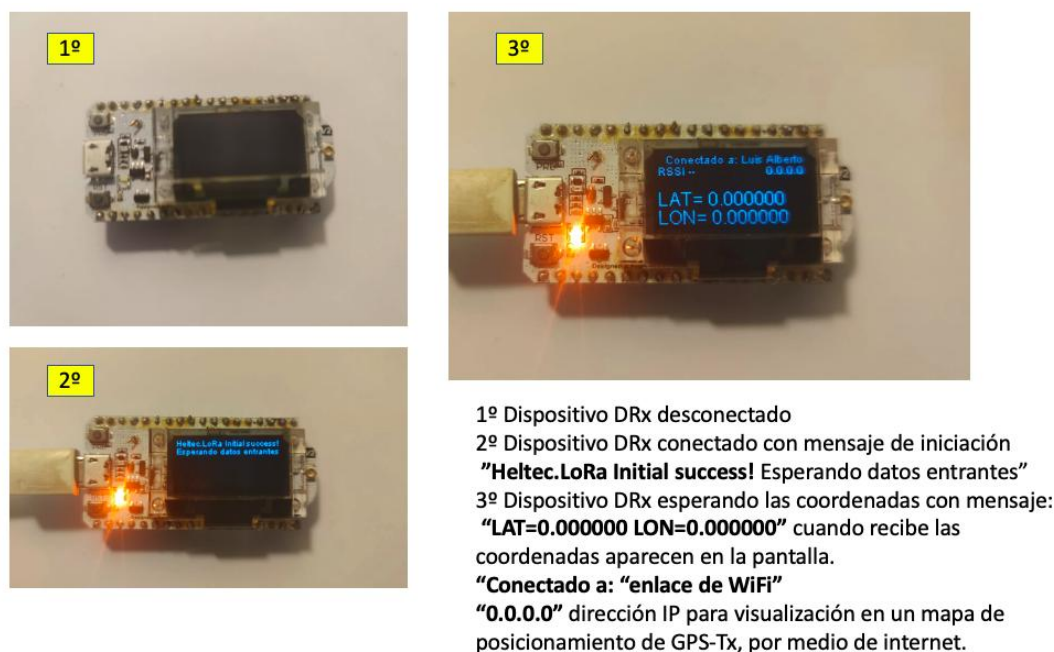


Figura 3-6 Visualización de la pantalla del DRx

4 RESULTADOS / VALIDACIÓN / PRUEBA

4.1 Prueba y resultado

El objetivo de la realización de las diferentes pruebas es la comprobación del sistema en diferentes zonas y ambientes, realizar seguimiento del GPS-Tx, tiempo de posicionamiento del dispositivo GPS-Tx y buscar los alcances máximos para los diferentes escenarios en los que puede ser utilizado este sistema; para alcanzar los objetivos se realizan diversas pruebas con ambientes, meteorologías y zonas distintas. Para ello se diferencian las zonas en urbana, rural, y costera ya que el sistema está diseñado para diferentes sectores (civil, empresarial o militar).

4.1.1 Zona urbana

La prueba en zona urbana se realiza en una zona con baja densidad de edificios y de alturas no superiores de 5 plantas, con densidad de tráfico moderado, baja densidad de vegetación y en estático. Con el objetivo de comprobar que el dispositivo GPS-Tx se posiciona correctamente, mostrando las coordenadas de longitud y latitud en el elemento GPS-Tx, almacenamiento de dichas coordenadas en la tarjeta microSD y por último la transmisión de los datos al módulo DRx. Para una mejor valoración del sistema y obtener diferentes datos se realiza la prueba en dos posiciones diferentes del dispositivo DRx.

La realización de la primera prueba tiene lugar en un espacio cerrado con el dispositivo DRx conectado a un ordenador con acceso a internet y el dispositivo GPS-Tx dentro del mismo edificio con el objetivo de comprobar el correcto posicionamiento y coordenadas proporcionados por el DRx como se puede observar en la Figura 4-1. Mediante la representación en el ordenador de los datos obtenidos se contrastan los con las coordenadas obtenidas en el posicionamiento proporcionados por la página web IGN como se muestra en la Figura 4-2; ya que de esta forma se puede comprobar la capacidad de recepción de señal y tiempo de retardo de posicionamiento en interiores.

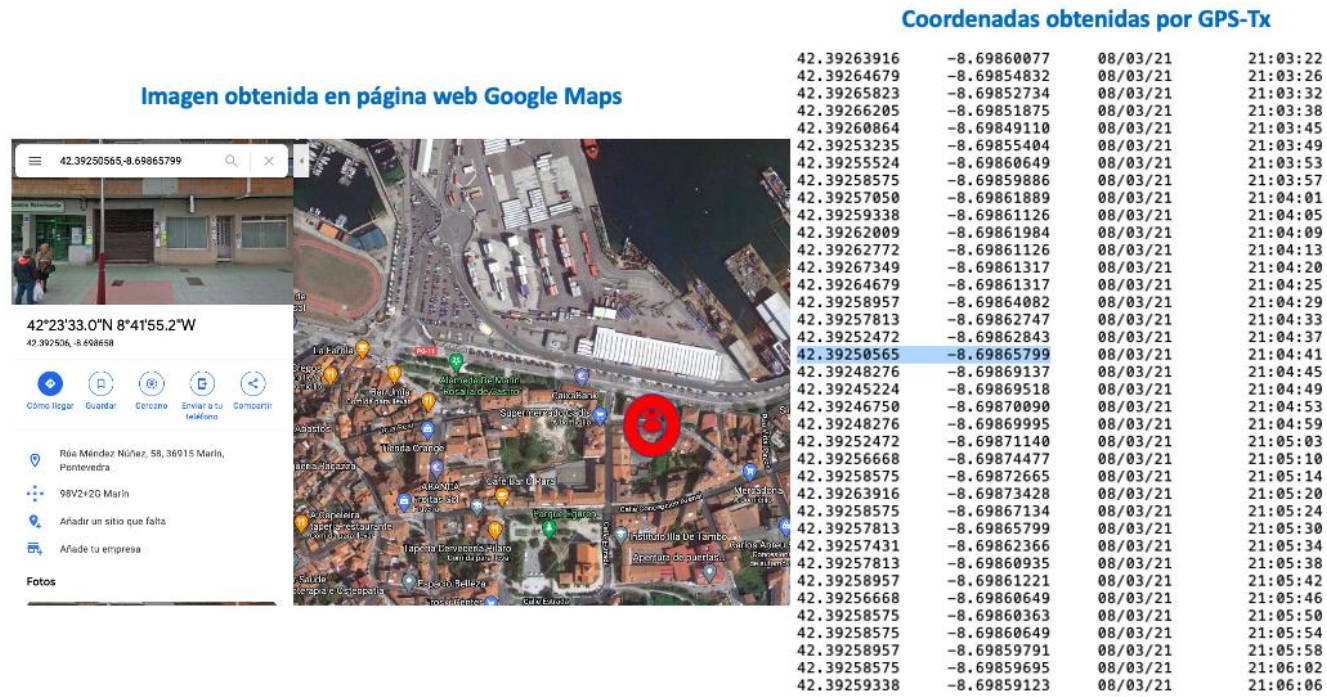


Figura 4-1 Datos obtenidos por GPS-Tx [28]



Figura 4-2 Imagen de comprobación [28]

Como resultado de esta prueba se puede observar en la Figura 4-1 esta prueba se realiza en la posición 42,39247847 -8,69875788 W según se muestra la página web IGN, mientras que los datos obtenidos por el dispositivo GPS-Tx son las coordenadas 42,39250565 -8,69865799 por lo cual la diferencia entre ambos datos obtenidos es de 5 metros aproximadamente.

4.1.2 Prueba en zona rural

La prueba del dispositivo en zona rural es realizada con el dispositivo DRx conectado a un ordenador con acceso a internet en una posición estática con una densidad de vegetación ligera mientras. El dispositivo GPX-Tx se encuentra en movimiento en zona rural con densidad de

vegetación ligera y media, con árboles de alturas aproximadas de 15 metros como se puede observar en la Figura 4-4. Las coordenadas de la posición inicial del dispositivo obtenidas por la página web IGN son 42,36308649 -8,67559432 como se puede observar en la Figura 4-3 mientras que las coordenadas obtenidas por el dispositivo GPS-Tx son las coordenadas 42,36322198 -8,67557561 como se muestra en la Figura 4-5.

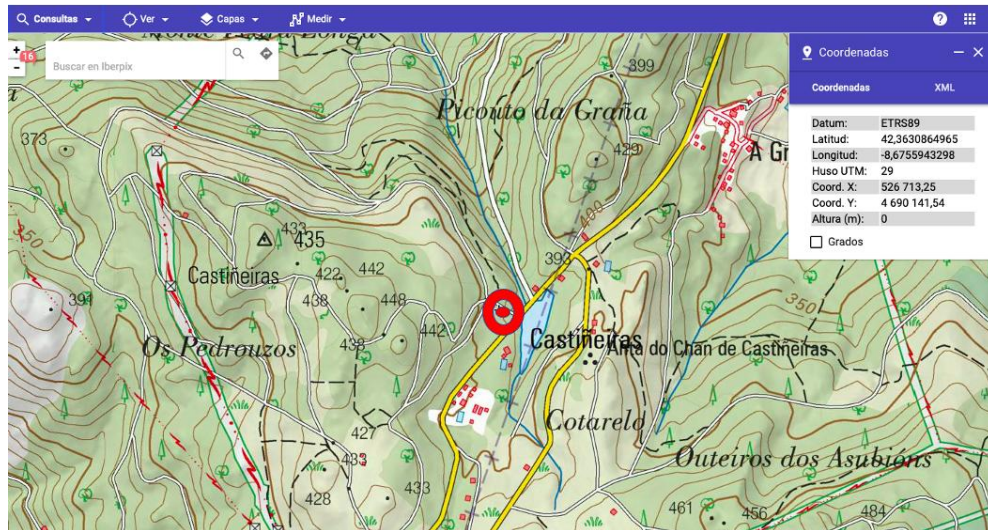


Figura 4-3 Imagen de referencia [28]



Figura 4-4 Vegetación durante itinerario realizado.

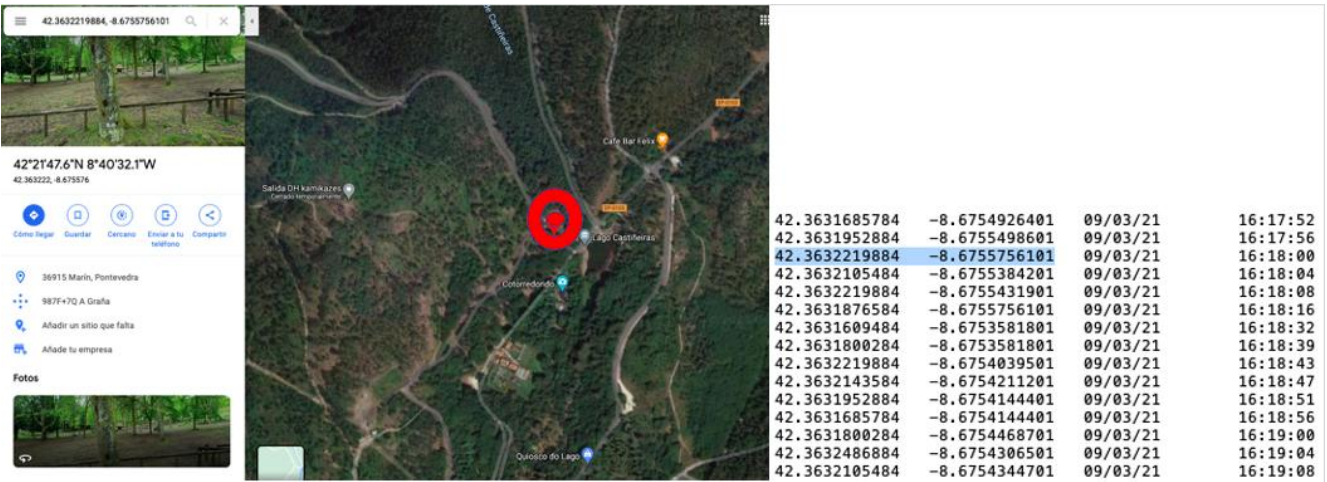


Figura 4-5 Datos obtenidos del dispositivo GPS-Tx [29]

Esta prueba consiste en la realización de un itinerario con el dispositivo GPS-Tx, el cual emite los datos obtenidos al dispositivo DRx; dichos datos son enviado cada 4 segundos. Para la comparación del recorrido realizado se utiliza un reloj *Garmin Fenix 5X*, el cual guarda el itinerario recorrido. El itinerario se realiza con una densidad de vegetación media; también cuenta con un desnivel aproximado de 30 metros provocando que haya obstáculos naturales que disminuyen el alcance máximo teórico dado por el fabricante como se puede ver en el mapa topográfico de la Figura 4-3.

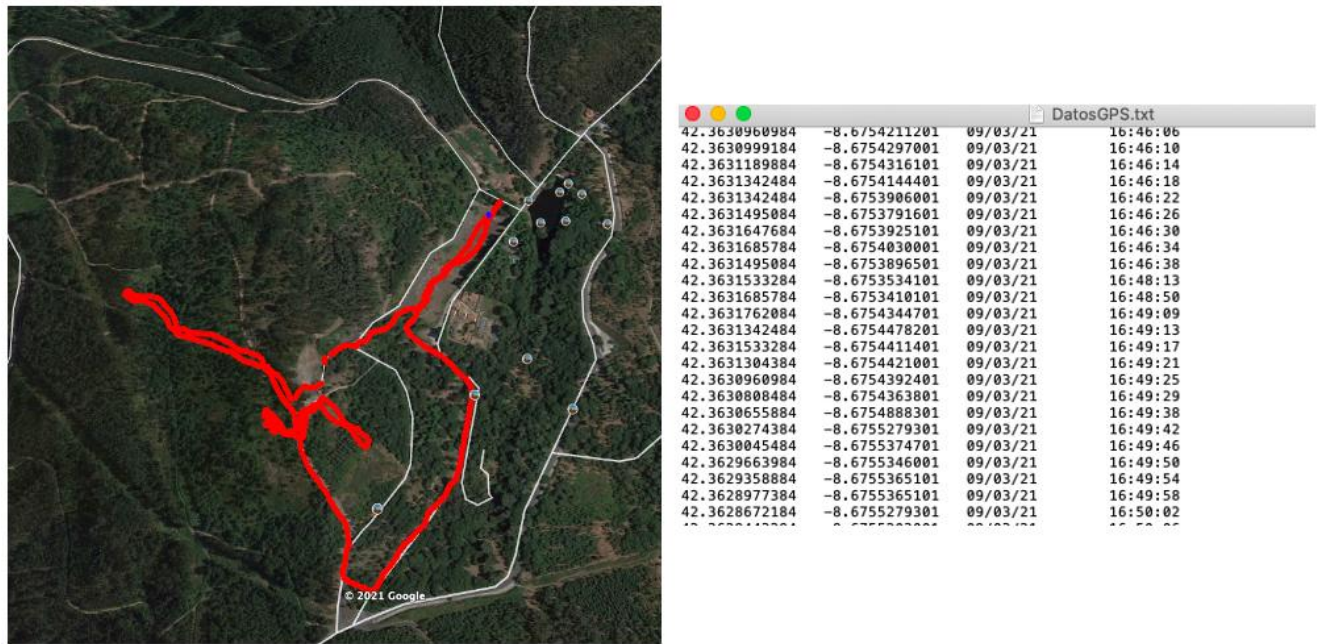


Figura 4-6 Coordenadas almacenadas en tarjeta microSD con imagen extraída de Google Earth Pro [30]

En la Figura 4-6 se puede observar una serie de coordenadas obtenidas por de la tarjeta microSD del GPS-Tx. Dichas coordenadas son las recibidas por el dispositivo DRx. En la imagen también se puede ver que hay pequeñas zonas que crean discontinuidad en el itinerario, las cuales son ocasionadas por los obstáculos naturales de la zona tanto por la diferencia de altura como por la densidad de vegetación. En esas zonas el dispositivo DRx no recibía datos.

Una de las principales ventajas de este dispositivo es que en caso de perder enlace entre los dispositivos GPS-Tx y DRx en cuyo caso este último no recibe coordenadas durante un determinado tiempo, la tarjeta micro-SD que está incorporada en el GPS-Tx almacena las coordenadas en un documento llamado *DatosGPS.txt* para posteriormente poder visualizar el itinerario completo.

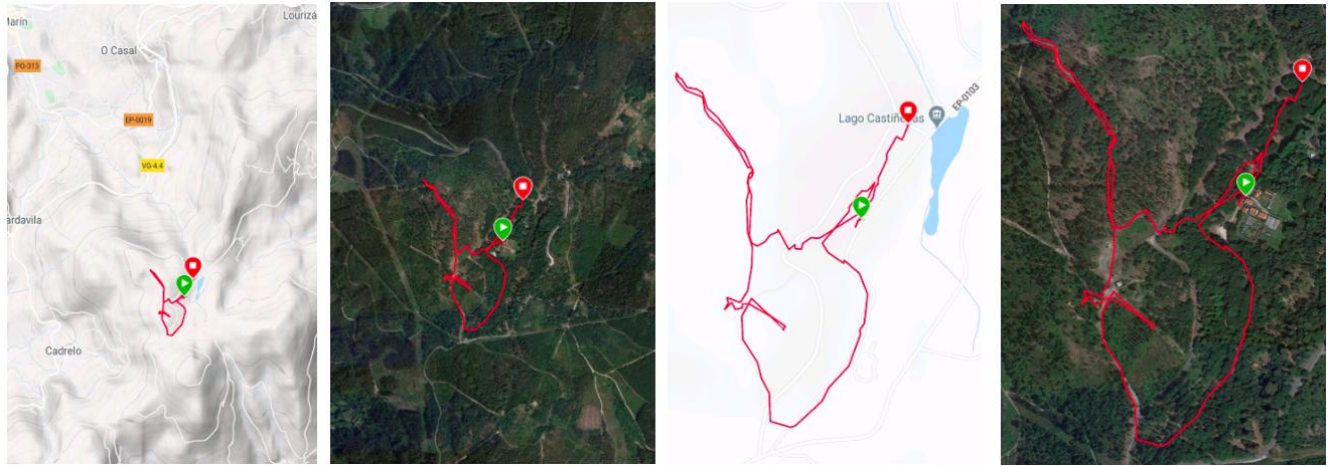


Figura 4-7 Imágenes obtenidas por aplicación de Garmin

La comparación del posicionamiento del GPS-Tx se realiza por medio de un reloj *Garmin Fénix 5X*. Su aplicación permite la visualización del itinerario realizado facilitando la comparación entre ambos dispositivos como se puede observar en la Figura 4-7. Dicha comparación se realiza de forma visual entre las Figuras 4-6 y 4-7 ya que el dispositivo de comparación da el recorrido realizado de forma gráfica mientras que el dispositivo GPS-Tx da el posicionamiento por medio de coordenadas para su posterior visualización en páginas web como *Google Earth* o *IBERPIX*. [30] [28]

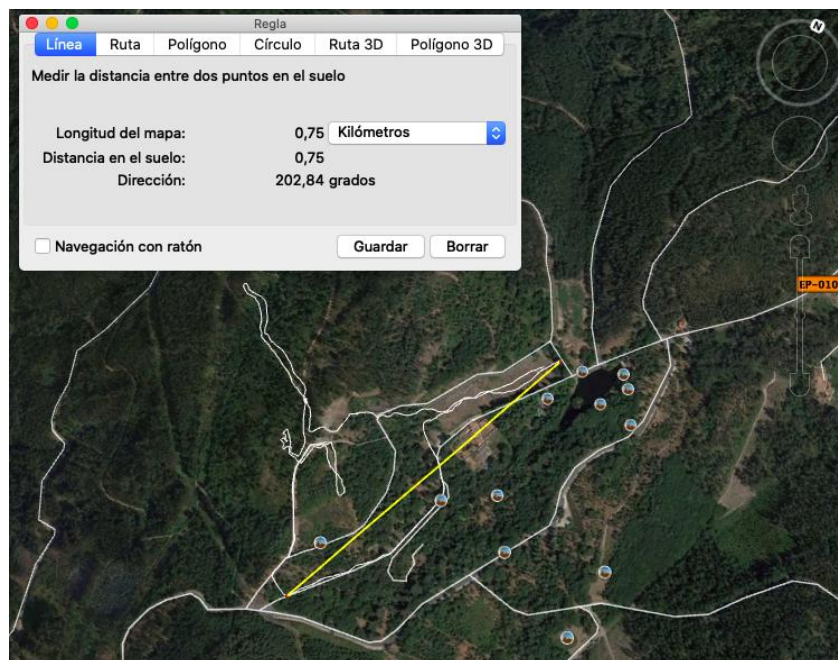


Figura 4-8 Datos de alcance de enlace. [30]

Los resultados obtenidos de esta segunda prueba son, en primer lugar, el alcance de enlace de 750 metros bajo condiciones de media densidad de vegetación y con un desnivel de aproximadamente de 30 metros entre los dispositivos GPS-Tx y DRx. En segundo lugar, según las coordenadas iniciales hay una diferencia de error en distancia de menor de 10 metros entre los datos obtenidos. La distancia del alcance de enlaces se ha obtenido desde la página web *Google Earth*. En la Figura 4-8 se representa el rango de alcance en zona rural con densidad media de vegetación. [30]

4.1.3 Prueba Escuela Naval Militar (ENM)

Esta prueba tiene como objetivos realizar el seguimiento de una embarcación e intentar encontrar el alcance máximo de enlace entre los dispositivos GPS-Tx y DRx. Dicha zona cuenta con un obstáculo natural materializado por una isla de 74 metros de altura y de 600 metros de ancho aproximadamente entre los dos dispositivos, como se puede observar en la Figura 4-10.

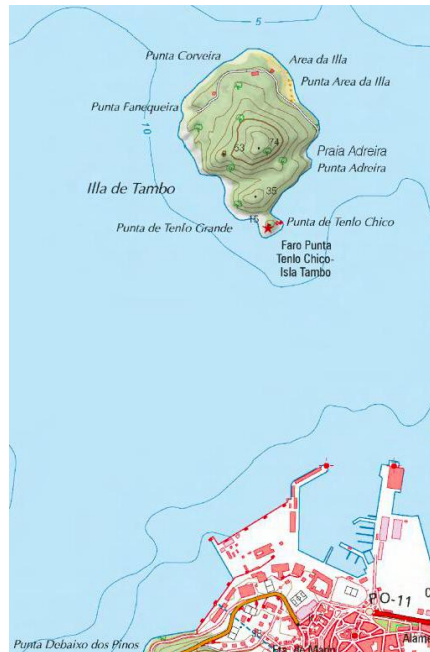


Figura 4-9 Imagen de la zona de realización de prueba en ENM [28]

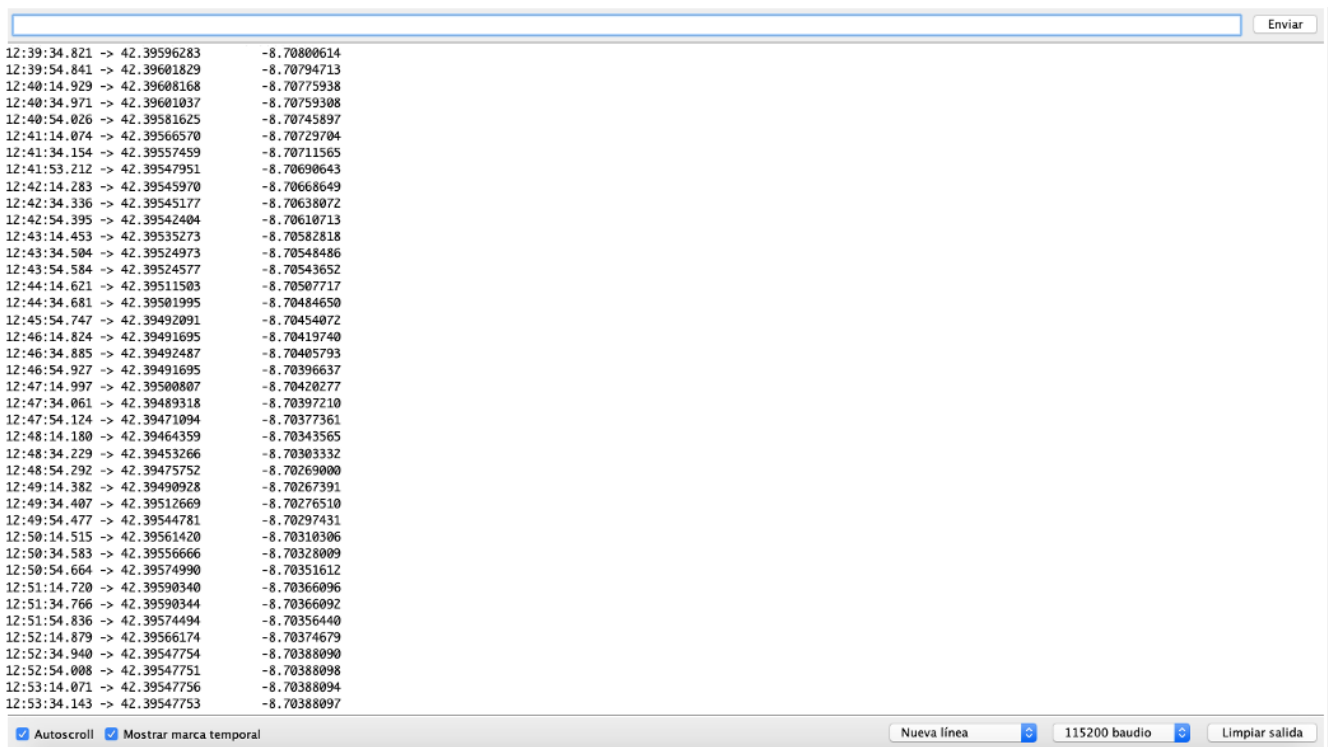
Esta prueba es realizada en la *Escuela Naval Militar (ENM)*, la cual facilita sus instalaciones y una embarcación para la realización de la misma. Las coordenadas de la posición inicial del dispositivo obtenidas por la página web IGN son 42,39594302 -8,70806247 como se muestra en la Figura 4-11.



Figura 4-10 Datos y referencia de puntos inicial y final.

Para la toma de datos del sistema GPS el dispositivo DRx se encuentra conectado a un ordenador con acceso a internet en una posición estática en la posición 42,39596283 -8,70800614 ubicada en la ENM, mientras que el dispositivo GPS-Tx, se encuentra en movimiento a bordo de una embarcación la cual realiza sus actividades rutinarias de vigilancia en las inmediaciones de la isla de Tambo. Este segundo dispositivo envía su posicionamiento al mismo ordenador al que está conectado el módulo GPS-DRx. Para la comparación de dicha prueba se utiliza un reloj *Garmin Fénix 5X* que se encuentra guardando el recorrido para su posterior extracción del itinerario realizado.

Esta prueba se realizó bajo condiciones meteorológicas adversas ya que durante el periodo de toma de datos y realización del itinerario hubo lluvia y viento como se puede apreciar en la Figura 4-11. Dichas condiciones de viento y lluvia podrían ocasionar pérdida de enlace entre los dispositivos, pero al encontrarse en una zona sin prácticamente obstáculo la transmisión de datos se realizó correctamente como se puede observar en las coordenadas recibidas y que coinciden con las coordenadas almacenadas en la tarjeta microSD. La transmisión de datos se realiza con un intervalo de tiempo de 20 segundos como se observa en la Figura 4-12, escogiendo un mayor intervalo de tiempo de transmisión con respecto a la prueba en zona rural.



12:39:34.821	-> 42.39596283	-8.70800614
12:39:54.841	-> 42.39601829	-8.70794713
12:40:14.929	-> 42.39608168	-8.70775938
12:40:34.971	-> 42.39601037	-8.70759308
12:40:54.026	-> 42.39581625	-8.70745897
12:41:14.074	-> 42.39566570	-8.70729704
12:41:34.154	-> 42.39557459	-8.70711565
12:41:53.212	-> 42.39547951	-8.70690643
12:42:14.283	-> 42.39545970	-8.70668649
12:42:34.336	-> 42.39545177	-8.70638072
12:42:54.395	-> 42.39542404	-8.70610713
12:43:14.453	-> 42.39535273	-8.70582818
12:43:34.504	-> 42.39524973	-8.70548486
12:43:54.584	-> 42.39524577	-8.70543652
12:44:14.621	-> 42.39511503	-8.70507717
12:44:34.681	-> 42.39501995	-8.70484650
12:45:54.747	-> 42.39492091	-8.70454072
12:46:14.824	-> 42.39491695	-8.70419740
12:46:34.885	-> 42.39492487	-8.70405793
12:46:54.927	-> 42.39491695	-8.70396637
12:47:14.997	-> 42.39500807	-8.70420277
12:47:34.061	-> 42.39489318	-8.70397210
12:47:54.124	-> 42.39471094	-8.70377361
12:48:14.180	-> 42.39464359	-8.70343565
12:48:34.229	-> 42.39453266	-8.70303332
12:48:54.292	-> 42.39475752	-8.70269000
12:49:14.382	-> 42.39490928	-8.70267391
12:49:34.407	-> 42.39512669	-8.70276510
12:49:54.477	-> 42.39544781	-8.70297431
12:50:14.515	-> 42.39561420	-8.70310306
12:50:34.583	-> 42.39556666	-8.70320009
12:50:54.664	-> 42.39574990	-8.70351612
12:51:14.720	-> 42.39590340	-8.70366096
12:51:34.766	-> 42.39590344	-8.70366092
12:51:54.836	-> 42.39574494	-8.70356440
12:52:14.879	-> 42.39566174	-8.70374679
12:52:34.940	-> 42.39547754	-8.70388090
12:52:54.008	-> 42.39547751	-8.70388098
12:53:14.071	-> 42.39547756	-8.70388094
12:53:34.143	-> 42.39547753	-8.70388097

Figura 4-11 Datos obtenidos por el DRx

La duración de esta prueba es de 40 minutos y una distancia recorrida de 6,8 kilómetros aproximadamente según datos obtenidos por la aplicación de Garmin como método de comprobación como se puede observar en Figura 4-13, durante la travesía se realiza una serie de fotografías para su comprobación de funcionamiento y comprobar que los datos enviados son recibidos en tiempo real en condiciones no ideales, duración de batería y demostración del sistema bajo estas condiciones atmosféricas como se puede observar en la Figura 4-13.

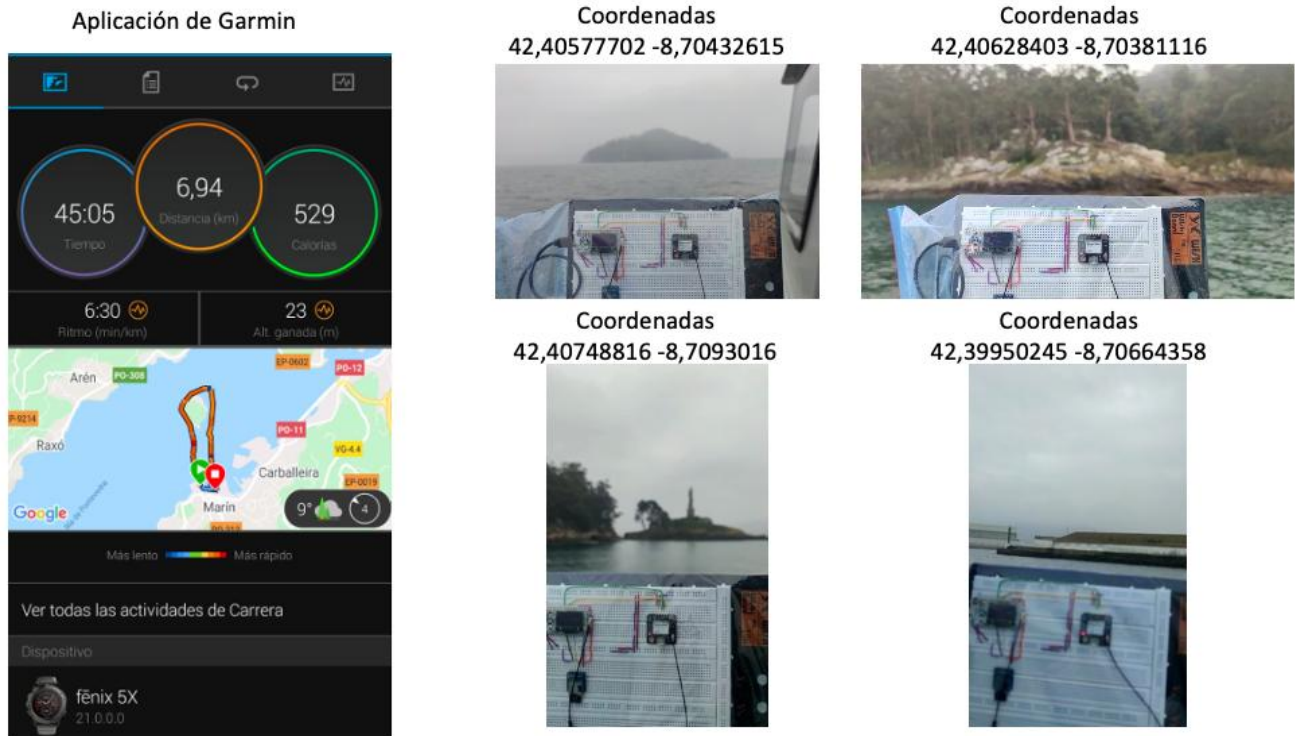


Figura 4-12 Comparación entre datos de la aplicación de Garmin y datos obtenidos por el GPS-Tx.

El punto final de está en la prueba es las coordenadas 42,39543296 -8,7039104 administradas por el dispositivo GPS-Tx, mientras que las coordenadas 42,39544088 -8,70390687 son las obtenidas por la página web IGN como se puede observar en la Figura 4-11; debido a que el dispositivo de comprobación no proporciona coordenadas estas son tomadas por referencia.

Alcance de transmisión de datos

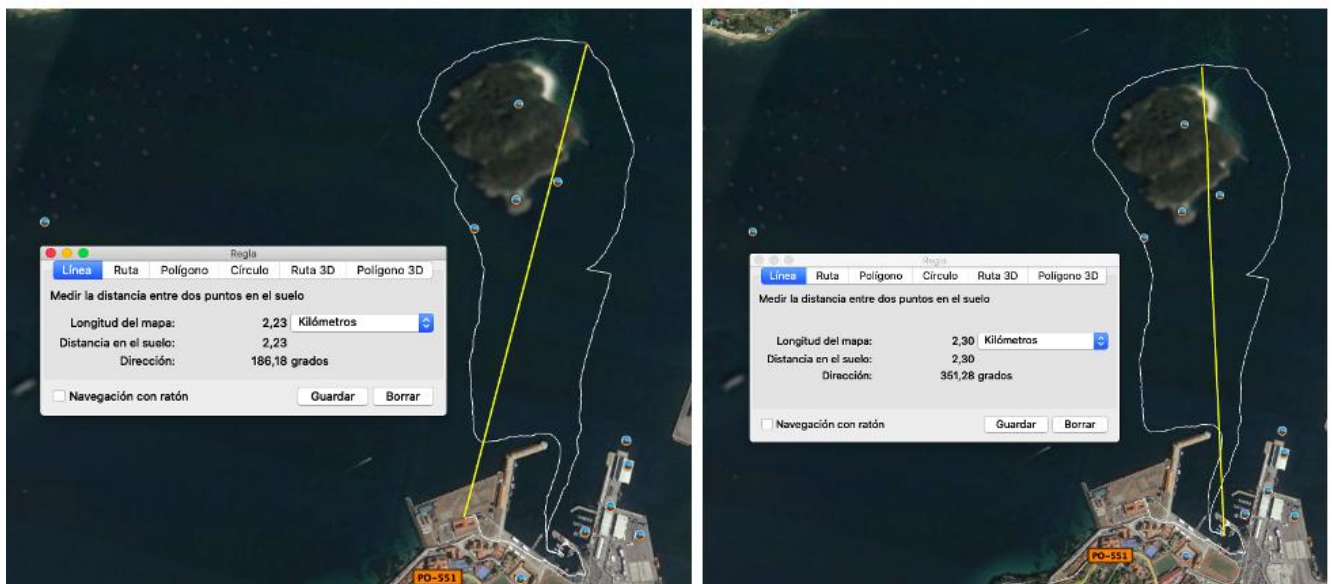


Figura 4-13 Distancia de enlace y transmisión de datos [30]

Los resultados obtenidos de esta prueba del este dispositivo son, en primer lugar, el alcance de enlace de 2,3 kilómetros bajo condiciones atmosféricas no ideales como son lluvia ligera y viento moderado. Durante prácticamente todo el itinerario realizado hubo enlace de visión directa entre los dispositivos GPS-Tx y DRx exceptuando durante el intervalo durante el cual se bordeó la isla del

itinerario. Según las coordenadas iniciales hay una diferencia de error en distancia de aproximadamente 2 metros entre los datos obtenidos debido a la falta de coordenadas del dispositivo de comprobación y error humano. La distancia del alcance de enlaces se ha obtenido desde la página web *Google Earth* como se puede observar en la Figura 4-14.[30]

4.2 Resultados y validación

La validación de aceptación de este sistema tiene varios apartados tales como el correcto posicionamiento del dispositivo GPS-Tx y su almacenamiento, emisión y recepción de datos, y visualización de las coordenadas de posición en los elementos de GPS-Tx y DRx para cumplir con los objetivos iniciales propuestos para este proyecto.

Posicionamiento del dispositivo GPS-Tx

Realizada las pruebas del sistema GPS comentadas en el apartado anterior se pueden obtener resultados numéricos y una valoración del dispositivo, de la misma forma se procede a comentar problemas, errores y mejoras tanto del sistema como en la realización de las pruebas de los dispositivos.

El primer punto a tratar es el correcto posicionamiento del GPS-Tx, el cual para ser aceptado y validado tiene que tener un margen de error de posicionamiento menor de 10 metros, tomando como referencia datos de la página web GPS América donde dice *“El margen de error de posición se debe a las condiciones de la ionosfera y atmósfera, las cuales provocan retar de tiempo en las transmisiones del satélite cuando envían su propia ubicación por lo que suele variar entre 1 a 10 metros, siendo la precisión típica de 10 a 30 metros”*. [26]

Para evaluar el cumplimiento de este requerimiento se ha utilizado un calculador online [25] de distancia entre coordenadas, el cual redondea a unidades de decenas el resultado obtenido marcando como 0.01 km si el error es menor es aproximadamente de 10 metros o marcando 0.00 km si el error es menor a 5 metros. Dicha página web ha proporcionado un error entre las coordenadas obtenidas menor a 10 metros como se puede observar en la Figura 4-14 y en la Tabla 14. [31]

Prueba urbana

Datos para el cálculo

Si no conoces las coordenadas puedes utilizar: [Buscar coordenadas](#)

Punto de partida

Latitud Longitud

Punto final

Latitud Longitud

Realizar cálculos

Resultado del cálculo

Distancia Kilómetros

Distancia Millas

Prueba rural

Datos para el cálculo

Si no conoces las coordenadas puedes utilizar: [Buscar coordenadas](#)

Punto de partida

Latitud Longitud

Punto final

Latitud Longitud

Realizar cálculos

Resultado del cálculo

Distancia Kilómetros

Distancia Millas

Prueba urbana

Calcula la distancia entre dos puntos de la Tierra

Para obtener la distancia (línea recta) entre dos puntos de la tierra, introduce las coordenadas (latitud y longitud) de cada uno en los cuadros de texto. Si no conoces las coordenadas, utiliza el botón que se encuentra al lado (Buscar coordenadas), para seleccionar el punto de partida y el punto final.

Datos para el cálculo

Si no conoces las coordenadas puedes utilizar: [Buscar coordenadas](#)

Punto de partida

Latitud Longitud

Punto final

Latitud Longitud

Realizar cálculos

Resultado del cálculo

Distancia Kilómetros

Distancia Millas

Datos para el cálculo

Si no conoces las coordenadas puedes utilizar: [Buscar coordenadas](#)

Punto de partida

Latitud Longitud

Punto final

Latitud Longitud

Realizar cálculos

Resultado del cálculo

Distancia Kilómetros

Distancia Millas

Usando el mapa

Figura 4-14 Distancia entre coordenadas obtenidas por el dispositivo y su comprobación [31]

Transmisión de datos

La transmisión de datos es otro factor a considerar ya que parte de los objetivos de este proyecto es conseguir un sistema que pueda transmitir datos a una distancia media-larga con un bajo coste de creación del dispositivo y sin pagos periódicos por servicios de soporte técnico o transmisión de datos como se ha explicado anteriormente.

Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas son favorables, ya que se han realizado en zonas diferentes obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 15. Dichos resultados son aceptados como válidos por tener enlace entre los dispositivos GPS-Tx y DRx sin retado aparente y una distancia de más de 2,3 km como es el caso de la prueba realizada en la ENM/embarcación; para dicha prueba se realizó un recorrido de 7 km aproximadamente sin interrupción de transmisión de datos.

Duración de batería

Una de las ventajas de utilizar la tecnología LoRa es su bajo consumo energético, por lo cual según datos teóricos obtenidos en la Tabla 15 (“Parámetros comparativos tecnologías LPWAN”, “Aspectos de eficiencia [25]) la duración de las baterías puede ser de más de 10 años. La realización de estas pruebas tiene una duración máxima de 73 minutos como se puede observar en la Tabla 15 siendo un tiempo muy por debajo del valor teórico, pero al no haber tenido problema durante este corto periodo de tiempo se acepta como válido. Sería necesario estudios específicos para obtener un dato aproximado experimental del consumo real de los dispositivos.

Tiempo de posicionamiento

El tiempo de posicionamiento indica cuánto tiempo tarda en dar la posición el módulo GPS tras el encendido del sistema. Para mejorar sería preciso hacer pruebas con otros módulos GPS, ya que obtuvimos tiempos mayores que los utilizados en sistemas GPS convencionales. El tiempo de posicionamiento de estos últimos suele ser inferior a un minuto, mientras que el tiempo de posicionamiento del sistema desarrollado en este proyecto varía desde los 12 a los 20 minutos de media siendo mucho mayor como se refleja en la Tabla 15. Se ha observado que el tiempo de posicionamiento se ve muy afectado por el número de satélites que es capaz de detectar el sensor en el lugar de realización de las pruebas.

Prueba	Duración	Distancia recorrida	Alcance de enlace	Diferencia de posicionamiento	Densidad de obstáculos	Tiempo de posicionamiento
Zona urbana	3 minutos	20 m	-	< 10 m	Urbana	20 minutos aproximadamente.
Zona rural	73 minutos	3.21 km	>0,75 km	< 10 m	Vegetación ligera-media	15 minutos aproximadamente.
Zona ENM	40 minutos	6,94 km	> 2.3 km	< 10 m	Alcance directo	12 minutos aproximadamente.

Tabla 14 Resultados de las pruebas realizadas.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Durante la realización de este proyecto se han presentado diversos inconvenientes tales como fallos de componentes que conforman este sistema GPS y la correcta implementación de un código que permita alcanzar los objetivos iniciales; favoreciendo la realización de un estudio más extenso de las diferentes opciones de tecnologías y módulos que lo constituyen.

Las conclusiones obtenidas a la finalización de este trabajo son múltiples, destacando la importancia de las redes de comunicación y el concepto IoT en el desarrollo de nuevas tecnologías. Estas tecnologías permiten la creación de un sistema GPS que realice una conexión y transmisión de datos de forma segura, fiable, de bajo coste de fabricación, bajo consumo y sin la necesidad de realizar pagos periódicos por el servicio de transmisión de datos o mantenimiento.

Además, con el desarrollo de este sistema GPS formado por diferentes módulos Arduino se ha alcanzado otros de los objetivos iniciales tal como la obtención y visualización de datos de posicionamiento de latitud y longitud del dispositivo GPS-Tx.

Otro objetivo alcanzado mediante la creación de este dispositivo GPS es la posibilidad de proporcionar localización y seguimiento de unidades y personal de Infantería. Este objetivo puede ser implantado para aportar mayor seguridad del personal y unidades favoreciendo el Mando y Control de las unidades en la realización de ejercicios militares.

El último objetivo alcanzado es el correcto almacenamiento de los datos de posicionamiento en una tarjeta micro SD que favorece el posterior estudio y visualización del itinerario realizado por el dispositivo. Dichos datos son almacenados en formato .txt para la creación de *waypoints* e itinerarios.

Aunque se han alcanzado los objetivos principales planteados en el primer capítulo, para obtener un sistema terminado y competitivo en el mercado que sea útil para las necesidades de sectores tanto militares como civiles es necesario continuar con el desarrollo de este sistema. Para continuarlo se proponen varias vías de investigación que se detallan en el apartado de conclusiones y futuras líneas futuras de investigación que se expone a continuación.

5.2 Líneas futuras

En este apartado se propone futuras líneas de trabajo sobre este dispositivo con el objetivo de que pueda llegar a ser utilizado tanto en el ámbito civil como militar. Estas líneas consistirán en implementaciones, mejoras y actualizaciones del sistema.

La primera línea de trabajo es el aumentar el rango de alcance de transmisión de datos, con el objetivo de permitir una mayor cobertura y obtener un dispositivo más competitivo con otros dispositivos de seguimiento existentes en el mercado. Para cumplir con esta línea de trabajo podría estudiarse diferentes antenas LoRa que permitan alcanzar este objetivo.

Relacionado con la primera línea de trabajo, propone estudiar la implementación de más dispositivos GPS-Tx, donde dichos nodos estén entrelazados, creando una red y sirviendo como antenas relé con el objetivo de aumentar el rango de alcance de transmisión de datos de posicionamiento.

Para cumplir con las expectativas iniciales y como ya se comentó anteriormente, se podría una batería de menor tamaño para que el dispositivo GPS-Tx sea más eficiente en relación al consumo de energía, menor peso y tamaño. Habría que hacer un estudio de la durabilidad de la batería e implementar mejoras para disminuir el consumo del sistema. Además, y relacionado con una alimentación mediante una batería de reducido tamaño, se podría diseñar una caja protectora pequeña, compacta y resistente.

En el desarrollo de este proyecto se ha creado un código que permite la visualización en tiempo real sin necesidad de introducir manualmente las coordenadas obtenidas por el dispositivo DRx. Dicho código se ha probado, por lo tanto, una posible línea de investigación puede ir encaminada a una comprobación de dicho código o la creación de un nuevo código que cumpla con este objetivo.

Se propone también proporcionar a los dispositivos GPS-Tx y DRx de un botón de emergencia o socorro.

Dado el tiempo de detección de satélites y obtención de las coordenadas de localización obtenidas con este dispositivo se plantea la comprobación del correcto funcionamiento del módulo GPS por posible problema con su hardware o software además de estudiar el uso de módulos y antenas de otras marcas para mejorar este aspecto del localizador.

También se debería más tiempo a la realización de pruebas de campo con mayores tiempos de transmisión de datos y mayores distancias para definir los límites de este dispositivo y sus posibles ámbitos de aplicación.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Epdata, «<https://www.epdata.es/datos/personas-desaparecidas-espana-datos-estadisticas/317.>,» [En línea].
- [2] RACE, «<https://www.race.es/robo-coches-ciudades-modelos-mas-riesgos>,» [En línea]. Available: www.race.es.
- [3] L. Vanguardia, «<https://www.lavanguardia.com/motor/actualidad/20200507/481002748492/modelo-coche-robado-espana.html>,» [En línea]. Available: www.lavanguardia.com.
- [4] Moviloc, «https://moviloc.com/sistema-gestion-de-flotas/#serv_pestanas|0,» [En línea]. Available: www.moviloc.com.
- [5] SoyMomo, «<https://www.soymomo.com/es>,» [En línea]. Available: www.soymomo.com.
- [6] P. o. d. GPS, «www.gps.gov/systems/,» [En línea]. Available: www.gps.gov.
- [7] Prometec, «<https://www.prometec.net/instalando-esp32/>,» [En línea]. Available: www.prometec.net.
- [8] M. G. ESP, «https://es.banggood.com/2Pcs-LILYGO-TTGO-LORA32-915Mhz-ESP32-LoRa-OLED-0_96-Inch-Blue-Display-bluetooth-WIFI-ESP-32-Development-Board-Module-With-Antenna-p-1239769.html?cur_warehouse=UK,» [En línea]. Available: www.es.banggood.com.
- [9] Alfaiot, «<https://alfaiot.com/blog/ultimas-noticias-2/post/el-protocolo-lorawan-6>,» [En línea]. Available: www.alfaiot.com.
- [10] LoRaWAN, «<https://lorawan.es>,» [En línea]. Available: www.lorawan.es.
- [11] C. Valencia, «<https://ticnegocios.camaravalencia.com/servicios/tendencias/caminar-con-exito-hacia-la-industria-4-0-capitulo-11-infraestructuras-i-redes-inalambricas/>,» [En línea]. Available: www.ticnegocios.camaravalencia.com.
- [12] Techlandia, «https://techlandia.com/ventajas-desventajas-del-bluetooth-lista_516646/,» [En línea].
- [13] Netlab, «<http://netlab.cs.ucla.edu/wiki/files/btv12.pdf>,» [En línea]. Available: www.netlab.cs.

- [14] Bluetooth, «<https://www.bluetooth.com/>,» [En línea]. Available: www.bluetooth.com.
- [15] WiFi, «<https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/specifications>,» [En línea]. Available: www.wi-fi.org.
- [16] C. d. Valencia, «<https://ticnegocios.camaravalencia.com/servicios/tendencias/caminar-con-exito-hacia-la-industria-4-0-capitulo-11-infraestructuras-i-redes-inalambricas/>,» [En línea]. Available: [www.ticnegocios.camaravalencia.com](https://ticnegocios.camaravalencia.com).
- [17] Monografías, «<https://www.monografias.com/trabajos13/guiadeim/guiadeim.shtml>,» [En línea]. Available: www.monografias.com.
- [18] Á. P. Aguilar, Trabajo Fin de Carrera de Ingeniería de Telecomunicaciones, Internet de las cosas aplicado al control del sistema energético de una vivienda, 2016.
- [19] Ó. F. C. Camargo, Tecnología Bluetooth: alternativa para redes celulares de voz y datos., 2009.
- [20] F. García-Carballera, Comunicación con sockets.
- [21] D. A, Sistema de sensores para seguimiento del transporte de mercancías, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2018.
- [22] P. P. Garcés, Trabajo de Fin de Mater en Ingeniería de Computadores y Redes, Redes de Área Extensa para aplicaciones de IoT: modelado de comunicaciones SigFox, 2017.
- [23] P. I. S. Satán, Trabajo de Fin de Carrera de Electrónica y Telecomunicaciones. Análisis del rendimiento del canal de acceso aleatorio en la Tecnología NarrowBand IoT (NB-IoT) para la comunicación máquina a máquina (M2M)., 2020.
- [24] S. H. Caballero, Estudio en detalle de LoRaWAN. Comparación con otras tecnologías LPWAN considerando diferentes patrones de tráfico., UOC Universitat Oberta de Catalunya, 2020.
- [25] Alai-Secure, «<https://alaisecure.es/m2m-iot/lorawan/>,» [En línea]. Available: www.alaisecure.es.
- [26] GPSAMERICA, «<http://www.gpsamerica.com.mx/cms/index.php/en/conocimiento/preguntas-frecuentes/que-compro-tecnologia/precision-y-margen-de-error>,» [En línea]. Available: www.gpsamerica.com.
- [27] Iotrees, «www.iotrees.es,» [En línea]. Available: www.iotrees.es.
- [28] IGN, «<http://www.ign.es/iberpix2/visor/>,» [En línea]. Available: www.ign.es.
- [29] G. Maps, «<https://www.google.es/maps/place/>,» [En línea]. Available: www.google.es/maps.
- [30] G. Earth, «<https://earth.google.com/web/>,» [En línea]. Available: www.earth.google.com.
- [31] Calcular-Distancias, «<https://www.tutiempo.net/calcular-distancias.html>,» [En línea]. Available: www.tutiempo.net.
- [32] D. D. C. Rodríguez, Monografía: El desarrollo y la seguridad en las aplicaciones móviles, Lima-Perú: Universidad Nacional de Educación, 2019.
- [33] G. T. Benito Condori, El internet de las cosas IoT, Lima-Perú: Universidad Nacional de Educación, 2019.
- [34] J. Salazar, Redes Inalámbricas, Praha-Republica Checa: České vysoké učené technické v

Praze, 2016.

- [35] M. J. d. I. C. Arriaga, Intensidad y forma de las bandas infrarrojos en disolución, Madrid: Universidad de Madrid , 2015.
- [36] Alex, «https://github.com/alexitoo00/NMEA_Parser,» [En línea]. Available: [www.github.com](https://github.com).
- [37] Roger, «<https://rogerbit.com/wprb/2020/12/gps-tracker-without-cellular-network-with-lora-module/>,» [En línea]. Available: [www.rogerbit.com](https://rogerbit.com).
- [38] Naylampmechatronics, «https://naylampmechatronics.com/blog/56_usando-esp8266-con-el-ide-de-arduino.html,» [En línea]. Available: [www.naylampmechatronics.com](https://naylampmechatronics.com).

ANEXO I: SIGLAS USADAS

El objetivo de este anexo es agrupamiento de todas las siglas usadas durante este proyecto junto con su significado.

ADC	Analog-to-Digital Converter
AM	Amplitud Modulada
BPSK	Binaru Phase Shift Keying
CDPD	Cellular Digital Packet Data
CS	Slave Select o Chip Select
DAC	Digital to Analog Converter
DAI	Dispositivo con acceso a internet
DBPSK	Differential Binary Phase-Shift Keying
DNS	Domain Name System
DRx	Dispositivo emisor
ENM	Escuela Naval Militar
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read Memory
FSK	Frequency Shift Keying (modulación por desplazamiento de frecuencia)
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying (modulación por desplazamiento de frecuencia gaussiana)
GPIO	General Purpose Input/output
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
GPS-Tx	Dispositivo GPS emisor de datos
GSM	Global System for Mobile
HSPA	High-Speed Packet Access
IBM	International Business Machines
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGN	Instituto Geográfico Nacional
IoT	Internet of Things
IPX	Internetwork Packet Exchange/Sequenced Packet Exchange
LMDS	Local Multipoint Distribution Service
LoRa	Long Range Radio
LTE	Long Term Evolution
LT-Advance	Long-Term Advance
LTN	Low Throughput Network
MAC	Media Access Control
M2M	Machine to Machine
MISO	Master In Slave Out
MOSI	Master Out Slave In
NB-Io	TNarrowband-IoT
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OLED	Organic Light-Emitting Diode
PCB	Printer Circuit Board
PWN	Pulse.Width modulation
QPSK	Quadratura Phase Shift Keying (Modulación por desplazamiento de fas
RACA	Real Automóviles Club de España
RFID	Frecuencia de Radio
ROM	Read Only Memory
RTC	Real Time Clock
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access

SCK Serial Clock
SPI Serial Peripheral Interface
TTL Time To Line (Tiempo de almacenar un registro DNS)
UART Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (Transmisor-Receptor Asíncrono Universal)
UNB Ultra Narrow Band
USB Bus Universal en serie
WIMAX Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN Redes Wireless Local Area Network
WMAN Redes Wireless Metropolitan Area Network
WPAN Redes Wireless Personal Area Network
WWAN Redes Wireless Wide Area Network
3GPP Third Generation Partnership

ANEXO II: CÓDIGO USADO

1. Código usado en el dispositivo GPS-Tx. [37] [38]

```

#include <Wire.h>
#include <SD.h>
#include "heltec.h"
#include <SoftwareSerial.h>
#define BAND      868E6 // 433GHz=433E6 o 915GHz=915E6
#include "NMEA_Parser.h" // Librería GPS

//-----
// Pines
//-----
// GPS
int pinGPS_TX = 32;
int pinGPS_RX = 33;
// SD
int pinSD_MISO = 19;
int pinSD_MOSI = 27;
int pinSD_SCK = 5;
int pinSD_CS = 17;
//LoRa no requiere conexionado, ya que se encuentra integrado en el Arduino

//-----
// Librerías y definiciones
//-----
SoftwareSerial ss(32, 33);
NMEA_Parser<SoftwareSerial> gps(ss);
File archivo;
String datos;
bool errorSetup = false;

//-----
// Variables
//-----
float flat = 0, flon = 0; // Latitud y longitud
String nombreArchivoLog = "DatosGPS.txt"; // Nombre del archivo en la SD para
guardar los datos
int tiempoEspera = 2; // Tiempo de espera entre envíos de
medidas por radio en segundos ;IMPORTANTE!

//-----
// Funciones
//-----
void GuardarSD(float latitud, float longitud, String fecha, String hora);
void printFecha(String fecha, String hora);
bool GPS_check();
void EnviarLoRa(String datos);
void DatosPantallaOLED(float flat, float flon, String fecha, String hora);
//-----

void setup()
{
  errorSetup = false;
  // Serial
  Serial.begin(115200);
  delay(2000);

```

```

// Pantalla + radio
pinMode(pinSD_CS, OUTPUT);
digitalWrite(pinSD_CS, HIGH);
delay(100);
Heltec.begin(true /*DisplayEnable Enable*/, true /*Heltec.LoRa Disable*/,
true /*Serial Enable*/, true /*PABOOST Enable*/, BAND /*long BAND*/);
Heltec.display->flipScreenVertically();
Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_10);
Heltec.display->clear();

Heltec.display->drawString(0, 0, "[x] Puerto serie abierto");

// LoRa
Heltec.display->drawString(0, 10, "[x] Radio encendida");

// SD
digitalWrite(pinSD_CS, LOW);
if (!SD.begin(pinSD_CS))
{
    Serial.println(F("Error al iniciar SD"));
    Heltec.display->drawString(0, 30, "[ ] Error al iniciar SD");
    errorSetup = true;
}
else {
    Serial.println("SD iniciado correctamente");
    Heltec.display->drawString(0, 30, "[x] SD iniciado correctamente");
    if (!SD.exists("/") + nombreArchivoLog) {
        archivo = SD.open("/") + nombreArchivoLog, FILE_WRITE);
        delay(500);
        archivo.close();
    }
}

// GPS
Serial.print("Esperando a recibir señal GPS...");
gps.begin(9600);
for (unsigned long watchdog = millis(); millis() - watchdog < 5000;) {
    if (!gps.serialRead()) {
        Serial.print('.');
        delay(500);
        errorSetup = true;
        continue;
    }
    errorSetup = false;
    break;
}
if (!errorSetup) {
    Serial.println("\n☐ Señal GPS encontrada!");
    Heltec.display->drawString(0, 20, "[x] Señal GPS encontrada!");
}
else {
    Heltec.display->drawString(0, 20, "[ ] Error encontrando GPS");
}

Heltec.display->display();

if (errorSetup) {
    Serial.println("Error!\n");
    Heltec.display->drawStringMaxWidth(0,

```

```

    Heltec.display->display();
    Heltec.display->drawString(0, 54, "ERROR DETECTADO !");
    Heltec.display->display();
    delay(3000);
    //setup(); // Si hay un error reinicia el programa
}
delay(1000);

}

void loop()
{
    // Funcionamiento principal en bucle del programa

    if (!GPS_check()) { // Si no encuentra
señal GPS vuelve a buscar
        DatosPantallaOLED("*Error encontrando señal GPS*", gps.hora, gps.fecha);
        return;
    }
    else {
        printFecha(gps.fecha, gps.hora); // Muestra la fecha por
puerto serie
        GuardarSD(flat, flon, gps.fecha, gps.hora); // Guarda los datos en
la SD
        DatosPantallaOLED(flat, flon, gps.fecha, gps.hora); // Muestra los datos en
la pantalla OLED
        EnviarLoRa(datos); // Envía los datos por
radio

        Heltec.display->display(); // Actualiza la
información en la pantalla OLED
    }
    delay(tiempoEspera * 1000); // Espera un tiempo
antes de volver a medir
    Heltec.display->clear(); // Borra lo que hubiere
en la pantalla OLED
    Serial.println(); // Salta a la siguiente
línea del puerto serie
}

//-----
// Funciones
//-----

void GuardarSD(float latitud, float longitud, String fecha, String hora) {
    // Guarda los datos de latitud, longitud,
    // fecha y hora en la tarjeta SD

    digitalWrite(pinSD_CS, LOW); // Activa el SD en modo escritura
    archivo = SD.open((String) ("/" + nombreArchivoLog), FILE_APPEND); // Abre el
archivo a escribir
    datos = String(latitud, 8) + '\t' + String(longitud, 8) + '\t' + fecha + '\t'
+ hora;
    if (archivo)
    {
        archivo.println(datos); // Guarda los datos en el archivo de la SD
        delay(100);
        archivo.close(); // Cierra el archivo
        delay(500); // Espera un tiempo para asegurar la correcta escritura de los
datos
    }
}

```

```

        digitalWrite(pinSD_CS, HIGH); // Desactiva el SD en modo escritura
        return;
    }
    digitalWrite(pinSD_CS, HIGH); // Desactiva el SD en modo escritura
    Serial.println("Error al abrir el archivo de SD: " + nombreArchivoLog);
}

void printFecha(String fecha, String hora) {
    // Escribe por puerto serie la fecha y hora del reloj

    Serial.println(hora + '\t' + fecha + "\t<- GPS");
}

bool GPS_check() {
    // Comprueba si hay datos del GPS y si los hay, los
    // guarda en las variables de latitud y longitud

    if (!gps.serialRead()) return false;

    Serial.println(gps.lat, 8);
    Serial.println(gps.lon, 8);
    flat = gps.lat;
    flon = gps.lon;
    return true;
}

void EnviarLoRa(String datos) {
    // Función para enviar paquetes por radio

    Serial.println("Enviando por LoRa");
    LoRa.beginPacket();
    LoRa.setTxPower(14, RF_PACONFIG_PASELECT_PABOOST);
    LoRa.print(flat, 8);
    LoRa.print(',');
    LoRa.print(flon, 8);
    LoRa.endPacket();
    Serial.println("Enviado paquete ^^" + datos + "^^ por radio");
}

void DatosPantallaOLED(float flat, float flon, String fecha, String hora) {
    // Función para visualizar los datos en la pantalla
    // OLED integrada en el Arduino

    Heltec.display->clear();

    Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_RIGHT);
    Heltec.display->drawString(128, 0, hora);
    Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
    Heltec.display->drawString(0, 0, fecha);

    Heltec.display->drawString(0, 25, "Latitud: " + String(flat, 8));
    Heltec.display->drawString(0, 40, "Longitud: " + String(flon, 8));
    Heltec.display->display();
}

void DatosPantallaOLED(String msgError, String fecha, String hora) {
    // Función para visualizar los datos en la pantalla
    // OLED integrada en el Arduino

    Heltec.display->clear();

    Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_CENTER);
    Heltec.display->drawStringMaxWidth(64, 25, 128, msgError);
}

```

```
Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_RIGHT);  
Heltec.display->drawString(128, 0, hora);  
Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);  
Heltec.display->drawString(0, 0, fecha);  
Heltec.display->display();  
}
```

2.Librería para convertir los datos del GPS en datos de Latitud y Longitud. [36]

```
// Clase para convertir los datos del GPS en latitud y longitud
template<class T> class NMEA_Parser {
public:
    NMEA_Parser(T& stream) : stream(stream) {}
    void begin(unsigned long baud) {
        stream.begin(baud);
    }
    float lat;
    float lon;
    String hora;
    String fecha;
    float offsetCoord[2] = {0.15689683, -0.27937788};

    bool fix = false;
    bool datos;

    void parseHour(String hour) {
        hora = String((String(hour[0]) + String(hour[1])).toInt() + GMT) + ":" +
String(hour[2]) + String(hour[3]) + ":" + String(hour[4]) + String(hour[5]);
    }
    void parseDate(String date) {
        fecha = String(date[0]) + String(date[1]) + "/" + String(date[2]) +
String(date[3]) + "/" + String(date[4]) + String(date[5]);
    }
    bool Parse(String msg)
    {
        int index = 0;
        String vectorStr[40];
        memset(vectorStr, 0, sizeof(vectorStr));
        for (int i = msg.indexOf("GPRMC"); i < msg.length(); i++)
        {
            if (index > 9) break;
            if (msg[i] == '\n')
                continue;
            if (msg[i] == ',')
            {
                index++;
                continue;
            }
            vectorStr[index] +=msg[i];
        }
        if (!(vectorStr[0] == "GPRMC"))return false;

        if (vectorStr[1].length() == 9)parseHour(vectorStr[1]);
        if (vectorStr[9].length() == 6)parseDate(vectorStr[9]);

        datos = true;

        // Check for GPS signal
        if (vectorStr[2] == "V") {
            Serial.println("Dispositivo sin señal");
            fix = false;
            return false;
        }
        fix = true;
        lat = vectorStr[3].toFloat() * (vectorStr[4] == "N" ? 1 : -1) * 0.01f +
offsetCoord[0];
```

```
lon = vectorStr[5].toFloat() * (vectorStr[6] == "E" ? 1 : -1) * 0.01f +
offsetCoord[1];
return true;
}
bool serialRead()
{
    for (unsigned long temp = millis(); millis() - temp < 3000;) {
        while (stream.available()) {
            String msg = stream.readStringUntil('\n');
            return Parse(msg);
        }
    }
    if (!stream.available())
    {
        Serial.println("Error recibiendo datos de GPS");
        delay(1000);
        return false;
    }
    datos = false;
}
private:
    T& stream;
    int GMT = 1; // +1 para España en invierno
};
```

3.Código de DRx. [37][38]

```
#include "heltec.h"
#define BAND      868E6    // Frecuencia de radio Ej.: 868E6,915E6

//-----
// Librerías y definiciones
//-----
String rssi = "RSSI --";
String packSize = "--";
String packet ;
float flat, flon;

int tiempoEspera = 2; // Tiempo de espera entre lecturas de radio en segundos>

//-----
// Funciones
//-----
void LeerPaquete();
void ParsePacket();
void MostrarDatosOLED();
//-----

void setup() {
    Serial.begin(115200);

    // LoRa
    Heltec.begin(true /*DisplayEnable Enable*/, true /*Heltec.Heltec.Heltec.LoRa
Disable*/, true /*Serial Enable*/, true /*PABOOST Enable*/, BAND /*long BAND*/);
    Heltec.display->flipScreenVertically();
    Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_10);
    delay(1500);
    Heltec.display->clear();

    Heltec.display->drawString(0, 0, "Heltec.LoRa Initial success!");
    Heltec.display->drawString(0, 10, "Esperando datos entrantes...");
    Heltec.display->display();
    delay(1000);
}

void loop() {
    // Comportamiento principal del programa

    int packetSize = LoRa.parsePacket(); // Calcula el tamaño del paquete
entrante
    if (packetSize) {
        LeerPaquete(packetSize);           // Si existe un paquete lee los datos
        ParsePacket(packet);              // Traduce el mensaje en sus elementos
        Heltec.display->clear();
    }
    MostrarDatosOLED();                    // Muestra los datos en la pantalla
integrada
    delay(10);
    Serial.println(String(flat, 8) + "\t" + String(flou, 8));
    delay(tiempoEspera * 1000);
}

//-----
// Funciones
//-----
```

```
void LeerPaquete(int packetSize) {
    // Función que calcula el tamaño del mensaje entrante y
    // la intensidad de la comunicación

    packet = "";
    packetSize = String(packetSize, DEC);
    for (int i = 0; i < packetSize; i++) {
        packet += (char) LoRa.read();
    }
    rssi = "RSSI " + String(LoRa.packetRssi(), DEC) ;
}

void ParsePacket(String datos) {
    // Función para dividir el mensaje entrante en
    // sus elementos individuales (latitud y longitud)

    String variable[2];
    for (int i = 0; i < 2 ; i++)
    {
        int index = datos.indexOf(',');
        variable[i] = datos.substring(0, index);
        datos = datos.substring(index + 1);
    }
    flat = variable[0].toFloat();
    flon = variable[1].toFloat();
}

void MostrarDatosOLED() {
    // Función para mostrar los datos de las coordenadas
    // en la pantalla integrada

    Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_RIGHT);
    Heltec.display->drawString(128, 0, ("Conectado a: " + (String)ssid));
    Heltec.display->drawString(128, 10, Ip2String(WiFi.localIP()));
    Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
    Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_16);
    Heltec.display->drawString(0 , 32, ("LAT= " + String(flat, 6)));
    Heltec.display->drawString(0 , 48, ("LON= " + String(flon, 6)));
    Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_10);
    Heltec.display->drawString(0, 10, rssi);
    Heltec.display->display();
}
```

4.Código para conectarse a internet (propuesto para la futura línea de trabajo).

```
// Nombre de la conexión WiFi
const char* ssid = "-----";
// Contraseña de la conexión WiFi
const char* password = "-----";
```

5.Código para visualizar las coordenadas en el ordenador por medio de un mapa(propuesto para la futura línea de trabajo).

```
const char MAIN_page[] PROGMEM = R"====(
<!DOCTYPE HTML>
<html><head>
  <script>

    function initMap(){
      let latitud=document.getElementById("Lat").innerHTML;
      let longitud=document.getElementById("Lon").innerHTML;

      // Actualiza el mapa con la latitud y longitud recibida por LoRa

      document.getElementById("map").src="https://api.maptiler.com/maps/streets
/?key=ptRri5SRXyugsx5Bdomf#14.0/"+latitud+"/"+longitud
    }

    // Actualiza los datos cada cierto tiempo
    setInterval(function() {
      getLat();
    }, 2000); // Se actualiza cada 2 segundos
    setInterval(function() {
      getLon();
    }, 2500); // Se actualiza cada 2.5 segundos
    setInterval(function() {
      initMap();
    }, 10000); // Se actualiza cada 10 segundos

    function getLat() { // Función para actualizar la Latitud
      var xhttp = new XMLHttpRequest();
      xhttp.onreadystatechange = function() {
        if (this.readyState == 4 && this.status == 200) {
          document.getElementById("Lat").innerHTML =
            this.responseText;
        }
      };
      xhttp.open("GET", "Lat", true);
```

```
        xhttp.send();
    }
    function getLon() { // Función para actualizar la Longitud
        var xhttp = new XMLHttpRequest();
        xhttp.onreadystatechange = function() {
            if (this.readyState == 4 && this.status == 200) {
                document.getElementById("Lon").innerHTML =
                    this.responseText;
            }
        };
        xhttp.open("GET", "Lon", true);
        xhttp.send();
    }
</script></head><body>
<div>
    <h1 id="Lat">0</h1>
    <h1 id="Lon">0</h1>
</div>
<!--Muestra el mapa de tamaño 600x600 px con las coordenadas recibidas-->
<iframe style="position: relative; overflow: hidden; width: 100%; height:
600px;" id="map"
src="https://api.maptiler.com/maps/streets/?key=ptRri5SRXyugsx5Bdomf#14.0/0/0"></i
frame>
</body></html>
)=====";
```

6.Código completo para el DRx (propuesto para la futura línea de trabajo).

```
#include "heltec.h"
#include <WiFi.h>
#include <WiFiClient.h>
#include <WebServer.h>
#include "index.h"      // Archivo que contiene el código de la página web
#include "Secret.h"      // Archivo que contiene el nombre de conexión y la
                          // contraseña de la conexión WiFi
#define BAND      868E6    // Frecuencia de radio Ej.: 868E6,915E6

//-----
// Librerías y definiciones
//-----
WebServer server(80);
String rssi = "RSSI --";
String packSize = "--";
String packet ;
float flat, flon;

int tiempoEspera = 2; // Tiempo de espera entre lecturas de radio en segundos>

//-----
// Funciones
//-----
void handleRoot();
void handleLat();
void handleLon();
void MostrarDatosOLED();
void ParsePacket();
void LeerPaquete();
String Ip2String(const IPAddress& ipAddress);
//-----

void setup() {
    Serial.begin(115200);

    // LoRa
    Heltec.begin(true /*DisplayEnable Enable*/, true /*Heltec.Heltec.Heltec.LoRa
Disable*/, true /*Serial Enable*/, true /*PABOOST Enable*/, BAND /*long BAND*/);
    Heltec.display->flipScreenVertically();
    Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_10);
    delay(1500);
    Heltec.display->clear();

    Heltec.display->drawString(0, 0, "Heltec.LoRa Initial success!");
    Heltec.display->drawString(0, 10, "Esperando datos entrantes...");
    Heltec.display->display();
    delay(1000);

    LoRa.receive(); // Empieza a buscar datos de radio

    // WiFi (ESP32)
    WiFi.mode(WIFI_STA); // Se conecta el ESP a la WiFi con los credenciales
    WiFi.begin(ssid, password);

    Serial.println("Conectándose a ");
    Serial.print(ssid);
    unsigned long esperaWiFi = millis();
    while (WiFi.waitForConnectResult() != WL_CONNECTED) { // Espera hasta que se
conecte a la WiFi
        Serial.print(".");
    }
}
```

```

        if (millis() - esperaWiFi > 30000) break;           // Si tarda más de 30
segundos sin WiFi continúa el programa
    }

    Heltec.display->clear();
    Serial.println("");
    Serial.print("Connected to ");
    Serial.println(ssid);
    Serial.print("IP address: ");
    Serial.println(WiFi.localIP()); //Dirección IP proporcionada
    //-----

    server.on("/", handleRoot); // Página del mapa
    server.on("/Lat", handleLat); // Obtener el valor de la latitud
    server.on("/Lon", handleLon); // Obtener el valor de la longitud

    server.begin(); // Arrancar el servidor
    Serial.println("HTTP server started");
}

void loop() {
    // Comportamiento principal del programa

    server.handleClient(); // Maneja el flujo de clientes del
servidor

    int packetSize = LoRa.parsePacket(); // Calcula el tamaño del paquete
entrante
    if (packetSize) {
        LeerPaquete(packetSize); // Si existe un paquete lee los datos
        ParsePacket(packet); // Traduce el mensaje en sus elementos
        Heltec.display->clear();
    }
    MostrarDatosOLED(); // Muestra los datos en la pantalla
integrada
    delay(10);
    Serial.println(String(flat, 8) + "\t" + String(flon, 8));
    delay(tiempoEspera * 1000);
}

//-----
// Funciones de WiFi
//-----

void handleRoot() {
    String s = MAIN_page; // Leer código HTML
    server.send(200, "text/html", s); // Enviar página web al cliente
}

void handleLat() {
    String Lat = String(flat, 6);
    server.send(200, "text/plain", Lat); // Envía el dato de latitud a la página
web
}

void handleLon() {
    String Lon = String(flon, 6);
    server.send(200, "text/plain", Lon); // Envía el dato de longitud a la página
web
}

//-----
// Funciones de LoRa

```

```
//-----

void MostrarDatosOLED() {
    // Función para mostrar los datos de las coordenadas
    // en la pantalla integrada

    Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_RIGHT);
    Heltec.display->drawString(128, 0, ("Conectado a: " + (String)ssid));
    Heltec.display->drawString(128, 10, Ip2String(WiFi.localIP()));
    Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
    Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_16);
    Heltec.display->drawString(0, 32, ("LAT= " + String(flat, 6)));
    Heltec.display->drawString(0, 48, ("LON= " + String(flon, 6)));
    Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_10);
    Heltec.display->drawString(0, 10, rssi);
    Heltec.display->display();
}

void LeerPaquete(int packetSize) {
    // Función que calcula el tamaño del mensaje entrante y
    // la intensidad de la comunicación

    packet = "";
    packetSize = String(packetSize, DEC);
    for (int i = 0; i < packetSize; i++) {
        packet += (char) LoRa.read();
    }
    rssi = "RSSI " + String(LoRa.packetRssi(), DEC) ;
}

void ParsePacket(String datos) {
    // Función para dividir el mensaje entrante en
    // sus elementos individuales (latitud y longitud)

    String variable[2];
    for (int i = 0; i < 2 ; i++)
    {
        int index = datos.indexOf(',');
        variable[i] = datos.substring(0, index);
        datos = datos.substring(index + 1);
    }
    flat = variable[0].toFloat();
    flon = variable[1].toFloat();
}

String Ip2String(const IPAddress& ipAddress) {
    // Función que convierte la dirección IP en una cadena de texto

    return String(ipAddress[0]) + String(".") +
           String(ipAddress[1]) + String(".") +
           String(ipAddress[2]) + String(".") +
           String(ipAddress[3]);
}
```

