

Implementación de sistema de comunicaciones IoT basado en el diseño y desarrollo de dispositivos inalámbricos conectados a la nube para el seguimiento y la gestión eficiente de partidos de golf

Máster en Ingeniería de Telecomunicación

upna

Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

Trabajo fin de Máster

Iruña – Pamplona

Septiembre 2023

Autor: Francisco Javier Guembe Lara

Tutor: Erik Aguirre Gallego

Resumen

En este trabajo se desarrolla un sistema para el seguimiento y la gestión eficiente de partidos de golf, con el objetivo de solucionar la problemática del juego lento. Para ello se diseñan y se prueban dos redes IoT (Zigbee y LoRaWAN) con el fin de compararlas y así, evaluar su idoneidad en el ámbito de actuación establecido. Posteriormente, se realiza el desarrollo completo del sistema diseñando y fabricando prototipos de dispositivos finales que portarán los jugadores. También se desarrolla un servidor que se despliega en la nube y se encarga de procesar la información recibida de la red de dispositivos. Este servidor proporciona un portal web que muestra en un mapa, y en tiempo real, la ubicación de los jugadores y una tabla de tiempos.

Palabras clave: GOLF, LORA, LORAWAN, ZIGBEE, GNSS, WPT

Abstract

In this work, a system is developed for the monitoring and efficient management of golf matches, with the aim of solving the problem of slow play. For this, two IoT networks (Zigbee and LoRaWAN) are designed and tested in order to compare them and select one of them. Subsequently, the complete development of the system is carried out by designing and manufacturing prototypes of final devices that the players will carry. A server is also developed that is deployed in the cloud and is responsible for receiving and processing the information received from the network of devices. This server provides a web portal that shows on map the location of the players and a timetable.

Key words: GOLF, LORA, LORAWAN, ZIGBEE, GNSS, WPT

Laburpena

Lan honetan golf partiduen jarraipen egokirako eta haien kudeaketa efizienterako sistema bat garatzen da, golfean existitzen den joko geldoaren arazoa konpontzeko helburuarekin. Horretarako, bi IoT sare (Zigbee eta LoRaWAN) diseinatu eta probatzen dira, sareak alderatu egiten dira eta ezarritako jardun eremurako egokiena aukeratzen da. Ondoren, sistemaren garapen osoa azalduta dago, jokalariek erabiliko dituzten gailuen diseinua eta fabrikazioa. Horrez gain, hodeian zabaltzen den zerbitzari bat garatzen da, gailuen saretik jasotako informazioa prozesatzen duena. Zerbitzari honek web atari bat eskaintzen du mapa batean, jokalarien kokapena eta denbora-taula bat zuzenean erakusten dituelarik.

Hitz gakoak: GOLF, LORA, LORAWAN, ZIGBEE, GNSS, WPT

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	6
2. OBJETIVO.....	9
3. CONTEXTO TECNOLÓGICO Y ESTADO DEL ARTE	10
3.1. Golf: soluciones tecnológicas existentes	10
3.2. Sistema global de navegación por satélite.....	11
3.3. Sistema de comunicación inalámbrica basada en redes IoT	15
3.3.1. IEEE802.15.4.....	17
3.3.2. Zigbee.....	18
3.3.3. LoRa	19
3.3.4. LoRaWAN.....	22
3.4. Transmisión inalámbrica de potencia	27
3.5. Diseño de dispositivos electrónicos	30
3.6. SERVIDOR WEB EN LA NUBE Y ESTRUCTURA MEAN.....	33
4. DISEÑO Y DESARROLLO DEL SISTEMA	35
4.1. User-ED	35
4.1.1. Modelos integrados.....	35
- Microcontrolador (MCU)	35
- GNSS.....	36
- Comunicaciones (LoRa o Zigbee)	37
- Placa de alimentación con batería.....	38
4.1.2. Fabricación prototipo	39
- Encendido/apagado de dispositivo	40
- Microcontrolador (MCU)	41
- GNSS.....	41
- Comunicación con <i>gateway</i> (LoRaWAN).....	42
- <i>Display</i>	43
- Alimentación y carga inalámbrica	44
- Ensamblado final del prototipo	46
4.1.3. Funcionamiento User-ED.....	50
4.2. INFRAESTRUCTURA RED.....	53
4.2.1. Infraestructura desplegada para la red Zigbee (2.4GHz).....	53
4.2.2. Infraestructura desplegada para la red LoRaWAN (868 MHz).....	57
4.3. SERVIDOR WEB	60

4.3.1. Servicio de red IoT	60
4.3.2. Servicio WEB	61
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	64
5.1. Prueba con dispositivos integrados	65
5.1.1. Prueba de la red de dispositivos Zigbee (2.4 GHz)	66
5.1.2. Prueba de la red de dispositivos LoRaWAN (868 MHz)	67
5.1.3. Comparación de las redes desplegadas	68
5.2. Prueba con prototipos fabricados	68
6. CONCLUSIONES	74
7. LÍNEAS FUTURAS	75
8. REFERENCIAS	76
9. ÍNDICE DE FIGURAS	81
10. ÍNDICE DE TABLAS	83
11. ACRÓNIMOS	84

1. INTRODUCCIÓN

El presente documento expone el trabajo de fin de máster llevado a cabo por el autor en la empresa Tafco Metawireless, S.L. Como se indica en el título de este documento, este trabajo trata de conseguir una mayor eficiencia en el desarrollo del juego, resolviendo una problemática habitual en el golf denominada juego lento. Este trabajo se encuadra en el contexto de un proyecto de investigación y desarrollo denominado T-GOLF, el cual ha sido cofinanciado al 50% por el gobierno de Navarra y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional a través del Programa Operativo FEDER 2014-2020 de Navarra. Además, a partir de este proyecto se publica el artículo “*Design, Assessment and Deployment of an Efficient Golf Game Dynamics Management System Based on Flexible Wireless Technologies*” [1].

El golf es un deporte que goza de una notable popularidad tanto a nivel local como a nivel mundial, existiendo **436 campos** de golf en el estado español [2] y cerca de 32.500 en todo el mundo [3]. Según el recuento oficial a fecha del 31 de diciembre de 2022, el golf español concluyó el año con 293.560 miembros, un aumento de 8.606 licencias durante el último año, lo que representa un aumento del 3,0% respecto al año anterior. Esto marca el cuarto año consecutivo de crecimiento en el deporte, a pesar de la crisis económica y la pandemia de COVID-19 [4]. Otro estudio ilustrativo del aumento de este deporte es el realizado por la AEGG en 2022, donde se recoge que el 74,6% de los campos de golf españoles afirmó haber obtenido un resultado equilibrado o positivo durante el año, lo que representa un importante avance en comparación con el estudio de 2019, donde el 57,4% de los campos afirmaba que no eran rentables [5]. De la misma manera, se puede considerar un sector de peso específico teniendo en cuenta que España es el **primer país del mundo en la recepción de turismo de golf**, con el impacto económico directo e indirecto que supone [6].

No obstante, este deporte presenta características singulares tanto de juego como del entorno en el que se desempeña, que pueden dar lugar a diferentes situaciones que dificultan el buen desarrollo de la partida. En cuanto a la gestión de la dinámica de juego, encontramos la problemática del **juego lento**. Este problema es uno de los más habituales y de los que más entorpece las competiciones, pudiendo ralentizar enormemente las partidas que se estén jugando simultáneamente en el campo de golf. En concreto, en campeonatos y torneos donde hay gran afluencia de jugadores, es habitual que una partida que en circunstancias normales se juegue en tres horas y media, se extienda hasta cinco horas y media a causa de esta problemática, donde se dan partidos de jugadores que ralentizan el ritmo a los posteriores o bien por pérdida de pelotas o bien por dedicar mucho tiempo a cada golpeo.

Esto supone un gran impedimento para el desarrollo del juego, alarga el tiempo del torneo, y, además, provoca malestar y hartazgo en los jugadores, ya que pueden tener que estar esperando a que un hoyo se libere para poder continuar con su juego. Por ello, los clubs y federaciones de golf establecen en las normativas diferentes medidas con el fin de paliar estas situaciones. Por un lado, se puede dar paso a los jugadores/partidos más rápidos para que no tengan que esperar continuamente al

partido anterior. Por otro lado, se puede avisar a los jugadores lentos para que agilicen el juego o incluso se podrían amonestar en caso de hacer caso omiso a las advertencias. La figura de juez del juego se denomina *marshal*, y es la encargada de llevar a cabo las medidas mencionadas. Sin embargo, la considerable superficie terrenal de un campo de golf impide que pueda estar al tanto de todos los juegos y de tener datos suficientes para aplicar las medidas.

En este proyecto se ha desarrollado un sistema de comunicaciones que **dotará a los campos de golf de información detallada para una gestión de juego certera y sencilla**, uniendo deporte y tecnología para un mayor disfrute de los golfistas y facilitar la gestión del juego al *marshal*. Esto es posible gracias a que, en las últimas décadas, la tecnología ha progresado a un ritmo acelerado, transformando radicalmente la forma en que vivimos, trabajamos e interactuamos con el mundo que nos rodea. Los avances tecnológicos en campos como la informática, las comunicaciones, la robótica, la inteligencia artificial y la electrónica han impulsado el desarrollo de nuevas herramientas y dispositivos que han mejorado significativamente nuestra calidad de vida.

En concreto, en este trabajo, se han diseñado unos dispositivos para **los jugadores de golf donde podrán monitorizar sus parámetros de juego y anotar sus puntuaciones** a lo largo de la partida, entre otras funciones. Además, permitirán **conocer la posición exacta de los jugadores y su ritmo** de juego, información que resulta altamente útil para el *marshal*. Por tanto, una de las tecnologías que aplica a este proyecto son los sistemas de posicionamiento global (GNSS de sus siglas en inglés: *Global Navigation Satellite System*). Hoy en día, son utilizados masivamente y continúan expandiéndose a diversas aplicaciones y dispositivos. Esta tecnología nos permitirá ubicar a los jugadores en el campo de golf con una precisión suficientemente buena, al presentar un error inferior a los 10 metros.

En cuanto a las comunicaciones, una de las tendencias más importantes en la tecnología moderna es la denominada como **Internet de las cosas (IoT)**, que hace referencia a una red de dispositivos y objetos cotidianos conectados a Internet. La creciente interconexión de dispositivos a través de redes IoT está creando nuevas oportunidades para mejorar la eficiencia y la productividad en la industria, el transporte, la agricultura y otros campos. También está permitiendo la creación de nuevos modelos de negocio y servicios innovadores. Dos de estas tecnologías son LoRaWAN y Zigbee. LoRaWAN es una tecnología inalámbrica de bajo consumo que utiliza la banda de frecuencia ISM sin licencia para conectar dispositivos IoT a través de largas distancias. Por otro lado, Zigbee es una tecnología de malla inalámbrica de bajo consumo energético. En este trabajo, se han ensayado ambas tecnologías en un campo de golf, y finalmente, se ha optado por trabajar con LoRaWAN dado que resulta más adecuada para la aplicación en cuestión, tal y como se demuestra a lo largo de este documento.

Las redes mencionadas, permiten la conexión de los dispositivos a internet mediante equipos intermedios denominados *gateways*, posibilitando la comunicación con servidores ubicados en cualquier parte del mundo. De esta forma se logra establecer la comunicación entre los dispositivos diseñados y el servidor central del proyecto. Este

servidor alberga un servicio que recibe y envía mensajes a los dispositivos y, además, dispone de un portal web que será el que mostrará al *marshal* la posición de cada jugador y los tiempos de paso por cada hoyo, pudiendo acceder a esta información desde cualquier sitio con conexión a internet y desde cualquier dispositivo inteligente como *smartphone*, *tablet*, ordenador portátil etcétera. El servidor web se aloja en un distribuidor en la nube, mediante el cual se garantiza su funcionamiento y accesibilidad en todo momento de una forma eficiente sin la necesidad de tener un servidor propio y su mantenimiento.

En la siguiente imagen se muestra un esquema general del sistema desarrollado en el proyecto. Como se puede apreciar, el sistema consta de: un dispositivo (*device*) que será portado por los jugadores y que, entre otras tareas, es capaz de geolocalizar la posición del jugador valiéndose de sistemas de navegación por satélite GNSS, un equipo *gateway* o puerta de enlace, que se encargará de hacer de intermediario entre los dispositivos e internet, y finalmente un servidor en la nube que tendrá, por una parte, un servicio para comunicarse con los dispositivos a través de mensajes o tramas de comunicación, y un portal web al que se podrá acceder en vivo para ver la información actualizada.

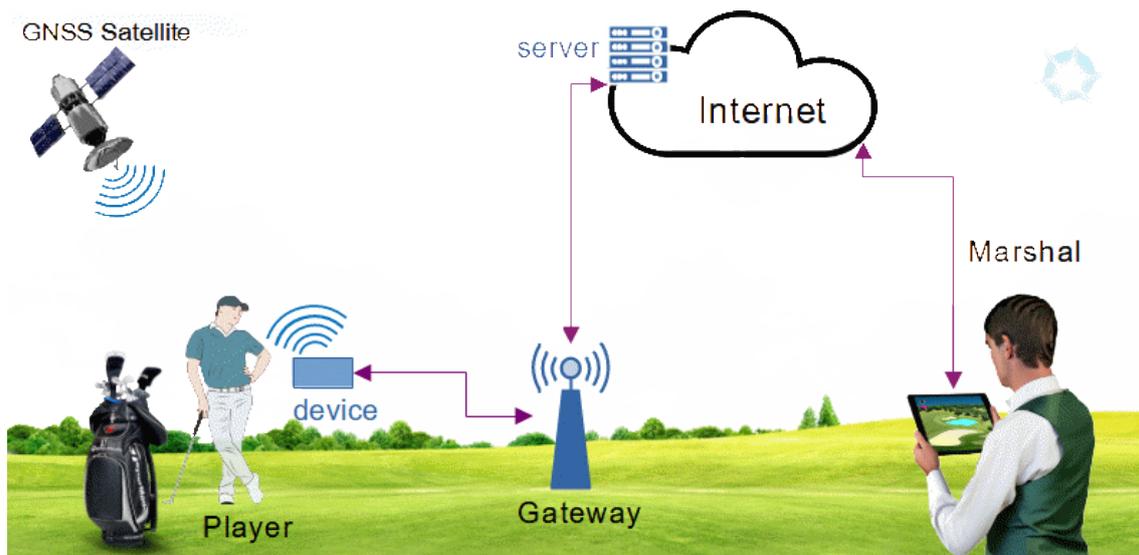


Figura 1. Esquema general del proyecto.

2. OBJETIVO

El objetivo principal de este proyecto es desarrollar una red de dispositivos que permita gestionar la dinámica del juego de un campeonato de golf de forma eficiente y proveer a los usuarios de la información del juego. Entre los objetivos específicos se encuentran los siguientes:

- Estudiar diferentes redes de comunicaciones con el fin de determinar cuál se ajusta mejor a las necesidades de la aplicación.
- Realizar el diseño y fabricación hardware de dispositivos encargados de hacer el seguimiento a los usuarios y de ofrecerles a los mismos información actualizada del juego.
- Desarrollar el software del servidor central y desplegarlo en la nube. Este servidor recibirá la información de los dispositivos y dará acceso al *marshal* para ver el estado global del juego.

En definitiva, desarrollar un sistema de principio a fin (desde el dispositivo hasta la plataforma web) y ponerlo en práctica de forma satisfactoria.

3. CONTEXTO TECNOLÓGICO Y ESTADO DEL ARTE

Primeramente, para poner el proyecto en contexto, se documenta el estado actual en el que se encuentra el desarrollo teórico y práctico tanto en las tecnologías que se usan en este proyecto, como en los sistemas que ya existen para la gestión del juego en los campos de golf.

3.1. Golf: soluciones tecnológicas existentes

Debido a la accesibilidad y viabilidad de los avances tecnológicos y del interés económico que suscita este deporte, actualmente existen diferentes soluciones tecnológicas que tratan de facilitar la gestión de los campos de golf. Sin embargo, las soluciones propuestas suelen responder parcialmente a las necesidades del campo o de los usuarios, y, además, la implementación del sistema depende de redes de otros proveedores o de los dispositivos de los usuarios.

Por un lado, existen multitud de soluciones software que facilitan la gestión de partidas, puntuaciones, estadísticas de jugadores, caja registradora, etc. Incluso permiten gestionar los servicios de bar y restaurante o el mantenimiento del campo, pero no proporcionan ningún sistema de control de juego ni de seguimiento de los jugadores. Algunos de estos sistemas son Tee-sheet (Lightspeedhq) [7], Foreupgolf [8], Teequestsolutions [9] y Clubcaddie [10]. Por tanto, estas soluciones son parciales y no responden a la problemática del juego lento ni de la gestión del juego en vivo.

Por otro lado, se han popularizado dispositivos que permiten hacer el seguimiento del juego a los jugadores de golf, que les permite hacer seguimiento del juego, mostrando datos como distancia a *green*, forma del hoyo, obstáculos, tiempo de hoyo, tiempo de juego, etc. Asimismo, habitualmente permiten apuntar las puntuaciones y ver un histórico y estadísticas del juego. Típicamente, son dispositivos como relojes inteligentes de actividad, pero también existen aplicaciones para *smartphones* [11]. A pesar de que es una solución interesante para los jugadores, lo cierto es que no aportan nada al campo de golf y no dan solución a la problemática de gestión de juego, cuando realmente es posible desarrollar una solución integral que satisfaga las necesidades tanto de los jugadores como del campo de golf.

Además de las soluciones parciales, existen otras que tratan de resolver de forma integral al campo de golf. Es el caso de una patente de 2015 de la USGA (*United States Golf Association*), una importante asociación en el mundo del golf encargada de definir las reglas del deporte a nivel mundial; que trata de hacer el seguimiento de los jugadores mediante sensores y actuadores. En la patente se describe un sistema de monitorización del ritmo del juego a partir de la utilización de sensores en la bandera del hoyo para detectar su retirada y colocación. Mediante estas transiciones es posible calcular tiempos en *green*, en hoyos y entre jugadores. Sin embargo, este sistema puede resultar insuficiente dado que el *marshal* sólo podría obtener esa información, pero no dónde se sitúa cada jugador y si están siendo ralentizados por el grupo anterior.

Una solución integral que aporte la información suficiente al *marshal* debe mostrarle la localización de los jugadores en el campo y los tiempos de juego. Para ello, es necesario un dispositivo con un sistema de posicionamiento GNSS que pueda ser portado o bien en el *buggy* o bien en el carro de palos del jugador. Además de la localización, es esencial contar con una conexión a una red adicional para transmitir esta información a una plataforma que permita un seguimiento en tiempo real. En el caso de Tagmarshall [12], esto se realiza usando la red de telefonía móvil, por lo que cada dispositivo debe tener una tarjeta SIM con una tarifa que le permita enviar la información de la ubicación. No obstante, esta solución depende de la cobertura de la red móvil que se disponga en el campo y, además, el club de golf no tiene el control sobre esa red.

Tras el análisis del estado de arte de los sistemas existentes, se puede concluir que no existe ninguna solución de control de juego similar a la propuesta en este trabajo. Es decir, que se implemente mediante una red propietaria del campo de golf, que pueda controlar de forma íntegra los servicios que ofrece sin depender de los dispositivos que puedan tener los jugadores, y que sea independiente de otras redes de comunicaciones.

3.2. Sistema global de navegación por satélite

Una parte fundamental del proyecto es la correcta ubicación de los jugadores en el campo de golf. Hoy en día es posible gracias a los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS), que son aquellos que permiten determinar la ubicación geográfica de un objeto o persona gracias a una constelación de satélites. Estos sistemas empezaron a desarrollarse en la década de 1960, donde la armada estadounidense buscaba un sistema de navegación. Con dicho objetivo, se desarrolló un sistema de navegación terrestre (OMEGA) que presentaba muchas limitaciones, y los llevó a saltar al espacio en busca de un sistema global y de mayor precisión. Fueron desarrollando el sistema de navegación y su constelación de satélites, hasta lograr lo que hoy en día se conoce comúnmente como GPS (*Global Positioning System*). [13]

El sistema GPS era exclusivamente de uso militar hasta que en 1983 el presidente de EE.UU. Ronald Reagan anunció la apertura del sistema para uso civil (aunque con menos precisión). Por consiguiente, hoy en día, GPS proporciona dos servicios distintos: El Servicio de Posicionamiento Preciso (PPS), encriptado para uso militar, y el Servicio de Posicionamiento Estándar (SPS), de acceso público. Este último permite que cualquier dispositivo provisto de un receptor GPS pueda obtener la localización y hora exacta de forma gratuita y sin solicitar acceso previamente. Por consiguiente, su uso se ha extendido de forma masiva para numerosas aplicaciones, ya que, no existe límite máximo de número de usuarios. [13] [14]

El sistema GPS está compuesto por una constelación de 24 satélites funcionales orbitando en seis planos orbitales (cuatro satélites en cada órbita) a una distancia aproximada de 20.200 Km sobre la superficie. De esta forma se garantiza que un receptor en cualquier punto de la superficie del planeta tenga visibilidad para comunicarse con al menos cuatro satélites (necesarios para obtener la ubicación) independientemente de la hora del día y de las condiciones atmosféricas. Además, el sistema GPS cuenta con estaciones terrestres de seguimiento y control ubicadas en

distintos lugares del mundo, que se encargan de hacer el seguimiento del estado de los satélites, enviarles los ajustes necesarios y calcular las órbitas. [13] [14]

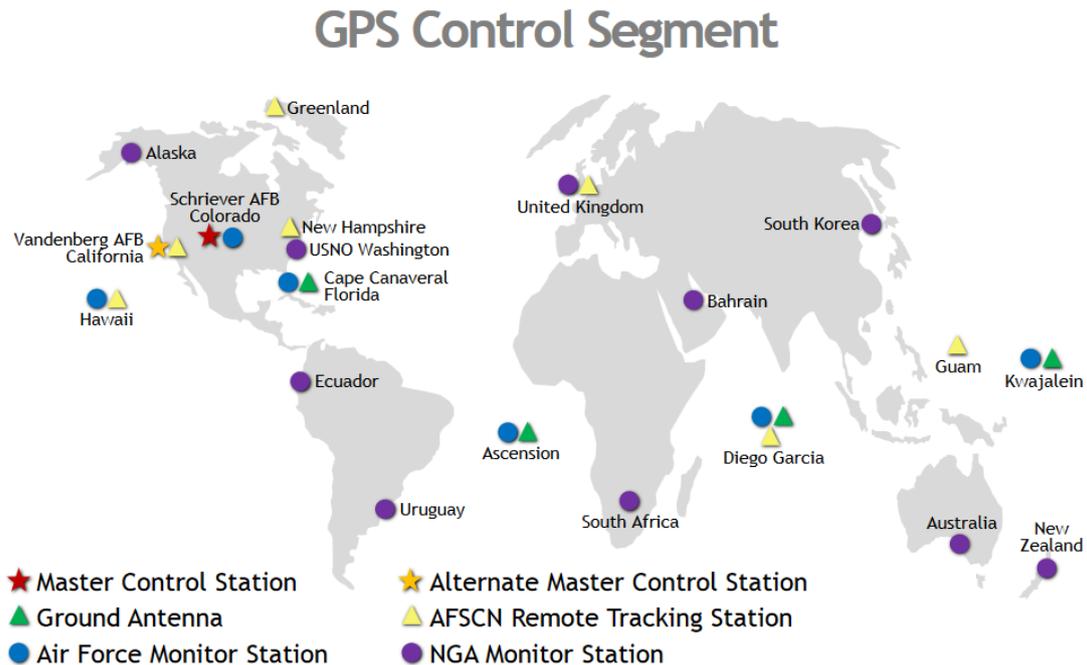


Figura 2: Estaciones terrestres del sistema GPS [14].

Los satélites operativos del sistema GPS transmiten constantemente la información que necesitan los receptores para obtener su localización. Estos pueden transmitir en las bandas L1 (1575.42 MHz), L2 (1227.60 MHz) y L5 (1176.45 MHz), aunque todos los satélites son capaces de transmitir la señal en L1, algunos sólo transmiten en L1 y L2, y otros en las tres bandas. Del mismo modo algunos receptores, sólo pueden recibir en L1, o L1 y L2, o en las tres. La señal transmitida está modulada en fase, utilizando una portadora en las frecuencias descritas, donde se transmiten los códigos PRN (civil o militar) y el mensaje de navegación. Actualmente, el mensaje de navegación contiene 1500 bits a 50 bits por segundo, lo que supone que tarda 30 segundos en transmitir cada trama. Estas tramas constan de tres partes principales, la primera de ellas es la fecha y la hora GPS. La segunda parte se trata de las **efemérides**, que es la información orbital para dar a conocer la posición del satélite (coordenadas astronómicas), datos que serán válidos para las próximas 4 horas después de su adquisición. Por último, se encuentra la información del estado y posición del resto de los satélites de la constelación. Esta última información se conoce como **almanaque**, y para recibir la información completa es necesario recabar 25 mensajes de navegación sucesivos, y, por tanto, se requiere de 12 minutos y 30 segundos. [15] [16] [17]

Un receptor GPS logra determinar su localización haciendo uso del método matemático **trilateración**, que utiliza dos o más localizaciones de referencia y la distancia entre el punto de interés (receptor) y estos (satélites). Para dar con la solución en plano bidimensional es suficiente con 3 puntos de referencia. Sin embargo, en el caso que nos ocupa, en un espacio tridimensional, con 3 puntos podemos no hallar solución u obtener una o dos soluciones, dependiendo del error de las distancias obtenidas. El receptor GPS, cuando obtiene dos soluciones, asume que no se encuentra en el espacio fuera de las órbitas de los satélites y da por válida la solución que si se encuentra dentro del espacio de los satélites. Otra forma de obtener la solución válida es con un cuarto punto de referencia, es decir, con otro satélite a la vista. [17] [18]

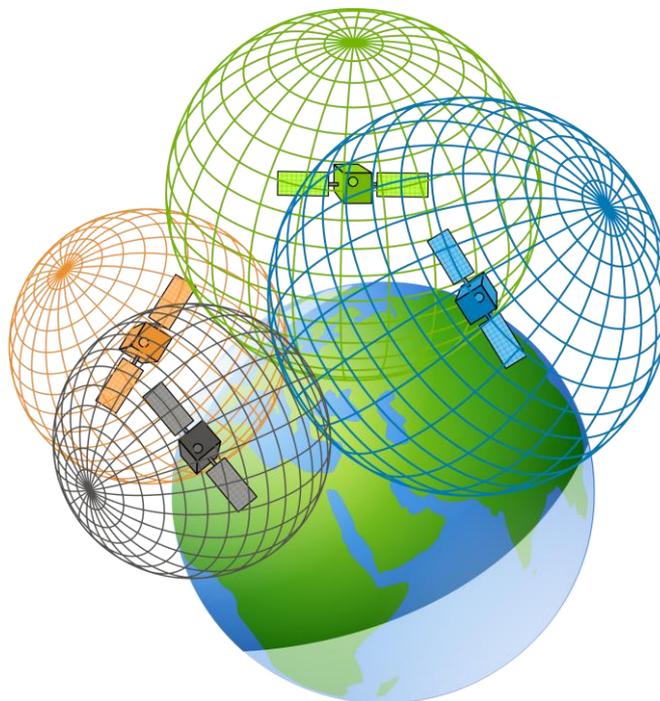


Figura 3: Trilateración GPS.

Cabe reseñar que el receptor recibe la hora y la posición de los satélites, pero la distancia la tiene que calcular él mismo. Este cálculo es posible gracias a la sincronización de los relojes, que permiten saber cuánto tiempo tarda en recibirse la señal desde que se ha emitido desde el satélite (t). Con ese dato y la velocidad de propagación de la señal (v), que es igual al de la velocidad de la luz, la distancia puede ser determinada: [17] [18]

$$d = v * t$$

Así es como el receptor es capaz de determinar su posicionamiento sobre el globo terráqueo.

El sistema de navegación GPS es el más utilizado en el mundo entero, sin embargo, no es el único. En plena guerra fría la antigua Unión Soviética desarrolló **GLONASS** [19], ahora en manos de la Federación Rusa. En años posteriores, más países o bloques de países crearon programas propios para crear sus propios sistemas de navegación y así no depender únicamente de EE.UU. Entre los más destacables encontramos el sistema de la Unión Europea llamado **Galileo** [20], y el creado por la República Popular China: **BeiDou**. En la siguiente tabla se muestra una breve comparativa, aunque a grandes rasgos, son muy similares:

Nombre GNSS	Año inicio	Nº sat. (activo)	Distancia orbital	Países/ Gestión	Cobertura	Precisión	Banda freq.	Codificación
GPS	1978	24 (31)	20.200 km	EE.UU.	Global	5-10 m	L1, L2, L5	C/A, P(Y), M
GLONASS	1982	24 (24)	19.100 km	Rusia	Global	2-4 m	L1, L2, L3	FDMA
Galileo	2002	26 (22)	23.222 km	Unión Europea	Global	1-5 m	E1, E5, E6	OS, PRS, CS
BeiDou	2000	35 (29)	21.500 km	China	Asia-Pacífico	<10 m	B1, B2, B3	BDSI, BDSII
NavIC	2016	7 (7)	36.000 km	India	India	<10 m	L5	S, L5
QZSS	2010	4 (4)	39.000 km	Japón	Asia-Pacífico	<1 m	L1, L2, L5	C/A, L1C/A, LEX
IRNSS	2013	7 (7)	36.000 km	India	India	<10 m	L5	S, L5

Tabla 1. Comparativa características principales sistemas GNSS. [13] [14] [20]

En la actualidad, los receptores GNSS han ampliado su capacidad, implementando el protocolo de diferentes sistemas de posicionamiento en un mismo chip. De esta forma, se evita la dependencia absoluta a un único sistema en manos de un país, y, además, se mejora la precisión al evitar posibles intermitencias de señal por visibilidad, ya que el sistema hace uso de más satélites.

3.3. Sistema de comunicación inalámbrica basada en redes IoT

En la actualidad, se está dando un aumento en la interconexión de objetos para diversos usos como analizar su estado mediante sensores, recolectar información para su posterior análisis, generar alarmas etc. Así surgió la denominada Internet of Things o IoT, que se define como una red de dispositivos u objetos interconectados entre sí mediante una red privada o pública, donde no es necesaria la interacción humana para que estos dispositivos se comuniquen entre sí, a un dispositivo central u otro y realicen una u otra acción. A pesar de compartir esa definición general, es un marco de comprensión muy amplio del cual no hay una definición precisa y compartida globalmente, dado el estado de desarrollo, de constante evolución y crecimiento en el que se encuentra. Algunas de las aplicaciones comunes de este tipo de redes se encuentran en la domótica, agricultura inteligente, e-salud y *smart citys*, aunque hoy en día se está aplicando en cualquier ámbito. [21] [22]

La implementación del IoT descansa sobre las redes de sensores inalámbricas (WSN) ya que de forma remota se lleva a cabo la recolección de datos, monitorización, control automatizado o control remoto, entre otras aplicaciones. En adición, se prevé que a partir de las capacidades que ofrece la red 5G, actualmente en despliegue, surgirán nuevas aplicaciones IoT más exigentes en cuanto a velocidad y capacidad de conexión. [21] [22] [23]

Entre los retos del Internet de las Cosas, se enumeran tres problemáticas principales que deben resolver los protocolos de telecomunicaciones empleados. La seguridad y privacidad de los datos y de los usuarios es primordial dado que estos dispositivos se están implantando en múltiples ámbitos, donde mantener la privacidad del usuario puede ser esencial. En la mayoría de los casos, los dispositivos serán inalámbricos, por ello, es importante que su diseño sea óptimo desde el punto de vista del consumo de energía. Finalmente, en función de la aplicación, es posible que sea necesaria la conexión de una gran cantidad de dispositivos simultáneamente, por lo que las redes y protocolos de comunicaciones deben ser capaces de soportarlo. [24]

Por tanto, existen diferentes posibilidades de conexión entre dispositivos. Una de ellas es la conexión directa entre dos o más dispositivos de mismo nivel. Otro modelo es el de conexión de los dispositivos a un dispositivo central donde reside la inteligencia. Por otro lado, los dispositivos podrían estar conectados directamente a una aplicación en la nube a través de internet. Un modelo similar es cuando los dispositivos se conectan a la nube, con la diferencia de que todos lo hacen a través de una puerta de enlace (o varias), es decir, mediante un equipo que se encarga de la conexión de la red de dispositivos con la nube. [21] [22]

Cabe reseñar la estrecha relación existente entre las redes IoT y el Big Data, dado que una de las principales aplicaciones de estas redes es la recolección masiva de datos mediante múltiples dispositivos sencillos encargados de recolectar o enviar información captada por sensores, actuadores u otros. Estos macrodatos se utilizan posteriormente

para su análisis y procesado, con el objetivo de extraer ciertas conclusiones de interés. [23]

Dadas las características ya mencionadas y la aplicación a la que estén orientadas, la tecnología inalámbrica debe ser seleccionada cuidadosamente. A continuación, se muestran algunas de las tecnologías inalámbricas más utilizadas en el ámbito del IoT y sus características:

Tecnología	Topología	Consumo de energía	Frecuencia (Europa)	Costo	Cobertura (metros)	Velocidad (kbps)
Wi-Fi	P2M	Alto	2.4 GHz, 5 GHz	Moderado	10-50 m	<100 Mbps
Bluetooth BLE	P2P	Medio	2.4 GHz	Bajo	10-50 m	<3 Mbps
Zigbee	Malla	Medio	2.4 GHz, 868 MHz	Moderado	<10-100 con repetidores	<250 kbps
Z-Wave	Malla	Medio	900 MHz	Moderado	<10-30 con repetidores	<100 kbps
LoRaWAN	Estrella	Bajo	433 o 868 MHz	Bajo	1-10 Km	<50 kbps
NB-IoT	Estrella o Malla	Bajo-medio	Frecuencias GSM y LTE	Moderado	Amplia cobertura celular	<250 kbps
Sigfox	estrella	Bajo	868 MHz	Bajo	Según despliegue de Sigfox	20-250 kbps

Tabla 2. Comparación tecnologías IoT.

En cuanto a redes de bajo consumo y de baja tasa de transmisión de datos, así como de un alcance medio-largo, en este trabajo se han seleccionado las tecnologías IEE802.15.4 y LoRa. Ambas son tecnologías a bajo nivel de comunicaciones y, por tanto, por encima de ellas se encuentra Zigbee y LoRaWAN, tecnologías de comunicación de alto nivel. Posteriormente, en los subapartados se procede a analizarlas en profundidad:

3.3.1. IEEE802.15.4

IEEE 802.15.4 es un estándar que define el nivel físico y el control de acceso al medio de redes inalámbricas de área personal con tasas bajas de transmisión de datos (LR-WPAN) y bajo consumo energético. El responsable de su desarrollo es el grupo de trabajo IEEE 802.15.

Esta tecnología opera en la banda frecuencial no licenciada ISM (*Industrial Scientific and Medical*) disponible en todo el mundo y definidas por el reglamento de la UIT [25]. A pesar de ser de uso no licenciado y gratuito, existe una regulación de uso por la autoridad competente del lugar, donde se establecen límites como, por ejemplo, la potencia máxima de transmisión. En Europa y otros países asociados existe el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI) que se encarga de hacer una regulación general del uso. Además, cada país puede tener órganos propios que se encargan de hacer cumplir dicha normativa y tienen la potestad de añadir matices a dicha normativa. Por último, los operadores con redes propias pueden establecer otra serie de límites que no sean contradictorios con las normas superiores, un ejemplo de ello podría ser establecer un límite de datos que puede enviar un nodo. En concreto se usa la frecuencia 2.4 GHz y también otras según la región del mundo, en Europa la banda 868 MHz, lo que permite su despliegue global y su interoperabilidad. [26] [27]

Las características principales de IEEE802.15.4 incluyen un bajo consumo de energía, baja tasa de transmisión de datos, capacidad de autoorganización de la red, comunicación punto a punto y en malla, y soporte para múltiples canales de frecuencia. Además, se ha logrado desarrollar componentes eficientes y económicos, lo que ha impulsado su adopción y despliegue en una amplia gama de aplicaciones, como la domótica, la monitorización ambiental y la agricultura de precisión. [27]

IEEE802.15.4 admite dos modos de operación: el modo de dispositivo completo y el modo de dispositivo reducido. En el modo de dispositivo completo, los dispositivos finales están activos todo el tiempo y pueden transmitir y recibir datos en cualquier momento. En el modo de dispositivo reducido, los dispositivos finales permanecen en un estado de bajo consumo de energía la mayor parte del tiempo y sólo se activan cuando es necesario transmitir o recibir datos. [27]

Una de las características destacadas de IEEE 802.15.4 es su capacidad para formar redes de malla, donde múltiples dispositivos pueden comunicarse entre sí de forma inalámbrica. Esto permite una mayor cobertura y una mejor tolerancia a fallos en comparación con las topologías de red tradicionales.

En lo que respecta a la seguridad, IEEE 802.15.4 ofrece mecanismos de seguridad y acceso en el subnivel MAC con el objetivo de proteger la comunicación inalámbrica, garantizando así la confidencialidad e integridad de los datos transmitidos. Entre otros permite el uso de claves simétricas y listas de control de acceso. En cualquier caso, el nivel de seguridad dependerá de la implementación en concreto. [27]

3.3.2. Zigbee

Zigbee trabaja sobre la especificación de bajo nivel (físico y MAC) 802.15.4 complementando los niveles superiores de la pila de protocolos que el estándar no cubre para proporcionar una solución completa de red WPAN (*Wireless Personal Area Network*). Las características principales de una red Zigbee son baja tasa de envío, bajo consumo, bajo coste, seguridad y transmisión a distancias cortas. Entre las diversas aplicaciones que puede tener, ha tomado especial popularidad el uso en domótica. La encargada de mantener y publicar el estándar Zigbee es una agrupación de empresas denominada *Connectivity Standards Alliance* [28] (anteriormente llamada *Zigbee Alliance*). [27] [29] [30]

Una red Zigbee consta de tres tipos de dispositivos [29] [30]:

- **Coordinador o Zigbee Coordinator (ZC)**: Se trata del dispositivo central de la red y se encarga de iniciar y controlar la comunicación. Este dispositivo es el más complejo y sólo puede haber uno en cada red.
- **Enrutador o Zigbee Router (ZR)**: Es un dispositivo intermedio en la red y se utiliza para extender la cobertura de la red. También ofrece un nivel de aplicación para la ejecución de código.
- **Dispositivo final o Zigbee End Device (ZED)**: es el dispositivo más sencillo y es capaz de comunicarse con su nodo padre (enrutador o coordinador). Este tipo de dispositivo puede funcionar con baterías y no requiere una fuente de alimentación continua, ya que, una vez finalizada la comunicación entra en reposo.

En cuanto a la topología de red, Zigbee es versátil en este aspecto y permite tres topologías. Por un lado, la topología en estrella, donde el coordinador es el centro y todos los dispositivos se conectan a él. Por otro lado, la topología en árbol que tendrá como raíz el coordinador y los dispositivos se conectan a él en diferentes niveles. Finalmente, permite la topología en malla, la más utilizada en Zigbee, en la que los nodos pueden comunicarse directamente con los nodos vecinos y tener más de un camino posible para transmitir, añadiendo así mayor redundancia y fiabilidad. Zigbee permite otra solución híbrida en la que coordinadores pueden conectarse entre sí para formar una red de redes y extender el alcance. [29] [30]

Aunque en general estén pensadas para corta distancia y uno de sus principales usos sea el entorno domótico, muestran características que son apropiadas para este tipo de despliegues donde se cubren distancias de un rango aproximado de quinientos metros. En este trabajo, esta tecnología inalámbrica es probada y comparada con el fin de determinar la viabilidad de su uso en esta aplicación.

3.3.3. LoRa

LoRa es el acrónimo de **Long Range** y es una tecnología de comunicación inalámbrica de largo alcance con baja tasa de transferencia de datos y bajo consumo energético. Fue desarrollada por Cycleo, una *start-up* francesa, que posteriormente fue adquirida por Semtech Corporation y actualmente sigue siendo una tecnología propietaria. Una de las características más elogiadas de esta tecnología es que en área rural puede lograr un alcance de 10 Km y en áreas urbanas hasta 3 Km, pero depende mayormente del entorno concreto y de la red desplegada. [31] [32]

LoRa es una modulación propietaria de tipo espectro ensanchado (en inglés *Spread Spectrum Modulation SSM*) basada en **Chirp Spread Spectrum (CSS)**, que nos permite establecer un enlace de comunicación de largo alcance. Esta modulación se basa en transmitir la información variando la frecuencia de forma lineal con el tiempo, siendo una señal sinusoidal de amplitud constante. Se puede dar de dos formas, de forma decreciente, lo que se denomina *downchirp*, o de forma ascendente, *upchirp*. [31] [32] [33]

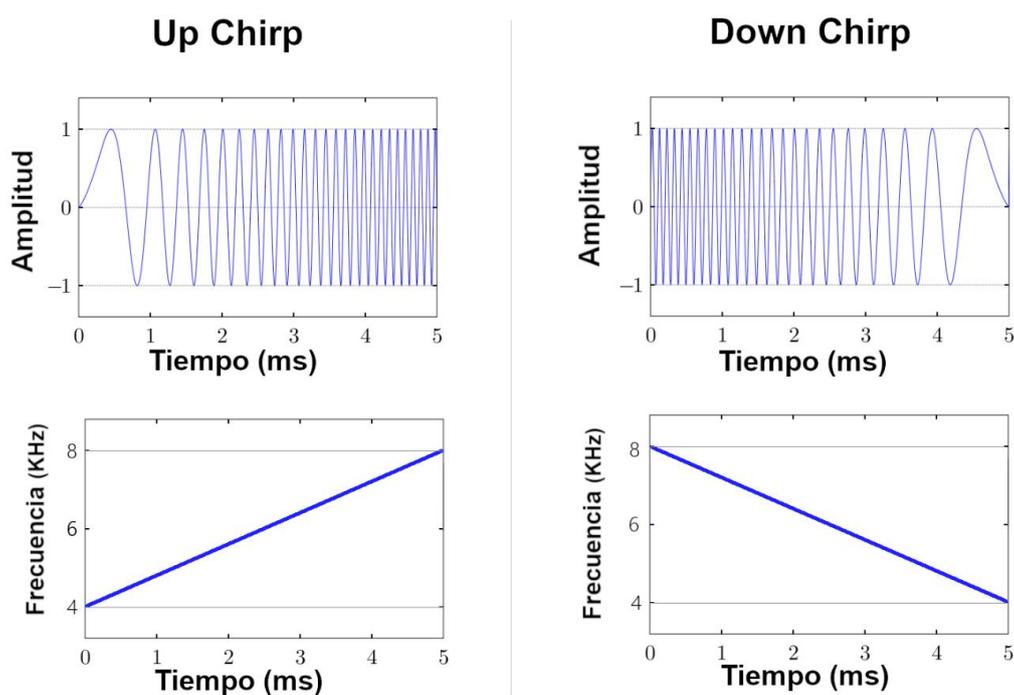


Figura 4. Ejemplo de señales *upchirp* (izquierda) y *downchirp* (derecha). En la parte superior se muestran las gráficas de amplitud de la señal respecto al tiempo, y, debajo, la frecuencia respecto al tiempo.

La forma en la que la información es transportada es a través de estos **chirps**, donde cada uno representa un símbolo de unos bits determinados. Los símbolos se diferencian unos de otros por comenzar en una frecuencia u otra además de ser ascendente (*upchirp*) o descendente (*downchirp*). En cualquier caso, los *chirps* duran un tiempo determinado, lo que se denomina periodo *chirp* o periodo símbolo. Durante este periodo

la frecuencia de la señal varía desde la frecuencia inicial hasta la misma frecuencia subiendo o bajando y saltando de una frecuencia límite a la otra. A continuación, se muestra una señal LoRa donde se envían múltiples símbolos (S0-S10), donde encontramos que S0-S4 son idénticos, y, por consiguiente, corresponden al mismo símbolo (*upchirp*). [31]

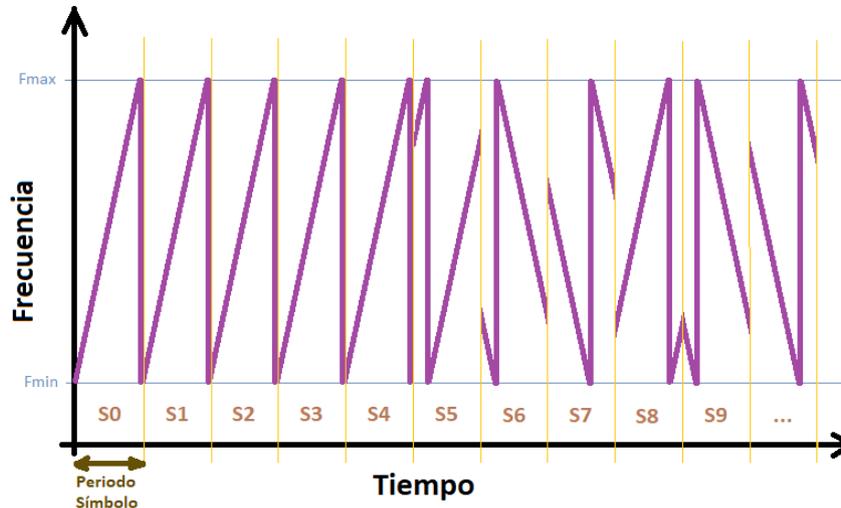


Figura 5. Ejemplo conceptual de señal LoRa (frecuencia frente al tiempo).

Una problemática clave, que LoRa resuelve, es la sincronización, ya que la correcta demodulación de los símbolos depende de conocer los instantes inicio y final de los periodos. Así pues, LoRa envía múltiples veces el mismo símbolo con el objetivo de que el receptor se sincronice para ajustar la ventana de detección de símbolo. Al conjunto de símbolos enviados para la sincronización se denomina **preámbulo** (véase en la figura superior los *chirps* iniciales S0-S4 formarían el preámbulo). El número y el tipo de *chirps* del preámbulo pueden ser diferentes según la aplicación, pero típicamente se usa una secuencia de 8 o 10 *upchirps* iniciales seguidos de 2 *downchirps*. El preámbulo se transmite al principio de cada trama, lo que supone tener una tasa de bits de información menor, ya que estos símbolos únicamente sirven para sincronizar y no incluyen información. [31] [32]

En cuanto a los conceptos de interés, el tiempo en el aire, o comúnmente llamado **ToA** (*Time on Air*), es el tiempo desde que un transmisor envía una señal hasta que el receptor la recibe. Es decir, el tiempo que el mensaje se encuentra en el aire transmitiéndose. Relacionado con este concepto se encuentra el ciclo de trabajo (**duty cycle**), que hace referencia al porcentaje del uso del canal (aire) que hace un dispositivo. En Europa está limitado a 1% por normativa, lo que supone que después del ToA de transmisión se ha de esperar 99 veces el tiempo ToA para transmitir de nuevo. Esta regulación se establece para que un dispositivo no esté continuamente transmitiendo, ocupando el canal e impidiendo que otros dispositivos usen el canal, provocando interferencias y reduciendo el rendimiento de la red. [31] [32]

LoRa permite configurar los parámetros de **ancho de banda (BW)** y **factor de propagación (SF)**, aunque existen diferentes restricciones dependiendo de la región del mundo. En cuanto al ancho de banda del canal utilizado para transmitir puede ser de 125, 250 o 500 kHz, que son anchos de banda establecidos internacionalmente para LoRa, aunque en Europa se restringe más permitiendo sólo 125 o 250 kHz. Por otro lado, el factor de propagación puede tener un valor entero entre 7 y 12, e indica el número de bits que contiene cada símbolo. Por tanto, un símbolo puede tener 2^{SF} valores distintos (desde 0 hasta $2^{SF} - 1$). Este parámetro, también establece la relación entre el ancho de banda utilizado y la duración de los símbolos transmitidos. De esta forma se calculan el tiempo de símbolo (T_s) y la tasa de símbolo (R_s): [31] [32] [33]

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \qquad R_s = \frac{BW}{2^{SF}}$$

De las ecuaciones anteriores podemos deducir que un SF mayor da como resultado un tiempo en el aire exponencialmente mayor, en comparación con el aumento lineal de bits.

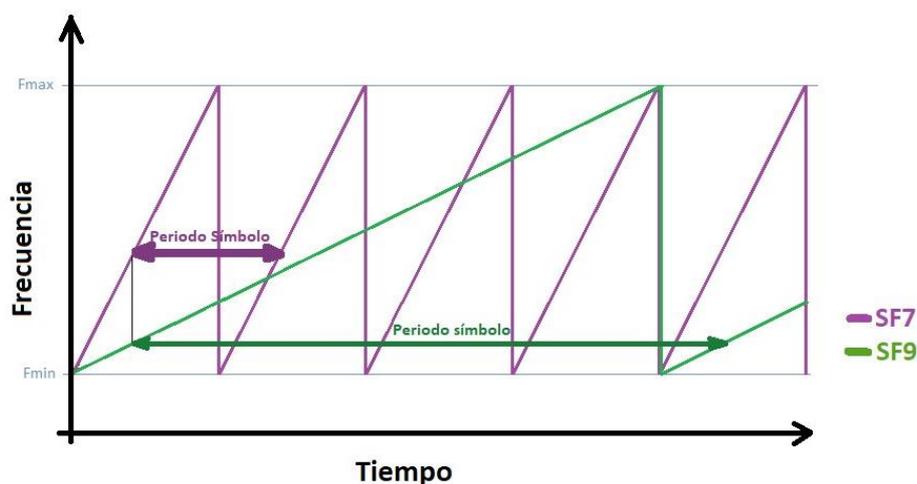


Figura 6. Gráfica señales con SF diferente. Se trata de una gráfica conceptual donde no se han tenido en cuenta valores concretos.

Hablando en términos de **Data Rate** (número de bits procesados cada unidad de tiempo), obtenemos menor DR con un mayor SF. También, el consumo energético será superior al ser mayor el tiempo de símbolo. Sin embargo, la principal ventaja de utilizar un mayor SF es que la comunicación resulta más robusta frente al ruido y las interferencias, aumentando así el alcance: A mayor SF menor SNR es necesario para recibir la señal. Al contrario, un menor SF supone un DR mayor y menor consumo energético, pero una mayor probabilidad de pérdida de paquete. Por tanto, de cara a la eficiencia de la red conviene un bajo SF, aunque se trata de adecuarlo según las necesidades, ya que probablemente, en puntos alejados o de baja cobertura se necesitará un SF mayor. Otra característica interesante para tener en cuenta es que las señales con valor SF diferente son ortogonales entre sí, permitiendo compartir el mismo canal y ancho de banda sin solaparse. [31] [32] [33]

3.3.4. LoRaWAN

LoRaWAN es un protocolo de red de área amplia (LPWAN) que hace uso de comunicaciones LoRa creando una red de dispositivos interconectados con la nube, ideal para aplicaciones IoT. Este protocolo es definido por la organización sin ánimo de lucro *LoRa Alliance* [34] formada por más de 500 compañías. Hasta la fecha de este trabajo, se han publicado 6 versiones de LoRaWAN. [31]

LoRaWAN establece cómo los dispositivos deben usar la tecnología LoRa: cuándo transmiten, el formato de los mensajes, etc. Además, siguiendo con las leyes regionales anteriormente mencionadas, establece lo que se conoce como parámetros regionales, donde se definen las bandas frecuenciales, los canales y como usarlos (para Europa: EU868). También, indica cómo formar una red, los tipos de dispositivos necesarios y cómo interactúan entre ellos para que finalmente, esa red permita poner en marcha una aplicación a nivel superior. [31] [35]

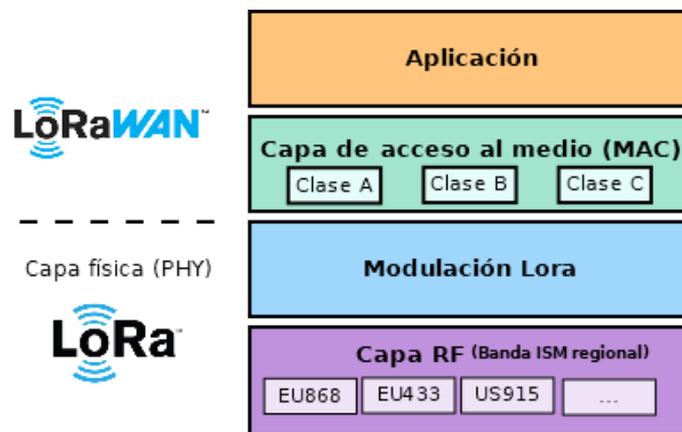


Figura 7. Capas comunicación LoRa/LoRaWAN.

El plan frecuencial EU868 de LoRaWAN define 8 canales para un SF 7 y un ancho de banda de 125 KHz. No obstante, sólo 3 de ellos deben ser soportados por los dispositivos finales y los *gateways*. Por otro lado, los canales pueden ser atribuidos libremente por el operador de red siempre que sean soportados por los equipos. [31] [35] [36]

Número de canal	Frecuencia central (MHz)	Obligatoriedad
1	868.1	Si
2	868.3	Si
3	868.5	Si
4	867.1	No
5	867.3	No
6	867.5	No
7	867.7	No
8	867.9	No

Tabla 3. Plan frecuencial LoRaWAN EU868.

La topología de la red de LoRaWAN es de tipo estrella o estrella de estrellas. Esta red está compuesta por los siguientes elementos [31] [35]:

- **End Device** (dispositivo final): Dispositivos de la red que se comunican con los *gateways* de forma inalámbrica vía LoRa. Pueden tener funcionalidades diferentes, y típicamente se pueden encontrar dispositivos como sensores, actuadores, alarmas o dispositivos de rastreo (*trackers*)....
- **Gateway** (pasarela): Estos equipos son los que se encargan de hacer de intermediarios entre los dispositivos finales y el servidor de red. Hace uso de la red LoRa para comunicarse con los dispositivos finales, y, por otro lado, utiliza una conexión de red tradicional (Ethernet, Wi-Fi, LTE...) para conectarse directamente o a través de internet al servidor de red.
- **Network Server** (servidor de red): Software ejecutado en un servidor que se encarga de gestionar la red de dispositivos. Dependiendo de la configuración de la red deberá realizar diferentes tareas como validar los dispositivos, juntar o desechar mensajes duplicados, enviar confirmaciones de recepción, etc. Además, debe enviar los paquetes recibidos por los dispositivos al servidor de aplicación adecuado, y también en el sentido contrario.
- **Application Server** (servidor de aplicación): Es el software que procesa la información enviada y actúa en consecuencia para cierta aplicación. Una red LoRaWAN puede tener más de un servidor de aplicación.
- **Join Server**: Este elemento se añadió con la versión 1.1 de LoRaWAN. Se encarga de llevar a cabo el proceso JOIN, y de gestionar las claves. También se hace a través del servidor de red.

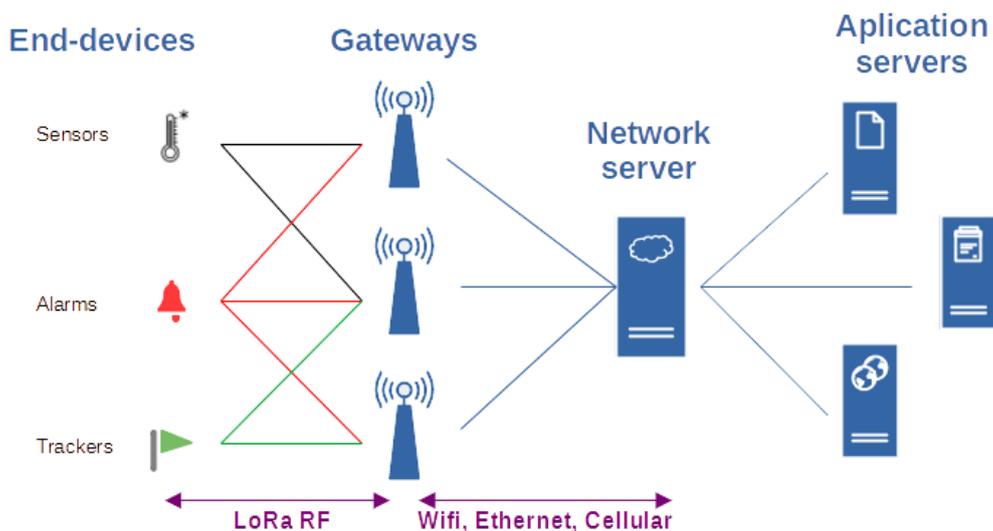


Figura 8. Esquema de red LoRaWAN.

Los mensajes se pueden clasificar según la dirección de envío, siendo **mensajes uplink** aquellos que se envían desde los dispositivos al servidor de red atravesando el *gateway* o los *gateways* que escuchen el mensaje. Al contrario, los mensajes que se envían desde el servidor de red a cierto dispositivo usando cierto *gateway*, se denominan **mensajes downlink**. Además, los mensajes de datos, tanto los *uplink* como los *downlink*, pueden requerir confirmación o no, y se conocen como mensajes de tipo *Confirmed/Unconfirmed Data Down/Up*. [31] [35]

En cuanto a los dispositivos finales o *end-devices*, la especificación LoRaWAN define tres clases de dispositivos [31] [35]:

- **Clase A** (el nombre proviene de *All*): Esta clase está pensada para dispositivos alimentados por batería, y, por esa razón, únicamente se mantiene a la escucha de paquetes *downlink* en dos pequeñas ventanas de tiempo tras cada envío (*uplink*) para tener un consumo bajo. Después, se mantiene “dormido” para no consumir energía, por lo que no será capaz de recibir ningún paquete (*downlink*).
- **Clase B** (el nombre proviene de *Beacon*): El funcionamiento es igual que un dispositivo de clase A pero se añaden ventanas de recepción extra en ciertos periodos programados. Para que esto funcione se debe dar el proceso llamado *beaconing* en el que el Gateway envía un *beacon* periódicamente a todos los dispositivos para sincronizarlos con la red y programar las ventanas de recepción. Los dispositivos sólo necesitan procesar el *beacon* cuando su reloj se encuentre desalineado. Los dispositivos clase B pueden operar como dispositivos de clase A.
- **Clase C** (el nombre proviene de *Continuos*): En este caso, funciona como un dispositivo clase A pero con la diferencia de que al terminar la segunda ventana de recepción se quedan continuamente “escuchando” para recibir paquetes en cualquier momento, hasta que el dispositivo vuelva a transmitir un paquete. Esto supone un consumo energético bastante superior y está pensado para dispositivos con alimentación directa a red eléctrica.

Por otra parte, la topología LoRaWAN precisa de la activación de los dispositivos en la red. Se trata de registrar los dispositivos en la red previo al envío y recepción de mensajes. Existen dos métodos distintos para realizar el procedimiento. Por un lado, existe el método **ABP** (*Activation By Personalization*) en el que se programa la dirección del dispositivo y la clave de seguridad en el dispositivo. Para realizar un cambio de clave o de dirección es necesario volver a reprogramar el dispositivo, pero no requiere de intercambiar mensajes con el servidor para la activación. Por el otro lado, encontramos el método recomendado y más seguro denominado **OTAA** (*Over-The-Air-Activation*). Este método requiere del proceso *JOIN* con el servidor en el que se le asigna una dirección dinámica al dispositivo y negocian las claves de seguridad. El proceso *JOIN* es ligeramente diferente en la versión LoRaWAN 1.0.x y la versión 1.1. [31] [35]

En la primera, tanto el dispositivo final como el servidor de red deben poseer la clave **AppKey**, que es la clave raíz de tipo AES-128. Esta clave no se envía en ningún momento por seguridad, por tanto, si se quiere modificar también exigiría grabarla en el dispositivo. El proceso *JOIN* lo comienza el *end-device* enviando un mensaje de tipo *Join-request* (sin cifrar). El *network server* recibe el mensaje, y, en caso de que reconozca como válido el dispositivo, genera dos claves de sesión (**NwkSKey** y **AppSKey**) y le envía el mensaje *Join-accept* para indicarle que ha sido activado. El dispositivo descifra el mensaje con la clave *AppKey* y deduce las claves de sesión usando la clave *AppKey* y el campo *AppNonce* del mensaje. Además, mediante ese mensaje le indica al dispositivo su dirección o *device address*. El servidor de red, seguidamente de generar las claves de sesión, guarda la clave de sesión de red (*NwkSKey*) y distribuye la clave de sesión de aplicación al servidor de aplicación. A partir de ese momento, el dispositivo tiene la potestad de enviar mensajes a la red LoRaWAN de manera segura, pudiendo verificarse la integridad del mensaje en el servidor de red usando la clave *NwkSKey* y el campo MIC (Message Integrity Code), y, además, cifrando el contenido del mensaje para la aplicación (conocido como payload) con la clave *AppSKey* que únicamente poseerá el servidor de aplicación correspondiente. [31] [35]

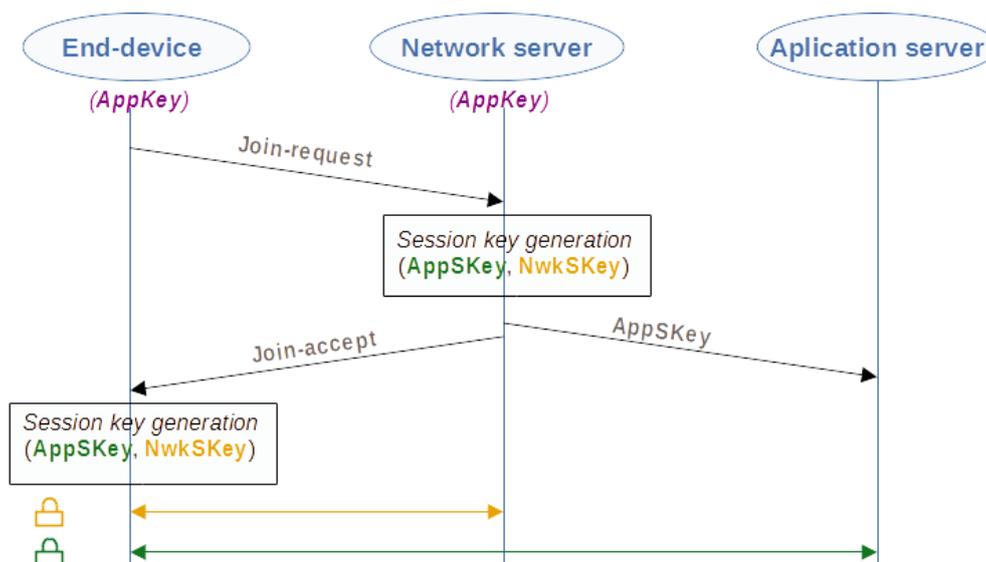


Figura 9. Esquema proceso *JOIN* para activación OTAA y cifrado en LoRaWAN 1.0.x.

En el caso de LoRaWAN 1.1, el proceso de *JOIN* es similar, aunque se añaden más mecanismos de protección y el que se encarga de llevar el proceso pasa de ser el servidor de red al servidor de *JOIN*.

En cuanto al aspecto de seguridad, ha de ser mencionado que la capa física de por sí no implementa ningún tipo de seguridad de datos, es el estándar LoRaWAN quien implementa los tres sentidos de la seguridad: autenticidad, integridad y confidencialidad. Autenticidad significa que se sabe con certeza con qué dispositivo se está comunicando, como anteriormente se ha explicado en los métodos de validación de dispositivos. Integridad significa que la información recibida por un dispositivo no ha sido modificada por un tercero, y para ello, existe el campo MIC y la clave *NwkSKey*. Finalmente,

confidencialidad significa que un tercero tampoco puede obtener la información transmitida, porque se transporta cifrada. [31] [35]

Otro mecanismo que provee LoRaWAN es el envío de datos redundantes con el objetivo de detectar y corregir errores en la transmisión de un mensaje, ya que una interferencia podría corromper algún bit. A este proceso se le denomina *Forward Error Correction* (FEC) y el parámetro principal es el **Code Rate** o tasa de codificación, que define la proporción de bits de información respecto al total con los bits de corrección. Existen cuatro valores posibles en LoRaWAN 4/5, 4/6, 5/7 y 4/8. El valor típico es 4/5 y significa que de cada 5 bits uno es de corrección y cuatro de información. Cuanto menor sea el Code Rate significa más inmunidad frente a errores, pero a costa de reducir la tasa de envío o consumir más recursos para enviar misma información. [31] [35]

3.4. Transmisión inalámbrica de potencia

Otra de las tecnologías implementadas en este proyecto es la transmisión inalámbrica de potencia, o en inglés *Wireless Power Transfer* (WPT), que tal y como su propio nombre indica, se trata de transmitir energía eléctrica de una fuente de alimentación (transmisor) a una carga de consumo (receptor) sin la necesidad de una conexión física, es decir, de forma inalámbrica.

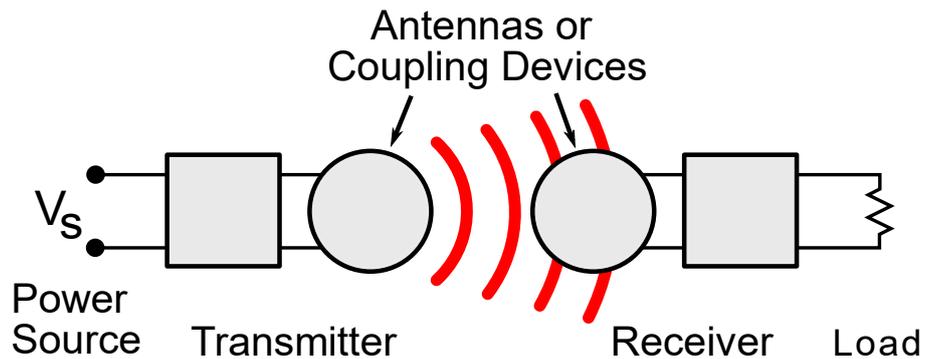


Figura 10. Esquema conceptual del fundamento WPT.

A pesar de que actualmente sea una tecnología en desarrollo y exista la percepción de ser algo nuevo, lo cierto es que en el siglo XIX ya se establecieron los fundamentos teóricos necesarios para su desarrollo, e incluso el propio Nikola Tesla realizó demostraciones tales como encender una bombilla a corta distancia, demostrando así el potencial de esta tecnología y estableciendo las bases que se usan hoy en día. [37]

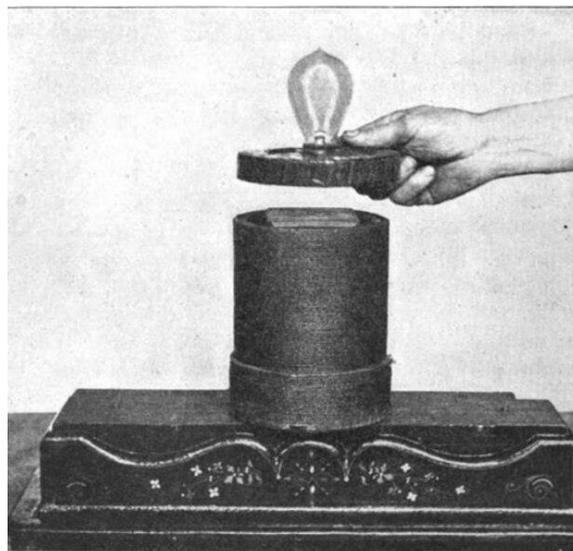


Figura 11. Demostración de una bombilla incandescente alimentada inalámbricamente por inducción electromagnética en 1910. [37]

Actualmente, existen diversas técnicas mediante las que se puede realizar la transferencia de potencia inalámbrica. Se pueden categorizar principalmente en dos grupos, técnicas no radiativas o de campo cercano y técnicas radiativas o de campo lejano. [38] [39]

En cuanto a las técnicas no radiativas, la energía se transfiere a corta o media distancia mediante campos magnéticos en los que la energía permanece a corta distancia del transmisor y si no existe receptor u objeto que absorba esa energía, permanece en el transmisor. Se puede llevar a cabo de las siguientes formas: [39]

- **Acoplamiento inductivo:** Es una de las técnicas más comunes y se basa en el acoplamiento magnético entre dos bobinas al aproximarlas. La bobina transmisora genera un campo magnético a su alrededor, y al colocar una bobina (la receptora) en dicho campo, induce una corriente dotando a la bobina receptora de energía. Para una transferencia de energía lo más eficiente posible las bobinas deben colocarse muy cercanas. Comúnmente, se utilizan núcleos de ferrita debajo de la bobina transmisora y encima de la bobina receptora, ya que, ayudan al confinamiento del flujo magnético mejorando el acoplamiento y reduciendo la interferencia, aunque son pesados, voluminosos y frágiles.
- **Acoplamiento inductivo resonante:** Es una variante de la anterior, con la ventaja de una considerable mejora de la eficiencia y el alcance. Lo descubrió Nikola Tesla a principios del siglo XIX, pero ha sido desarrollado en los últimos 15 años. Se trata de ajustar la frecuencia de ambas bobinas para que coincidan con la frecuencia de resonancia aumentando así el acoplamiento y la transferencia de potencia. De esta forma interactúan entre sí con mayor fortaleza que con los objetos no resonantes, y, por tanto, la pérdida por absorción de objetos cercanos es insignificante. Además, permite lograr una alta eficiencia en rangos de 4-10 veces el diámetro de la bobina, que puede considerarse como rango medio, frente al rango corto del acoplamiento no resonante (distancia menor al diámetro de la bobina). Es el método que en general se usa y existen algunos protocolos para favorecer la interconexión de diferentes elementos. El estándar más expandido es el Qi (pronunciado “chi”) desarrollado por el *Wireless Power Consortium* (WPC) en 2009 (el estándar de baja potencia, 0-5W). Posteriormente desarrollaron los estándares de media potencia (<120W, 2011) y alta potencia (<1kW, 2015). Incluso la empresa Apple, destacada por tener soluciones propietarias, decidió incorporar este estándar. Otro estándar mencionable es PMA (*Power Matters Alliance*), que tuvo su popularidad. No obstante, se ha visto superado por Qi de manera notoria. [38]

Algunos de los usos comunes de esta tecnología se dan en dispositivos diseñados para entornos húmedos, con el fin de reducir el riesgo de descarga eléctrica (cepillos de dientes eléctricos, máquinas de afeitar...). Otro uso interesante es el de carga de dispositivos protésicos biomédicos implantados en el cuerpo, donde antiguamente era necesario realizar una pequeña cirugía cada cierto periodo (años) para reemplazar la batería. Asimismo, su uso se ha

extendido masivamente para la carga de dispositivos móviles como *smartphones*, *tablets*, portátiles o reproductores, mediante unas placas o almohadillas sobre las que simplemente se ha de posar el dispositivo que se quiere cargar, resultando muy cómodo para los usuarios. También puede tener otras aplicaciones como carga de vehículos o tarjetas inteligentes.

- **Acoplamiento capacitivo:** Esta técnica utiliza campos eléctricos para la transmisión de energía. En vez de bobinas se utilizan electrodos tales como placas metálicas, que puestos uno frente al otro y con el aire en medio a modo de dieléctrico forman un condensador con cierta capacitancia. De esta forma, al aplicar una tensión en el electrodo del transmisor, se genera un campo eléctrico al electrodo receptor induciéndole una corriente y por tanto transfiriendo energía. Igualmente, la proximidad entre los elementos es necesaria para lograr una transferencia eficiente. Este método es menos utilizado y para aplicaciones de baja potencia, dado que para transmitir una potencia significativa se necesita voltajes altos y puede causar efectos adversos.
- **Acoplamiento magnetodinámico:** La técnica trata de girar síncronamente dos armaduras (transmisor y receptor) con imanes, donde el transmisor es girado por un motor y el campo que genera hace girar a la armadura receptora, que a su vez gira un generador que convierte el movimiento en energía. Esta solución se planteó como una alternativa al acoplamiento inductivo para la carga sin contacto de vehículos eléctricos donde el transmisor puede colocarse en el suelo del garaje y tan sólo aparcando (correctamente) se cargue el vehículo. De hecho, se puede lograr una distancia entre transmisor y receptor de 10 a 15 cm con una eficiencia de hasta el 90%.

Por otro lado, las técnicas radiativas o de campo lejano realizan la transferencia de energía usando haces de radiación electromagnética, logrando así distancias más largas. En este caso, es importante dirigir la radiación al receptor, aunque, la directividad tiene el límite físico de la difracción. Las aplicaciones propuestas discurren desde carga de dispositivos portátiles, hasta la carga de aeronaves y satélites. En general se usan dos tipos de radiaciones: Microondas y láser. El principal problema de las microondas es la necesidad de unas antenas de extensiones kilométricas para una transmisión de larga distancia y potencia considerable. La transferencia de energía por haces de luz mediante láser tiene ventajas en cuanto a no generar interferencias en comunicaciones radio. No obstante, es peligroso para los seres vivos y la conversión entre luz y energía es muy poco eficiente. [39]

Por tanto, se concluye que existe un desarrollo bastante maduro en cuanto a la transferencia inalámbrica de energía en cortas distancias, con soluciones comerciales al alcance de la mayoría de la población. En contraste la transmisión de energía de larga distancia todavía tiene camino que recorrer, teniendo como retos principales la eficiencia, la seguridad y las interferencias.

3.5. Diseño de dispositivos electrónicos

En este subapartado se explica, a grandes rasgos, algunas de las tecnologías de interés a la hora de diseñar y fabricar dispositivos electrónicos. A pesar de existir una inmensa cantidad de dispositivos electrónicos en el mercado, se siguen diseñando nuevos dispositivos para poder ajustarlos a las necesidades concretas que puede tener un proyecto u otro. La ventaja hoy en día es la facilidad y el bajo coste que tiene realizar un diseño gracias a los avances electrónicos producidos en las últimas décadas.

Inicialmente, se ha de hacer un estudio riguroso de los objetivos a conseguir y posteriormente una definición concreta del dispositivo a diseñar. Los principales aspectos para tener en cuenta a la hora de realizar la definición son:

- Consumo eléctrico
- Funcionalidades
- Coste monetario
- Condiciones del entorno de uso

En función del resultado del estudio de las anteriores variables, **se evalúa la viabilidad del diseño**, dado que es posible que el coste que tenga algún componente para alguna funcionalidad sea exageradamente alto, o que simplemente, cierta tecnología no esté al alcance.

Una vez dado el visto bueno a la viabilidad del producto, se comienza a trabajar en el diseño del propio dispositivo teniendo en cuenta los puntos anteriores. Típicamente, se utilizan módulos o *microchips* que incorporan las funcionalidades básicas requeridas y un microcontrolador como unidad central del dispositivo que se encarga de controlar los demás módulos. Asimismo, es necesario estudiar la interconectividad entre los diferentes elementos (tipos de interfaces de comunicación y voltajes de operación), a veces es necesario realizar alguna adaptación de voltajes o introducir otro *chip* que realice la “traducción” o el interfaz. Por otra parte, se ha de tener en cuenta la alimentación eléctrica de cada componente, ya que, es posible que tengan distintos requerimientos (voltaje, corriente, picos...). Con todo ello, se realiza un esquema lógico denominado **esquemático** o **esquema eléctrico**, donde se reflejan todos los elementos del diseño y las conexiones entre ellos.

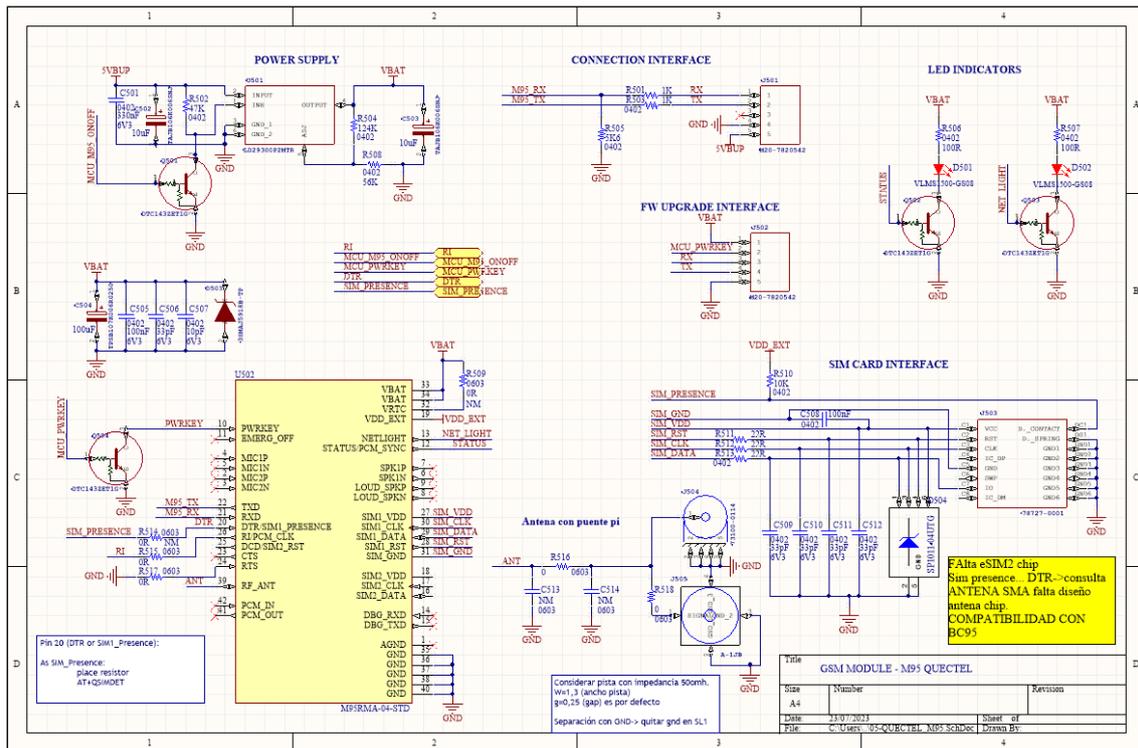


Figura 12. Ejemplo de un esquemático.

Posteriormente, se adquieren los componentes del diseño para **realizar un pequeño montaje demostrativo**, a modo de prueba inicial, y comprobar que no existen errores o corregirlos. A menudo es difícil obtener un montaje igual que el diseñado, bien por ser elementos que requieran una soldadura avanzada, o bien por tener largos plazos de entrega. Afortunadamente, muchos *chips* disponen de placas de evaluación que permiten realizar montajes de pruebas y test, aunque, es remarcable que estas placas suelen tener un precio excesivo en comparación con el precio del *chip* en cuestión (incluso 20 veces más caro).

El montaje realizado puede contener muchos parásitos capacitivos e inductivos, además de ocupar un tamaño considerable y de tener elementos medio sueltos. Es por ello que el siguiente paso **es diseñar una tarjeta de circuito impreso (PCB)**. Se trata de una tarjeta en la que todos los componentes van soldados y donde las conexiones entre los diferentes elementos se realizan mediante pistas de cobre de capas interiores de la propia tarjeta. Puede ser más o menos sencilla en función del número de capas de cobre, número de componentes y tamaño de la tarjeta. Lo cierto es que se puede obtener un dispositivo bastante compacto. El proceso de diseño de la PCB implica recoger todo lo que figura en el esquemático y plasmarlo en una tarjeta y sus capas. Es decir, colocar los componentes en la(s) capa(s) superficial(es) (o más bien las conexiones donde se soldarán), y, por otro lado, en las capas de cobre intermedias dibujar las pistas o conexiones.

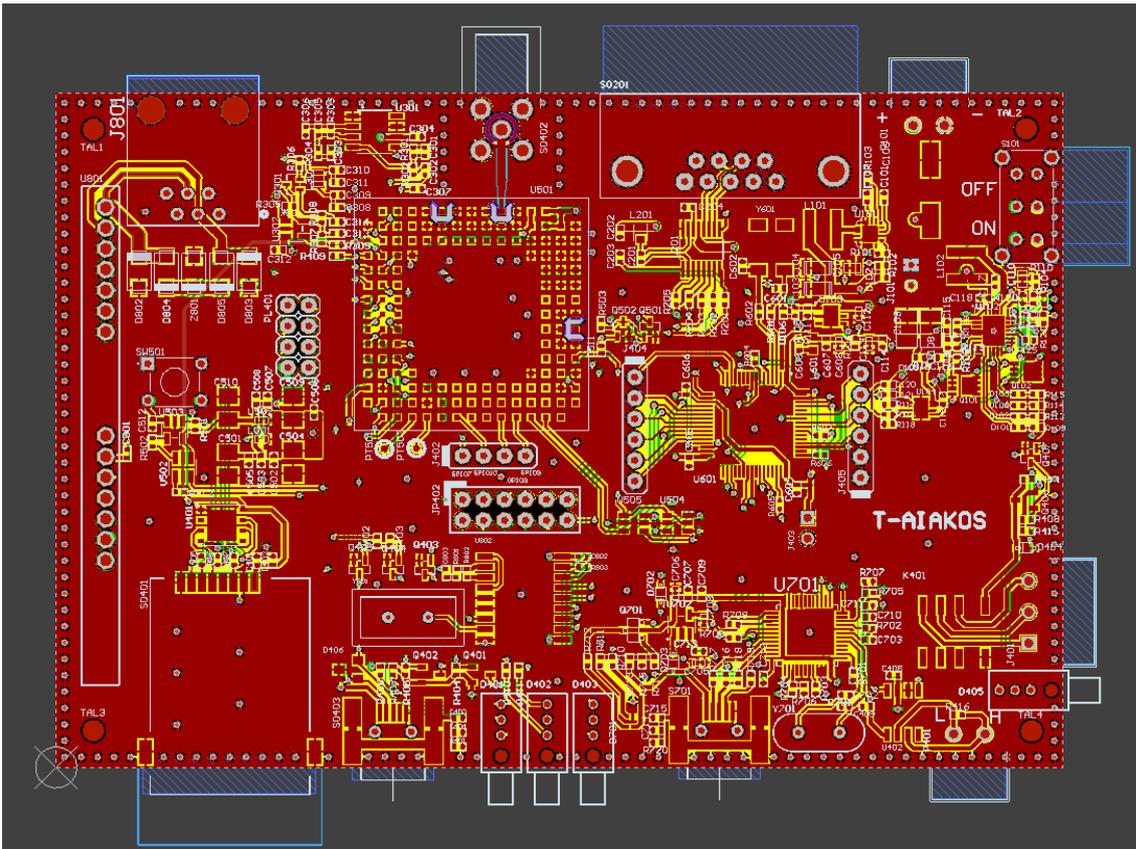


Figura 13. Ejemplo diseño PCB.

Tras diseñar la PCB y hacer un exhaustivo trabajo de revisión, es el momento de enviarla a fabricar. Siempre es conveniente hacer una pre-serie para confirmar el funcionamiento correcto y detectar posibles errores, para poder corregirlos antes de fabricar una serie más larga. El coste de fabricación de una PCB es bastante bajo comparando con el diseño y fabricación de un circuito integrado. Resulta bastante más complicado el diseño de circuitos integrados donde se trabaja a nivel muy bajo de componentes, y por tanto un diseño suele costar más tiempo que el diseño de una PCB. Además, el coste de fabricación también es elevado, a no ser que sea para millones de unidades, donde el precio por unidad se reduce. Por esas razones para diseñar un dispositivo electrónico se suele optar por diseñar una PCB haciendo uso de integrados genéricos que realizan ciertas funciones que son válidas para muchas aplicaciones.

3.6. SERVIDOR WEB EN LA NUBE Y ESTRUCTURA MEAN

Los servidores web son una parte esencial de la mayoría de las aplicaciones donde se requiere conectividad y accesibilidad en cualquier momento y lugar. Los servidores web son un elemento esencial de la infraestructura de internet y sencillamente se trata de un equipo (o varios) conectado a la red de internet que se encarga de gestionar las solicitudes y respuestas de los clientes que acudan a él. [17]

Actualmente, en lugar de tener una instalación propia de servidores físicos, es habitual contratar los servicios de infraestructura mediante servicios en la nube. Esto supone olvidarse de tener que mantener la infraestructura física para poder brindar un servicio que esté en funcionamiento siempre. Estos proveedores se encargan de dar ese servicio mediante diferentes infraestructuras propias, a menudo haciendo uso de centros de datos donde se alojan multitud de servidores web y disponen de mecanismos de seguridad, optimización y réplicas para que todo funcione a la perfección. Esto es posible gracias a la virtualización, ya que, permite tener diferentes servidores lógicos compartiendo un mismo hardware, aunque también se pueden tener servidores con hardware dedicados (lógicamente más caros). Otra de las ventajas es la escalabilidad que ofrecen estos servicios, que permiten aumentar tamaño de disco, memoria *ram*, procesadores... rápidamente y sin costosas migraciones. Esto permite comenzar con un pequeño servidor y a medida que se requiera más capacidad poder adquirirla de forma sencilla. [40]

Además de la parte física, el servidor necesita de un software que se encargue de la lógica de la aplicación, es decir, que realmente se encargue de aceptar/denegar las solicitudes, procesarlas, almacenar datos etc. Una posible solución que ha ido tomando popularidad en la última década es la estructura MEAN. La estructura MEAN es un acrónimo que describe una pila de tecnologías software para el desarrollo de aplicaciones web (MEAN: Mongo, Express, Angular, Node). Una de las ventajas de esta estructura es que utiliza el mismo lenguaje de programación en todas sus capas: JavaScript. Las tecnologías que incluye son las siguientes: [41]

- **MongoDB:** Es una base de datos NoSQL orientada a documentos y que almacena datos en formato JSON. A diferencia de una base de datos relacional SQL, no se basa en tablas y columnas sino en colecciones y documentos, resultando más versátil y moldeable. [42]
- **Express:** Se trata de un *framework* para Node.js, el más popular, para facilitar la creación de aplicaciones web en la parte servidor. Es de código abierto y se programa en JavaScript. [43]
- **AngularJS o Angular:** Es otro *framework* de código abierto para crear aplicaciones web de una sola página. Esta herramienta se enfoca en ejecutar la lógica en el cliente y generar la parte visual de la aplicación web. [44]

- **Node.js:** Es un entorno en tiempo de ejecución multiplataforma de código abierto. Básicamente es el servidor web que se encarga de ejecutar los procesos y sobre el que se sostienen Express y Angular. Está orientado a eventos asíncronos y pensado para hacer aplicaciones escalables. Existe un gestor de paquetes denominado NPM (*Node Packet Manager*) que ofrece acceso a multitud de paquetes y permite gestionarlos, agilizando así el desarrollo de aplicaciones. [45]

Partiendo del esquema MEAN, se dispone de las herramientas necesarias para el desarrollo de un aplicativo web de forma eficiente y reduciendo la complejidad del proceso de desarrollo. La aplicación generada, tiene la posibilidad de subirla y estar activa en la nube mediante algún proveedor de este tipo de servicio.

4. DISEÑO Y DESARROLLO DEL SISTEMA

En este apartado se presenta el sistema desarrollado y se describen de forma detallada todos los elementos que componen la solución final.

4.1. User-ED

El dispositivo denominado como User-ED o *user end-device*, es aquel diseñado para ser portado por los jugadores, con la finalidad de proveerles de la información de juego y poder hacer el seguimiento de su juego en vivo. El dispositivo está compuesto por varias partes fundamentales donde se aplica la teoría desarrollada anteriormente. Al ser un equipo portátil, se ha tenido en cuenta especialmente el consumo eléctrico y el tamaño. Como paso previo y con el objetivo de hacer pruebas de concepto y de funcionamiento del sistema, fueron llevadas a cabo una integración de placas de desarrollo comerciales con algunas de las partes vitales del dispositivo. Además, fueron realizados dos montajes diferentes, uno con un módulo xBee y otro con LoRa, con el fin de comprobar ambas redes de comunicaciones y decantarse por una de las dos.

4.1.1. Modelos integrados

Los montajes iniciales contaban con una serie de placas compatibles e interconectables entre sí para facilitar su montaje y puesta en marcha. Inicialmente, sólo contaban con la función de transmitir la geolocalización a través de la red de comunicaciones hasta un servidor central. Esta integración consta de cuatro elementos o placas de desarrollo:

- Microcontrolador (MCU)

El microcontrolador es la unidad principal de control, es decir, se encarga de gestionar los procesos del dispositivo. Para ello, dispone de interfaces de comunicación que le permiten interactuar con las demás placas, y de este modo, obtiene la información de la ubicación y la envía periódicamente a la red LoRaWAN. Para que el microcontrolador realice las instrucciones de interés se programa un *software* que posteriormente se compila y se graba en el chip. Este *software* se denomina *firmware*.

El microcontrolador seleccionado es el STM32L073RZ [46], que es de tipo ARM Cortex-M0+ diseñado para aplicaciones de bajo consumo con 192KBytes de memoria *flash*, 20KBytes de *RAM* y 64 pines, que se considera suficiente para el objetivo de uso. Además, y una de las razones por las que ha sido seleccionado, ST fabrica placas con este micro con el objetivo de hacer montajes de forma rápida para desarrollo y testeo, lo que permite acelerar la fase de prototipado el desarrollo de hardware. El modelo que contiene este microcontrolador es la placa NUCLEO-L073RZ [47], que es de la familia NUCLEO-64, con pines compatibles con Arduino Uno y *debugger/programador* ST-LINK integrado (parte superior). Este tipo de placas incorporan un botón configurable, un botón de *reset*, un cristal y un regulador de tensión entre otras cosas. Asimismo, ST Microelectronics fabrica otras placas o *shields* compatibles (conectándolos uno encima

de otro) para añadirle otras funcionalidades y probar otros circuitos integrados, como se muestra en los siguientes apartados de GNSS y LoRa.

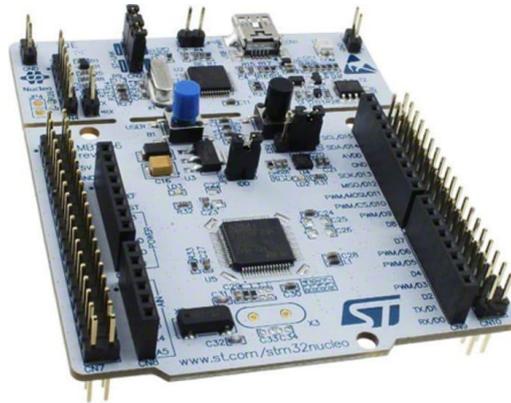


Figura 14. Imagen del modelo comercial NUCLEO-L073RZ

- GNSS

La geolocalización del dispositivo integrado es obtenida utilizando la placa de expansión para Núcleos STM32 denominada como X-NUCLEO-GNSS1A1 [48]. Esta placa contiene pines macho que permiten el conexionado directo con el NUCLEO-L073RZ, que interconectan los pines necesarios para su correcta integración (alimentación y señales de comunicación). La comunicación entre esta placa y el MCU es realizada mediante un interfaz I2C, haciendo uso del paquete software de expansión X-CUBE-GNSS1 proporcionado por ST para facilitar el control de esta placa con un microcontrolador de la familia STM32. Esta PCB contiene el módulo GNSS Teseo-LIV3F [49], que es el encargado de obtener la ubicación. Soporta la utilización de múltiples constelaciones (GPS/Galileo/Glonass/BeiDou/QZSS) de forma simultánea. Para recibir las señales es necesario conectar una antena externa a la placa mediante el conector SMA.



Figura 15. Vista superior de X-NUCLEO-GNSS1A1 y antena GNSS.

- Comunicaciones (LoRa o Zigbee)

Tal y como se ha expresado anteriormente, en lo que se refiere a la red de comunicaciones propia en el campo de golf, dos redes diferentes fueron probadas. Los dos modelos de dispositivos integrados únicamente difieren en esta placa física y en el software de controlador, ya que funcionan de forma diferente. En esta subsección se describen ambas placas.

Por un lado, para la red LoRaWAN se hace uso de la placa de ensayos de ST Microelectronics denominada I-NUCLEO-LRWAN1. Al igual que en el caso anterior, dispone de pines compatibles preparados para conectar encima de un NUCLEO-64. El componente principal (y de interés para la integración) es el módulo de comunicaciones USI WM-SG-SM-42 [50] [51], que es un conjunto de integrados (SEMTECH SX1272 *transceiver* y MCU STM32L0) para LPWAN inalámbricas, y en concreto, permite comunicarse con una red LoRaWAN en la frecuencia 868MHz. Dispone de un interfaz UART que admite comandos AT definidos en la documentación. Esta es la forma en el que el microcontrolador principal STM32L073RZ interactúa con esta placa para enviar la información de la ubicación al servidor LoRaWAN.



Figura 16. Placa I-NUCLEO-LRWAN1 y antena 868 MHz.

Por otro lado, para la red Zigbee de 2.4GHz se usan dispositivos XBee 3 Pro [52] de Digi. Sin embargo, estos pequeños módulos no son compatibles por sí solos con el NUCLEO-L073, para ello existen placas de expansión que sirven para interconectar ambos. En este caso, se ha usado la placa Gravity V7.1 de DFRobot, que permite interconectar el módulo XBee con el núcleo. Por otro lado, Digi proporciona una herramienta de configuración de dispositivos XBee llamada XCTU [53]. Este programa permite configurar los parámetros de los dispositivos y permite realizar pruebas de funcionamiento. Para los integrados User-ED se configuran con el modo de funcionamiento de dispositivos finales (ZED).

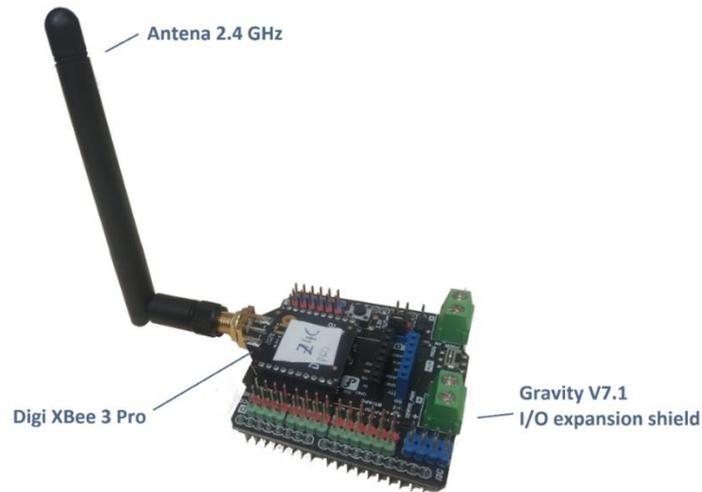


Figura 17. Montaje para las comunicaciones Zigbee del integrado.

- Placa de alimentación con batería

El integrado debe ser móvil para utilizarlo en el campo de golf, por eso se añadió esta placa que proporciona un sistema de alimentación con batería. En este caso se trata de un circuito impreso desarrollado por el equipo de I+D de Tafco (entre ellos el autor de este trabajo) y fabricado para otro proyecto. De forma resumida, ya que no es el objetivo de este estudio, la fabricación está compuesta por el integrado LTC4040 que se encarga de gestionar una batería de química Li-Ion y permite recargarla con una entrada de $5V_{DC}$. Además, proporciona una salida estable de $5V_{DC}$ y una corriente máxima de 2.5A siempre que esté conectado a una fuente externa o que la batería tenga carga. Una de las características principales por las que se usa esta placa es porque dispone de dos conectores *ST morpho* dispuestos para conectar cualquier NUCLEO-64 de ST. También cuenta con la posibilidad (colocando un *jumper*) de ser alimentado directamente a través del pin E5V con el que cuentan estas *protoboards* de ST y que permite su alimentación externa con los $5V_{DC}$ proporcionados por el LTC4040.

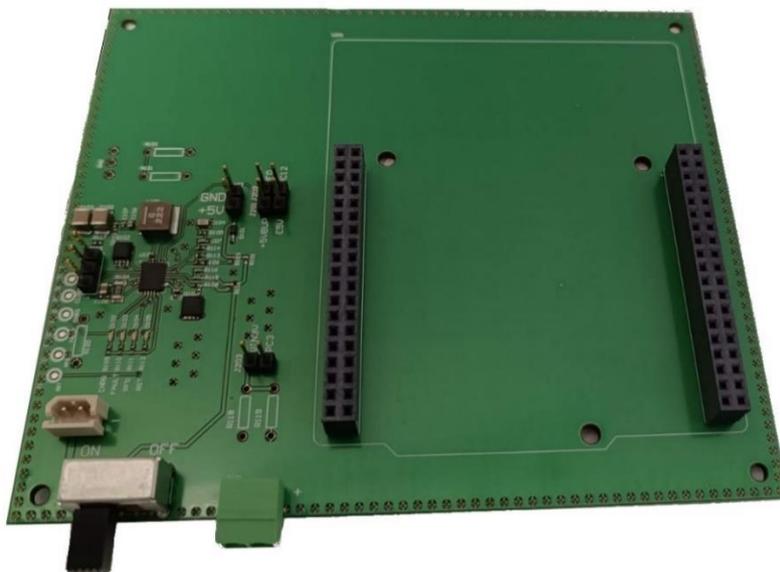


Figura 18. PCB para alimentación con batería de Tafco Metawireless

Cabe señalar que para las pruebas iniciales las opciones de añadir carga inalámbrica, medición de carga de batería y la interacción con el usuario (pantalla y botones) fueron descartadas, ya que el objetivo era hacer una prueba de despliegue de dispositivos de forma rápida y, sobre todo, poder probar el sistema de comunicaciones LoRaWAN y Zigbee. Además, incluir estos elementos dificultaba la integración de este primer dispositivo.

Una vez adquiridas todas las placas, se conectan mediante los sockets dispuestos para este fin y se obtienen los dos dispositivos integrados para las pruebas iniciales. La integración no supone problema alguno, ya que las diferentes partes son compatibles en cuanto a pines y a interfaces. Todas las placas se alimentan a través de la PCB de alimentación y las comunicaciones entre el MCU principal y los demás circuitos integrados se efectúan usando diferentes interfaces que no se solapan ni se interfieren. Los dispositivos iniciales toman la siguiente forma:

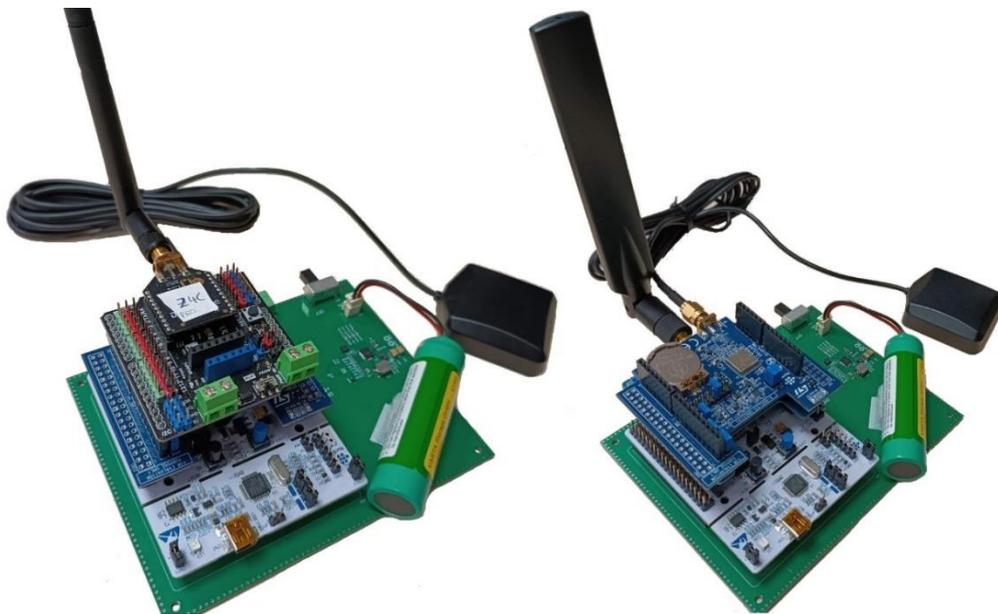


Figura 19. Dispositivos integrados: A la izquierda dispositivo Zigbee y a la derecha dispositivo LoRaWAN.

4.1.2. Fabricación prototipo

Una vez comprobado el correcto funcionamiento de los dispositivos integrados, se decidió fabricar un dispositivo propio como prototipo, previo a un producto comercializable. Por un lado, se diseña y se fabrica una placa de circuito impreso, la cual contiene todos los componentes necesarios interconectados por pistas internas, exceptuando la pantalla, que va separada como se explica posteriormente. Este prototipo, además de contar con las partes del dispositivo integrado, cuenta con otras funcionalidades importantes de cara a la comercialización del producto, que aportan

valor, sobre todo, desde el punto de vista del usuario final. Principalmente, se añaden interfaces para interactuar con el usuario (pantalla y botones), y toda la electrónica asociada a la carga inalámbrica de la batería. Todos estos componentes han sido probados en laboratorio y su compatibilidad con el resto del sistema ha sido testada.

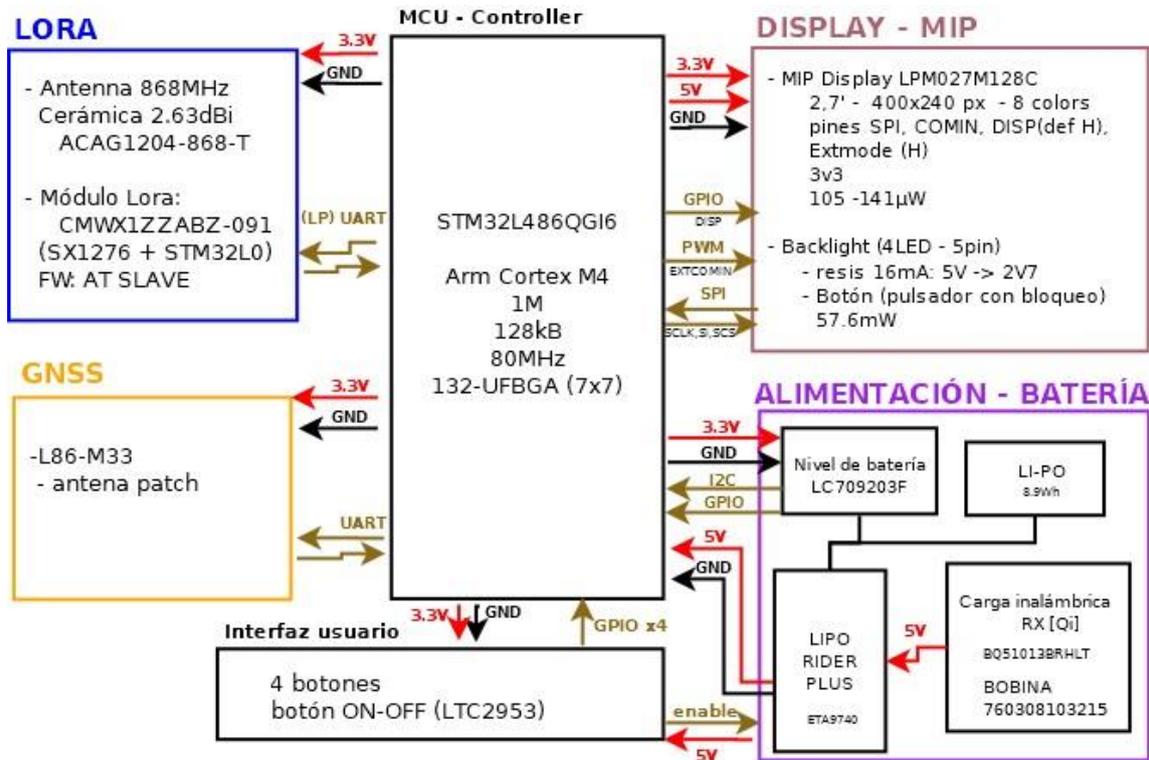


Figura 20. Esquema general de las partes del prototipo y sus conexiones.

Debido a que este diseño tenía múltiples puntos que no se podían comprobar hasta después de su fabricación, se decidió hacer una primera fabricación de 5 dispositivos para comprobar su funcionamiento y así poder tener margen de maniobra en caso de haber fallos para poder corregirlos antes de hacer una tirada más grande de dispositivos. De este modo, en caso de haber un fallo insalvable, lo que haría inutilizables todas las PCB, serían sólo cinco y no cuarenta los dispositivos desechados, permitiendo además la corrección de otros pequeños errores, al ser una fabricación un tanto arriesgada por su complejidad. De hecho, como se explica posteriormente, hubo un elemento que no funcionó y se pudieron buscar soluciones para la segunda fabricación. En las siguientes líneas, se exponen parte por parte los componentes incluidos en este dispositivo:

- Encendido/apagado de dispositivo

En el dispositivo integrado el dispositivo se enciende y se apaga con el switch que incluye la placa de alimentación. No obstante, para el producto final resulta más adecuado un botón que al presionarlo encienda el dispositivo y al mantenerlo pulsado lo apague, como lo hacen la gran mayoría de dispositivos con los que los usuarios están familiarizados, como, por ejemplo, los teléfonos móviles. Esto se logra gracias al integrado LTC2953CDD-1, que es un controlador de On/Off con un botón de tipo *push*.

Este *chip*, detecta la pulsación del botón y genera la señal “*enable*” de un *mosfet* que controla si el sistema se alimenta con $5V_{DC}$ o se queda en corte y, por tanto, apagado. Además, permite configurar el tiempo de pulsado para el apagado colocando un condensador, siendo 6.4 segundos por cada microfaradio (μF). En este caso se coloca un condensador de $0.68\mu F$ resultando un tiempo de 4.35 segundos de pulsado para el apagado, con el fin de tener margen suficiente y el dispositivo no se apague de forma involuntaria.

- Microcontrolador (MCU)

Como ya ha sido indicado anteriormente, más funcionalidades han sido incluidas, las cuales han de ser controladas por el microcontrolador. Además, es recomendable tener cierto margen en la capacidad del MCU para evitar que se sature o poder desarrollar más funcionalidades sin tener que volver a reemplazarlo (con más razón al tratarse de un prototipo). Por todo ello, se reemplaza el *chip* inicial (STM32L073RZ) por otro de la misma familia de bajo consumo, pero con mejores prestaciones, como lo es el STM32L486QG, con mayor capacidad de procesamiento y memoria y más interfaces de conectividad. A continuación, se muestra una tabla comparativa que muestra la mejora de prestaciones:

Característica	STM32L073RZT6	STM32L486QGI6
Núcleo	ARM Cortex M0+	ARM Cortex M4
RAM	20kB	128kB
Memoria flash	192kB	1MB
Freq. máxima reloj	32MHz	80 MHz
Pines GPIO	37	144
Timers	6	14
Empaquetado	LQFP-64	UFBGA-132

Tabla 4. Comparación microcontroladores.

Algunas de las características importantes son la memoria RAM y la Flash, dado que se valora poder utilizar la propia memoria del MCU, y de esta forma, no tener que poner otro integrado de memoria, para poder guardar e ir cargando los recursos gráficos a dibujar por pantalla.

- GNSS

En cuanto a la geolocalización, se opta por un módulo distinto al utilizado en la versión integrada (Teseo-LIV3F). Se trata del módulo QUECTEL M86-33 [54], que tiene la ventaja de incorporar una antena de tipo parche, colocada en la parte superior del módulo y también un amplificador de bajo ruido (LNA), así se logra tener un producto más compacto en tamaño y se reducen los costes. De cara a un producto comercial es importante el aspecto, y por eso se evita tener antenas externas además de buscar un tamaño manejable.

- Comunicación con *gateway* (LoRaWAN)

Tras las pruebas realizadas con los dispositivos integrados, se decide que resulta más adecuado utilizar una red LoRaWAN para la comunicación entre el nodo central y los nodos finales. A pesar de que las pruebas han demostrado el potencial de Zigbee en un entorno atípico como este, con una red LoRaWAN se puede cubrir la misma área con menos equipos intermedios (*gateways*). Esto es de suma importancia principalmente por tres razones: En primer lugar, los *gateways* que se han seleccionado son de alta gama y en general necesitaran estar preparados para funcionar a la intemperie y por tanto el precio es bastante alto, de modo que cuantos menos haya que poner más barata será la instalación. Por otro lado, el terreno de juego de este deporte es un entorno mayoritariamente verde, donde los jugadores se envuelven en la naturaleza, y colocar dispositivos intermedios en cada zona puede resultar molesto a los jugadores, aunque se pueden camuflar mejor cuantos menos hagan falta. Por último, desplegar los *routers* intermedios implica un aumento en el coste y la complejidad de la infraestructura, al tener que alimentarlos, ya sea llevando líneas de tensión a diferentes puntos del campo, o implementando un sistema de alimentación por placas solares.

En particular, en este diseño se añade el módulo de Murata CMWX1ZZABZ-091 [55]. El módulo es muy similar al usado en el integrado para las pruebas iniciales, el WM-SG-SM-42 de USI. Al igual que el USI, contiene un transceptor de Semtech, aunque es una versión superior, SX1276, que trabaja en un rango frecuencial mayor y haciendo uso de más canales. También tiene un microcontrolador de ST de bajo consumo de la familia STM32L0, que permite ser programado, y tanto Murata como ST proveen de un firmware para que funcione con comandos AT mediante un interfaz UART, como ya lo hacia la placa de pruebas, aunque mediante comandos diferentes.

Por otro lado, también es necesario añadir una antena de 868 MHz. Como se ha comentado previamente, se ha evitado la inclusión de una antena externa por motivos de ergonomía e imagen de producto, por lo que se elimina el SMA y si incluye una antena cerámica de tipo chip de colocación SMD, es decir, soldada en la superficie de la tarjeta PCB. El componente utilizado es la antena ACAG1204-868-T [56] del fabricante Abracon. Se trata de una antena omnidireccional válida para LoRa 868 MHz con una ganancia de 2.63dBi. Para su correcto funcionamiento se han seguido las recomendaciones de diseño PCB, un área libre de cobre y vías en los extremos para aislar de posibles interferencias. Además, se han añadido las huellas (*footprint*) necesarias para poder añadir tras la fabricación una red de adaptación de tipo PI (π). Sin embargo, no ha sido necesaria realizar la adaptación dado el correcto funcionamiento.

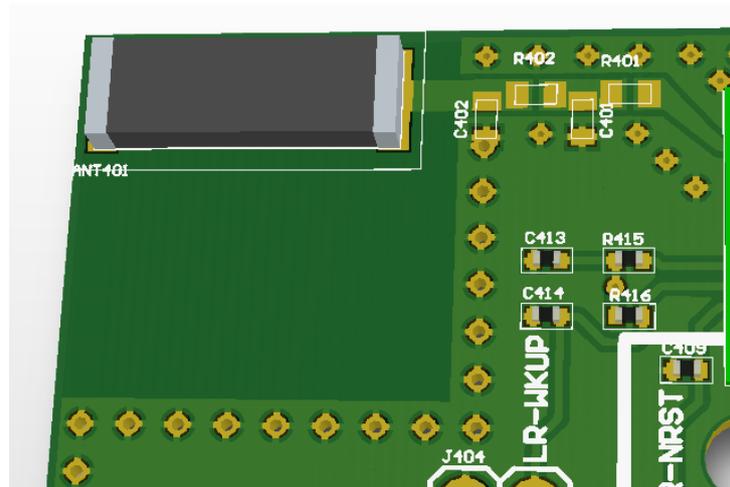


Figura 21. Vista 3D del diseño PCB para la antena cerámica. La superficie verde ligeramente más oscura indica el área sin cobre y los círculos de color ocre muestran las vías.

- *Display*

Respecto al *display* o pantalla, se ha optado por una pantalla LCD de tipo MIP, ya que, a diferencia del tipo convencional (LCD TN), nos brinda un bajo consumo y excelente legibilidad en entornos luminosos, como lo es un campo de golf. Esto se debe a que es una pantalla de tipo reflectiva, es decir, utiliza la luz ambiental para reflejar la imagen a mostrar en lugar de usar luz artificial. Sin embargo, estas pantallas suelen tener menor resolución y una gama de colores limitada o monocromática. Pese a estos inconvenientes, es ampliamente utilizada para dispositivos móviles que deben mostrar cierta información de forma clara y en ambientes luminosos, como por ejemplo relojes inteligentes (*smartwatch*), navegadores, libros electrónicos etcétera. [57]

El dispositivo User-ED incorpora la pantalla MIP LPM027M128C [58] de 8 colores con 240x400 píxeles y un tamaño de 2,7 pulgadas. El consumo eléctrico es realmente bajo, de 105 μ W en reposo y 141 μ W al refrescar la pantalla. Además, esta pantalla integra una luz de fondo (*backlight*) formado por 4 leds que permite iluminar la pantalla, resultando útil para espacios cerrados o con poca luminosidad. Esta situación se dará en ocasiones contadas para este dispositivo (por ejemplo, al recoger el dispositivo en la taquilla), y por ello, se ha añadido un botón que encienda esta luz a voluntad. Otra razón de peso para no encenderla de continuo es que esta luz consume 57.6mW que, en comparación con el consumo de la pantalla, es excesivamente alto para algo que en la mayoría del tiempo de uso es innecesario. Además, la pantalla incorpora un interfaz SPI y algún pin de entrada para su control. Para ello, se utiliza el microcontrolador principal conectado a esos pines y con la programación adicional llevada a cabo por el personal de Tafco. Para su conexión dispone de dos tiras FPC, una con la alimentación y los pines de la pantalla, y otra que da acceso a los leds del *backlight*.

Para conectar la pantalla y postrarla a la altura adecuada, se ha diseñado y fabricado una PCB, donde se conectan los latiguillos y además se añaden algunos componentes recomendados por el fabricante. Esta PCB también tiene otro conector FPC para conectarla con la placa PCB principal que se situará debajo. La placa de circuito impreso

es de una sola capa (más simple y económica), donde los conectores y componentes se sitúan en la capa inferior y la pantalla se colocará adherida en la capa superior con la ayuda de las líneas dibujadas para su correcta colocación. La placa tiene un agujero en cada esquina con el objetivo de sujetarla a la caja.

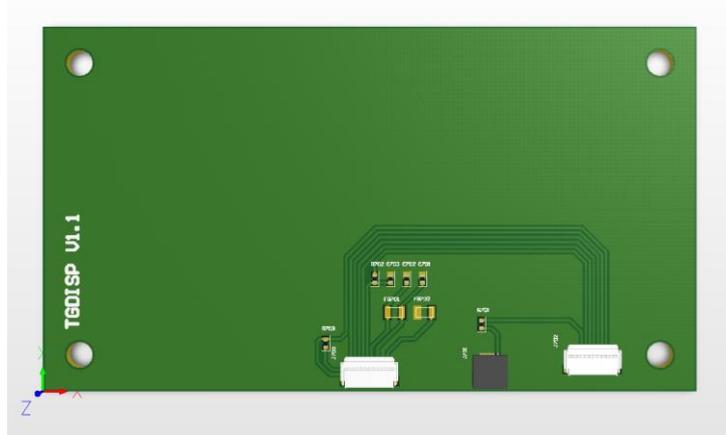


Figura 22. Capa inferior con sus componentes y conectores.

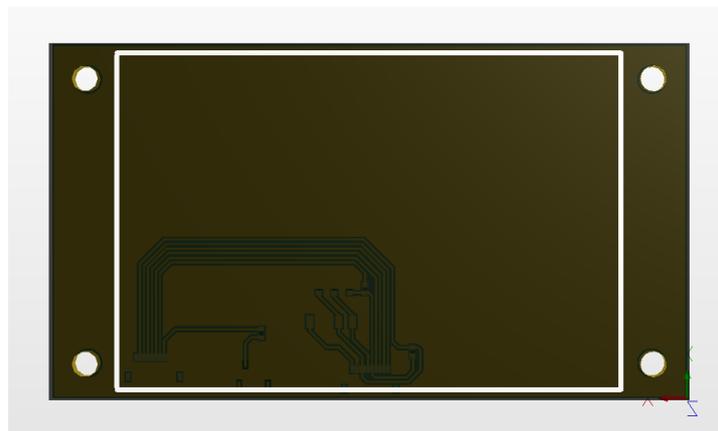


Figura 23. Capa superior con el dibujo de referencia para adherir la pantalla.

- Alimentación y carga inalámbrica

En cuanto a la alimentación del dispositivo, al ser un equipo portátil, contiene una batería de tipo Li-Po (litio polímero). La batería tiene una capacidad de 8.9Wh y un voltaje nominal de 3.7 voltios, suficiente para alimentar el dispositivo en funcionamiento más de 24 horas (teniendo en cuenta que una partida dura alrededor de 4-5 horas). La batería cuenta con tres pines (positivo, negativo y NTC) y un conector JST, y en la PCB se incluye un conector hembra para su fácil conexión y desconexión.

Asimismo, se incorpora un circuito integrado cuya finalidad es medir el estado de carga de la batería y mostrar esa información al usuario. El chip utilizado es el LC709203F [59] del fabricante Onsemi, recomendado para el uso en dispositivos portátiles por su bajo consumo (3uA en funcionamiento normal) y tamaño reducido. Este realiza el cálculo del RSOC (*Relative State Of Charge*) utilizando el algoritmo HG-CVR (medición híbrida por

seguimiento de corriente-voltaje con resistencia interna), que logra una precisión entorno al 3% del RSOC sin necesidad de resistencia externa de la batería y sin dependencia de la estabilidad de parámetros como la temperatura, la carga a la que esté conectada (load), la edad de la batería o el vaciado por desuso.

La batería mencionada ha de ser cargada y debe alimentar nuestro circuito de forma correcta para que no se dañe la batería y el circuito funcione adecuadamente. Para diseñar este control de carga y alimentación, la placa de desarrollo Lipo Rider Plus de SeedStudio [60] fue usada como referencia, que permite cargar una batería Li-Po con una entrada de $5V_{DC}$ (por tanto, nuestra entrada de transferencia de potencia inalámbrica debe ser de ese voltaje) y nos proporciona una salida estable de $5V_{DC}$ (gracias al *booster* que incluye). El voltaje de salida no depende del voltaje o nivel de carga de la batería, de este modo podemos alimentar toda la demás circuitería sin problema, siempre que la batería disponga de carga. Una vez comprobado el funcionamiento de la placa de desarrollo el diseño fue llevado a cabo. El principal componente es el integrado ETA9740, con capacidad de cargar la batería con una corriente de hasta 3A y de funcionar en modo *boost* con una salida de hasta 5V/2.4A. Tiene una eficiencia de alrededor del 96% y un indicador de carga de batería con salida para 4 leds.

En lo que respecta a la carga inalámbrica, el objetivo ha sido lograr añadir un sistema de carga estándar que permita cargarla en cualquier cargador inalámbrico universal, para facilitar la gestión de recogida y carga de dispositivos por el personal del campo en cuestión. Por esa razón, se incorpora en el dispositivo un receptor de carga inalámbrica que es compatible con el estándar Qi y, por tanto, compatible con la mayoría de los transmisores de carga inalámbrica de dispositivos. En un primer diseño se intentó implementar el receptor de carga inalámbrica de Semtech. La motivación de usar estos integrados surgió a partir de probar unos kits de evaluación (TSDMRX-5V10W-EVM) que demostraban su correcto funcionamiento, y las características que se necesitaban: una salida de $5V_{DC}$ adecuada para la carga de la batería y 10W de potencia para una carga estándar. Este receptor estaba formado principalmente por los chips TS51111-M22WCSR y SC424MLTRT, el primero encargado de recibir la potencia de la bobina y rectificar la señal y el segundo de coger esa señal y hacer una salida estable de $5V_{DC}$. No obstante, no llegó a funcionar, ya que Semtech descatalogó sus *chips* de carga inalámbrica y dejó de dar soporte, lo que impidió una investigación más exhaustiva. El diseño se realizó siguiendo el esquemático original de Semtech (a pesar de sólo proporcionar fotos de baja calidad), y tras comprobar que no entraban en funcionamiento, se revisaron detenidamente sin dar con la causa. Además, no se tuvo acceso a los *firmwares* de los propios *chips*, y no se pudo comprobar si los *chips* utilizados en la primera fabricación tenían el *firmware* correcto o no. Se contactó con el servicio técnico de Semtech, pero su respuesta fue que no ofrecían soporte porque habían retirado esa línea de productos.

Dadas las circunstancias, se dio por cerrada esa vía y otra solución fue investigada, algo que iba a ser positivo, y a largo plazo necesario, en caso de comercializar el producto, ya que, producir un producto con integrados descatalogados puede generar una situación de desabastecimiento a futuro. Así pues, el chip fue sustituido por el integrado

BQ51013BRHLT [61], que realiza todo el proceso en un único chip. Por tanto, el nuevo diseño consta de la bobina 760308103215 [62] de Würth Elektronik (la misma que fue usada en el diseño anterior) y el *chip* de Texas Instruments ya comentado junto con la electrónica común necesaria (condensadores y resistencias).

Para la segunda fabricación, se mantuvo el diseño de la PCB con la carga inalámbrica original de Semtech, sin embargo, los componentes no fueron montados. Con el fin de probar la nueva solución, el nuevo diseño fue implementado en una pequeña PCB. Esta PCB tiene las dimensiones y compatibilidad de pines para ser colocada sobre el primer diseño de Semtech, de tal forma que puedan ser soldadas en todas las placas. Una vez comprobado que el añadido funcionaba correctamente en uno de los dispositivos, la corrección fue añadida a todos los dispositivos fabricados. Por cuestiones de tiempos de fabricación y fechas de cierre del proyecto, no se pudo implementar la solución en la misma tarjeta PCB, aunque su inclusión está prevista en futuras evoluciones del producto. El resultado es el siguiente:



Figura 24. Montaje de placa auxiliar WPT sobre tarjeta PCB User-ED.

- Ensamblado final del prototipo

Por último, en este subapartado se describe el montaje final del dispositivo, incluyendo todas las piezas electrónicas y mecánicas. Las piezas mecánicas fueron diseñadas a medida por el equipo de diseñadas por el equipo de I+D de Tafco. A continuación, se listan todas las piezas que contiene el prototipo final:

- Placa PCB principal (TGED). Esta placa contiene los componentes electrónicos principales y sus dimensiones son de 140 x 70 mm.
- Placa auxiliar WPT. Esta es la pequeña placa que se añade con el segundo diseño de carga inalámbrica. Dimensiones: 31 x 26 mm.



Figura 25. Imagen superior de placa TGED y placa auxiliar WPT sobre ella.

- Bobina.



Figura 26. Bobina 760308103215 [62].

- TGDISP. Placa para la pantalla de dimensiones 80 x 45 mm.

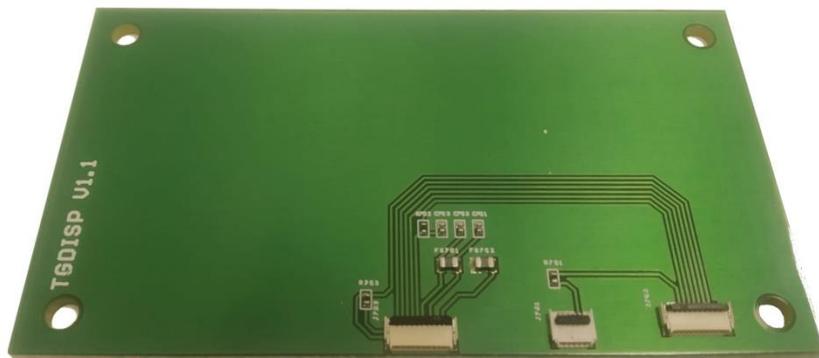


Figura 27. Tarjeta PCB auxiliar para la pantalla (TGDISP).

- Pantalla.



Figura 28. Pantalla LPM027M128C [58].

- Batería.



Figura 29. Batería Li-Po.

- Carcasa (piezas mecánicas):
 - Pieza inferior (base). Es la base sobre la que reposa el resto de los elementos. También, dispone de cuatro orificios para cerrar el dispositivo con tornillos uniéndola a la pieza superior.



Figura 30. Pieza inferior.

- Primera pieza separadora. Esta tiene forma de cruz y lleva por debajo la bobina (pegada) y por encima la batería. Su objetivo es separar ambos elementos y situar la bobina en el sitio adecuado.



Figura 31. Pieza separadora de bobina y batería.

- Piezas separadoras. Estas piezas se encargan de separar y crear un espacio de guarda entre la batería y la tarjeta PCB. Van situadas en los medio círculos de la base por encima de la batería.



Figura 32. Piezas separadoras de la batería y la tarjeta TGED.

- Pieza pantalla. El objetivo de esta pieza es sujetar la pantalla en una posición fija. Se coloca sobre las columnas de la pieza base por encima de la PCB TGED. La tarjeta TGDISP se coloca sobre esta pieza.



Figura 33. Pieza para soportar TGDISP y pantalla.

- Pieza superior (tapa). Esta pieza contiene los orificios para los pulsadores y la pantalla.



Figura 34. Pieza superior.



Figura 35. Resultado final del montaje del dispositivo User-ED.

4.1.3. Funcionamiento User-ED

Para finalizar la descripción del dispositivo User-ED de este proyecto, se expone el funcionamiento de este dispositivo. Como se ha explicado en el apartado anterior, el control del funcionamiento se realiza mediante un *software* grabado en el microcontrolador. Este *software* se encarga de llevar a cabo la partida entera con la interacción del jugador gracias a los botones y la pantalla.

Desde que se enciende el dispositivo hasta terminar la partida y apagarlo, el dispositivo va pasando de un estado a otro según la fase en la que se encuentre. Según la fase la pantalla muestra un mensaje u otro y los botones tienen una función u otra. A continuación, se describen dichas fases y se muestran las pantallas correspondientes a cada una:

Primeramente, al encender el dispositivo realiza la configuración inicial, necesaria para que funcione el chip GNSS y LoRa. En la pantalla se muestra el logo de la empresa Tafco durante dos segundos (Figura 36) y posteriormente se añade una barra que va rellenándose a medida que se configura (Figura 37). Cuando se ha configurado, el dispositivo queda a la espera de recibir un dato válido de ubicación GNSS (Figura 38). Posteriormente, el dispositivo está listo para comenzar una partida, y muestra la hora (en el centro), el estado de la batería y de la ubicación (esquina superior derecha) (Figura 39).



Figura 36. Pantalla logo Tafco.



Figura 37. Pantalla cargando.



Figura 38. Pantalla buscando gps.



Figura 39. Pantalla inicio.

Cuando el jugador pulse cualquier botón, el dispositivo muestra un mensaje de confirmación (para comenzar la partida) (Figura 40), preguntará si se quieren guardar los datos o no (Figura 41) y el color del tee de salida (Figura 42).

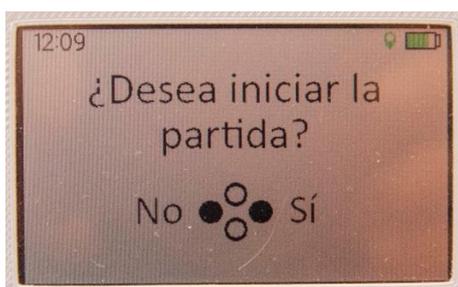


Figura 40. Pantalla confirmación inicio.

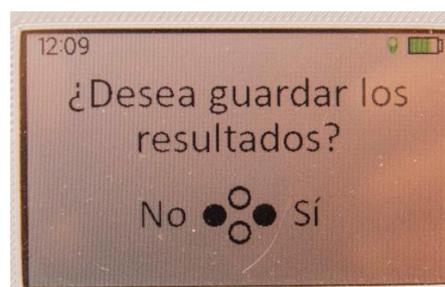


Figura 41. Pantalla de guardado de datos.

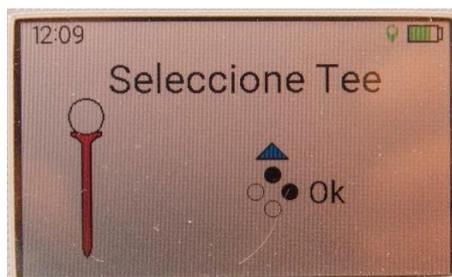


Figura 42. Pantalla selección de tee.

Una vez iniciado el juego, y mientras el jugador no se aproxime al *green* se muestran 3 pantallas (pulsando izquierda o derecha para saltar de una a otra). En una se muestra la forma del *green* y la distancia al centro, inicio y fin del *green* (Figura 43). La siguiente muestra el tiempo de juego y el número de kilómetros recorridos (Figura 44). En la última se muestra las puntuaciones anotadas (en caso de haberlas) (Figura 45).



Figura 43. Pantalla *green*.



Figura 44. Pantalla kilometraje y tiempo.



Figura 45. Pantalla revisión de puntuaciones.

Cuando el jugador se acerca al *green*, el dispositivo lo detecta automáticamente y, en caso de haber seleccionado la opción de guardar la puntuación, muestra una pantalla para que el jugador ingrese el número de golpes realizados en el hoyo (Figura 46). En caso de no seleccionar el guardado de puntuación muestra una pantalla de confirmación para que el jugador pulse al terminar el hoyo (Figura 47).



Figura 46. Pantalla inserción de golpes.

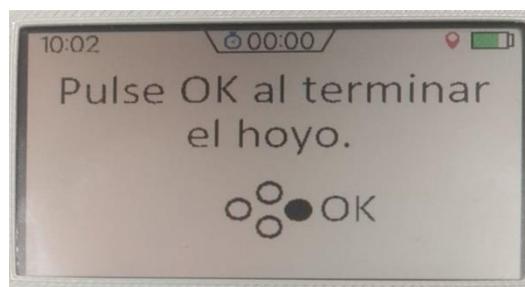


Figura 47. Pantalla fin de hoyo.

Al pulsar "Ok" el programa vuelve a mostrar las pantallas de *green* y tiempo mostradas anteriormente, hasta llegar nuevamente al siguiente hoyo, donde se volverá a mostrar la pantalla de puntuación o de confirmación de fin de hoyo. Este ciclo se repite hasta llegar al último hoyo, que tras finalizarlo el programa vuelve al estado inicial donde se muestra la hora y queda a la espera para volver a empezar una partida.

4.2. INFRAESTRUCTURA RED

En este apartado se describe la infraestructura de la red que es necesaria para interconectar los dispositivos User-ED con el servidor. Para ello es necesario desplegar una serie de equipos intermedios.

4.2.1. Infraestructura desplegada para la red Zigbee (2.4GHz)

En cuanto a la red Zigbee, se ha realizado una red con topología de tipo malla, utilizando la frecuencia 2.4 GHz. Para ello se han utilizado dos tipos de equipos diferentes además de los dispositivos. Por un lado, para abarcar el campo de golf se usan equipos repetidores denominados *routers* (ZR), que se encargan de recibir los mensajes y volver a transmitirlos en la red para extender su alcance. Por otro lado, como nodo principal gestor de la red se encuentra el coordinador (ZC). Además, el equipo utilizado como ZC también incorpora la función de *gateway*, haciendo de puerta de enlace entre la red Zigbee e internet. Por último, los dispositivos finales (ZED) descritos en la sección anterior (Modelos integrados). A continuación, se muestra un diagrama conceptual de la red formada:

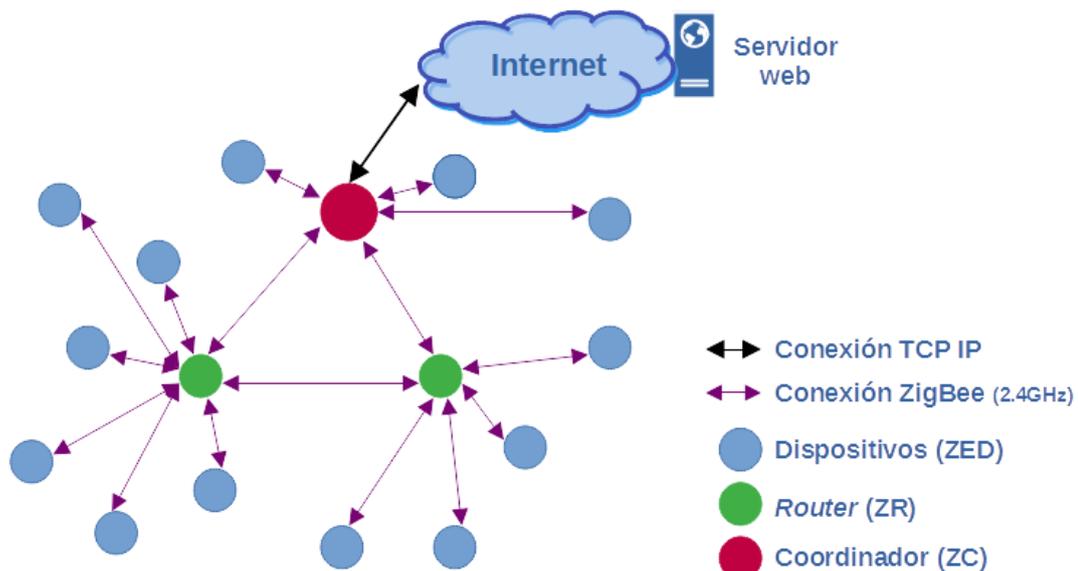


Figura 48. Esquema de la red Zigbee (2.4 GHz) desplegada en el proyecto.

Tal y como se ha comentado a modo de introducción, la red mallada es lo que permite proporcionar cobertura a áreas amplias como es el caso de los campos de golf. Los ZR son capaces de escuchar a los dispositivos y reenviar los mensajes al coordinador o a otro ZR que se encargue de volver a reenviarlo. En concreto, aunque posteriormente se explica, para la prueba de concepto de la red Zigbee fue necesario emplazar únicamente dos enrutadores. Para hacer más efectivos estos dispositivos, y, dado que van a situarse en puntos fijos, se utilizan antenas de mayor tamaño con mejores prestaciones. Se trata del modelo OMB.242.08F21 [63] de Taoglas, con ganancia de 8dBi, banda ISM 2.4 –

2.5 GHz, omnidireccional y diseñada para uso en exteriores. Se utilizan trípodes portátiles para colocar las antenas en perpendicular a la mayor altura posible durante las pruebas. Por otra parte, los módulos utilizados son [los mismos que los utilizados en los dispositivos finales](#) (XBee 3 Pro), aunque, en este caso, están programados como ZRs (se realiza con la herramienta mencionada anteriormente XCTU). Este módulo es alimentado usando el mismo montaje, conectando los siguientes elementos: XBee 3 Pro, placa Gravity V7.1, núcleo ST y placa de alimentación con batería. En este caso, el núcleo se carga con un *firmware* en blanco, dado que no debe hacer ninguna acción, el módulo XBee por sí sólo hace su función al haberlo configurado.



Figura 49. Fotos del montaje de un enrutador Zigbee, protegido por plástico para la lluvia, dado que el dispositivo no tiene ninguna protección.

Por otro lado, las redes ZigBee sólo cuentan con un nodo coordinador. El dispositivo utilizado es un equipo comercial denominado Digi ConnectPort X4H [64] con la misma antena OMB.242.08F21 utilizada en el ZR. Como se ha mencionado este equipo también incluye la funcionalidad de puerta de enlace para la comunicación entre la red Zigbee e internet. Se trata de un equipo diseñado para aplicaciones de exterior (cuenta con protección IP66 para condiciones extremas incluso de lluvia) y dispone de diferentes interfaces de comunicación:

- Interfaz 2.4 GHz: Contiene un conector SMA para conectar la antena y de esta forma poder interactuar con la red Zigbee.
- Interfaz red celular móvil: Permite la conexión a internet mediante red LTE CAT1 y HSPA+. Para ello se ha de insertar una tarjeta SIM y configurarla para su uso.
- Interfaz ethernet: Es una alternativa o respaldo para la conexión a internet. Contiene un conector RJ-45 hembra para poder conectarse a la red cableada.
- Otros interfaces: Dispone de otros interfaces, aunque no son de interés para el proyecto, entre otros, puestos serie (RS-232) y USB tipo A.



Figura 50. Equipo Digi ConnectPort X4H con cables ethernet (azul) y alimentación (negro).

En cuanto a la configuración, este equipo está pensado para ser conectado con la nube propietaria y de pago de Digi: Digi Remote Manager. Se trata de un panel de administración a donde se conecta el coordinador y donde se puede gestionar la red, ver estadísticas, generar alarmas... No obstante, para el proyecto se opta por recibir los mensajes en un servidor propio, donde se implementa la gestión de los paquetes de los dispositivos y las funcionalidades de T-Golf. El coordinador Digi ConnectPort X4H da la posibilidad de realizar programaciones propias en lenguaje Python. Asimismo, permite establecer una comunicación cliente TCP (también UDP) y mandar los datos recibidos de los dispositivos a un servidor TCP. Esta es la forma en la que se logra conectar la red Zigbee con el servidor T-Golf.

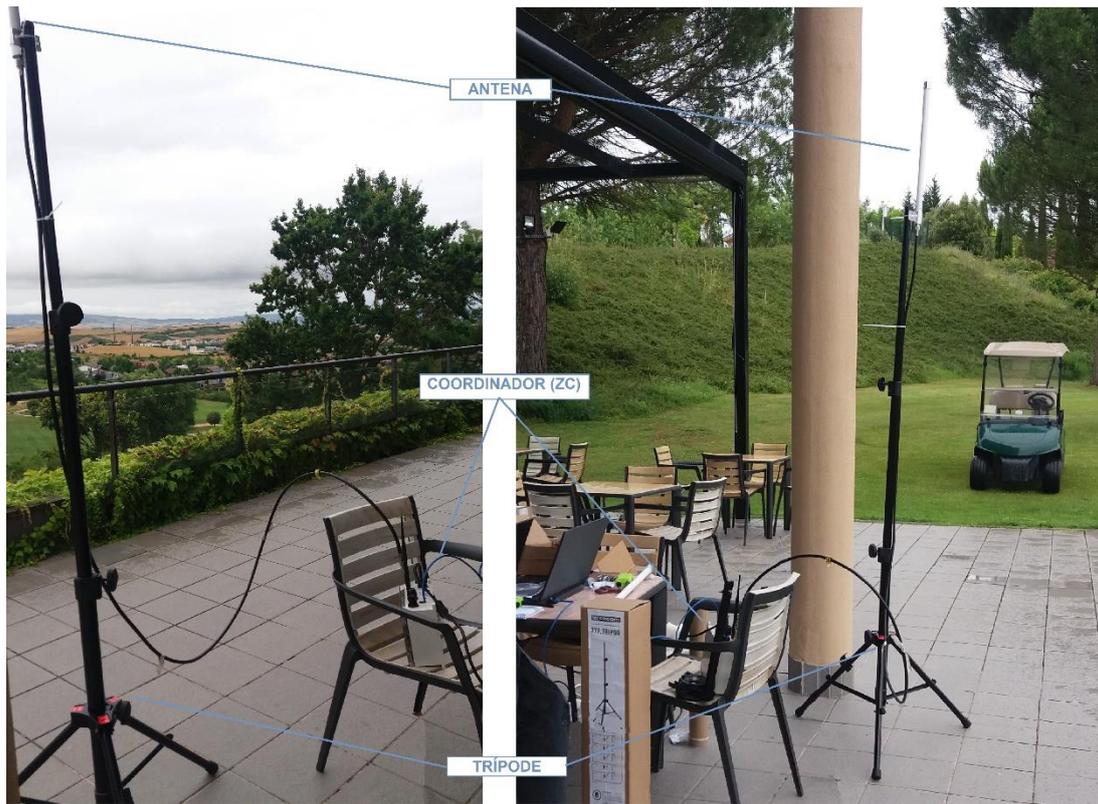


Figura 51. Dos fotos con diferente perspectiva del montaje del coordinador Zigbee.

4.2.2. Infraestructura desplegada para la red LoRaWAN (868 MHz)

La red LoRaWAN, no dispone de repetidores, la arquitectura de red resuelve el problema de cobertura poniendo puertas de enlace en diferentes puntos. Además, la comunicación es de larga distancia, por lo que, a excepción de topologías de campo complejas, el número de *gateways* no será muy elevado. Estos equipos se pueden poner en diferentes puntos y de esta forma los mensajes de los dispositivos se envían al servidor directamente desde cada uno que haya recibido el mensaje. Incluso puede darse el caso de que un mismo mensaje llegue a más de un *gateway* y estos lo envíen al servidor, no obstante, el protocolo LoRaWAN es capaz de identificar que se trata del mismo mensaje e indicar al usuario, si es de su interés, que el mismo paquete ha llegado por duplicado. Los equipos utilizados en este proyecto son equipos comerciales que están diseñados específicamente para hacer la función de puerta de enlace en una red LoRaWAN. Por tanto, la única labor que se ha realizado en este apartado ha sido la de seleccionar los equipos, y configurarlos adecuadamente para que desempeñen la labor deseada en el sistema desarrollado.

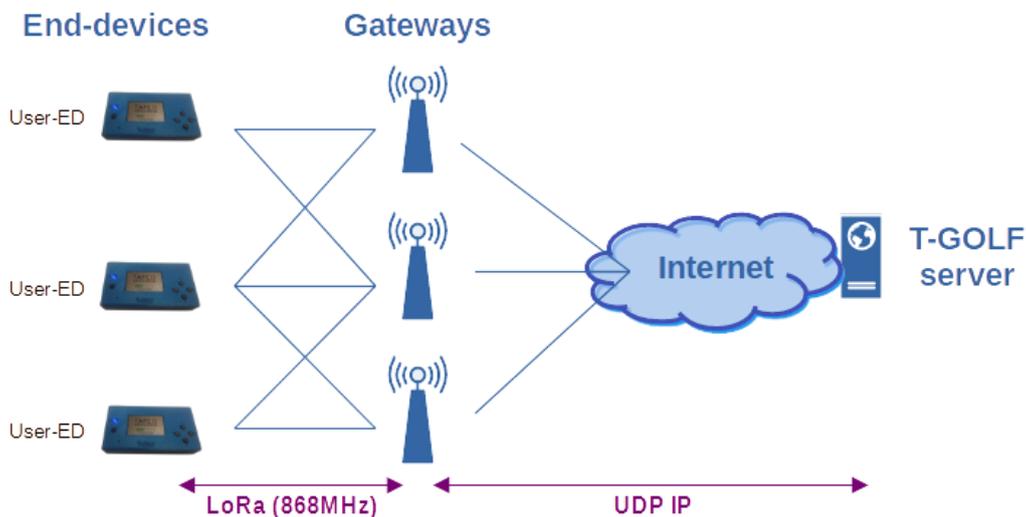


Figura 52. Esquema de la red LoRaWAN (868MHz) desplegada en el proyecto.

Para conectar los equipos *gateways* con el servidor LoRaWAN se hace uso de la herramienta Semtech UDP Packet Forwarder [65]. Se trata de un protocolo que regula el flujo de información entre el *gateway* y el servidor en una red LoRaWAN mediante paquetes UDP. Para configurarlo en el *gateway*, es necesario establecer la dirección IP o nombre de dominio del servidor LoRaWAN y los puertos UDP del tráfico entrante y saliente, donde el valor típico es el 1700 para ambos.

Para hacer las pruebas se usa el equipo RG186 de Laird Connectivity. Este equipo dispone de una antena 868MHz, un interfaz *bluetooth* con su antena, un interfaz de red Wi-Fi con su antena y un conector RJ-45 hembra para la conexión a internet mediante cable de par trenzado. Este producto comercial tiene todo lo necesario para actuar como *gateway* en la red LoRaWAN. En cuanto a la configuración, dispone de un interfaz web para su configuración de forma gráfica y sencilla. Además, soporta el protocolo Semtech UDP Packet Forwarder y puede ser configurado fácilmente desde el portal web.



Figura 53. Foto del gateway RG186 de Laird utilizado en las pruebas.

Para la prueba en el campo de golf, se ha usado el equipo Kona Macro IoT Gateway T0005130 del fabricante TEKTELIC [66]. Este equipo dispone de un conector coaxial de tipo N para la antena LoRa 868 MHz (no incluida) e incorpora comunicaciones LTE (con una antena interna incluida) para conectar a internet mediante una tarjeta SIM, aunque también incluye la posibilidad de conectar mediante cable RJ-45. Esto supone una gran ventaja porque solamente necesita ser alimentado para ponerlo en cualquier parte del campo, sin necesidad de tener un punto de acceso a internet por cable o wifi, ya que, habitualmente este tipo de redes no suelen estar desplegadas por el campo. Además, está preparado para estar en la intemperie, ya cuenta con protección IP67, dando la opción de ser colocado en el exterior de las edificaciones del club de golf. También soporta el protocolo Semtech UDP Packet Forwarder para poder ser conectado con el servidor. No obstante, hay que destacar su elevado precio que ronda los 1300€, a diferencia de los 200€ del equipo RG186.



Figura 54. Dos fotos con diferentes perspectivas del gateway TEKTELIC Kona Macro.

En cuanto a la antena, debido a que el Gateway se colocará en un punto fijo del campo de golf, se ha elegido una antena larga y se ha situado en un punto elevado añadiendo

además un extra de altura con el trípode, lo que permite dotar de una mayor cobertura al campo de golf. La antena es la OMB.868.B12F21 del fabricante Taoglas [67]. Se trata de una antena diseñada para la banda 868 MHz, típicamente usada en redes LoRa o SigFox. En cuanto a sus parámetros, cuenta con una ganancia de 12dBi, un VSWR menor a 2 y es omnidireccional. En cuanto a su mecánica, está diseñada para su instalación en un punto fijo o para la sujeción con abrazaderas. También, permite ser instalada en exteriores (imprescindible para esta aplicación) con una protección IP65 resistente al agua y a diferentes condiciones climáticas.

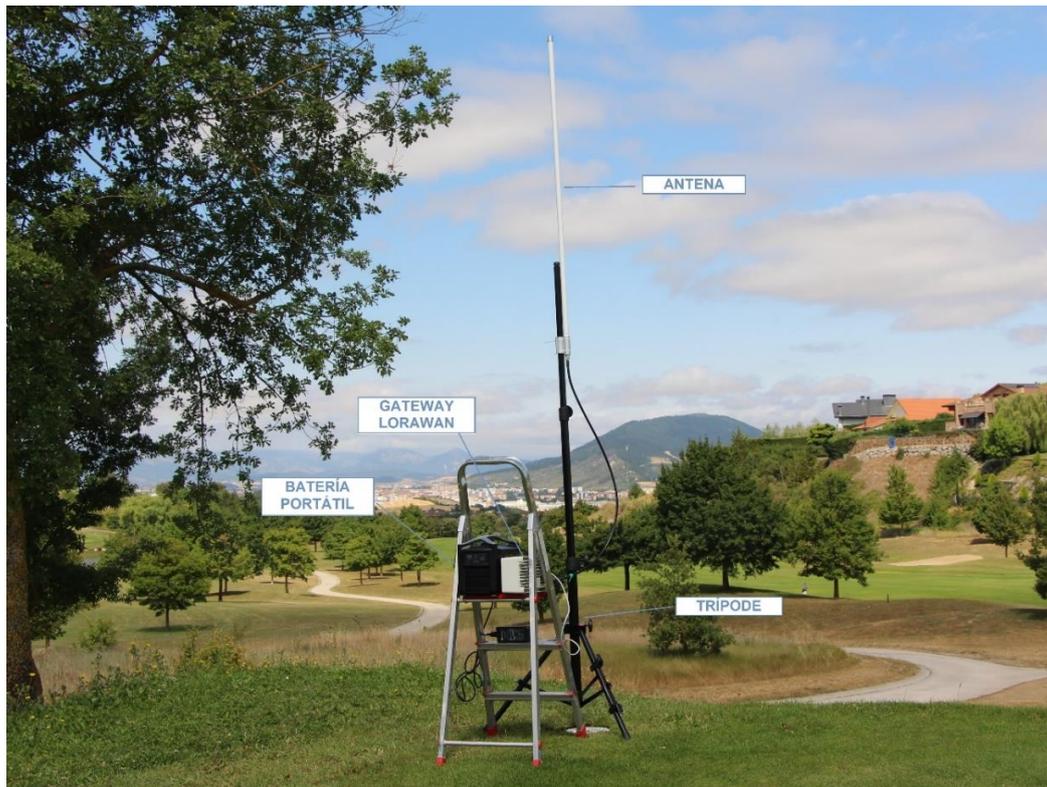


Figura 55. Foto del montaje en el campo de golf del *gateway* LoRaWAN (TEKTELIC Kona Macro), alimentado por batería portátil y reposando sobre escalera. También se muestra la antena de largo alcance (OMB.868.B12F21) colocada con un trípode.

4.3. SERVIDOR WEB

El último componente del sistema desarrollado que se describe en este apartado es el servidor web. Se desarrollan diferentes versiones debido a, por un lado, tener redes IoT diferentes con diferente conexión y datos. Y, por otro lado, tener dos etapas diferentes de desarrollo, una con dispositivos integrados y otra con dispositivos fabricados. No obstante, todas las versiones se han desarrollado bajo la misma estructura. En cuanto a las tecnologías empleadas, se ha usado la pila MEAN. Por tanto, los datos se guardan en una base de datos MongoDB; se usa un servidor NodeJS con el *framework* Express y Angular para la programación de la parte cliente, tal y como se ha expuesto en la sección 3.6 de este documento.

Primeramente, el desarrollo de este servidor fue desarrollado en local, es decir, en el mismo ordenador ejecutando una instancia de MongoDB local y el propio servidor de NodeJS. Una vez realizado el desarrollo y las pruebas, el servidor fue subido a la nube Amazon Web Services, donde es accesible a través de internet.

En cuanto a lo específico de este proyecto, el servidor web consta principalmente de dos servicios simultáneos. Se describen en los siguientes subapartados:

4.3.1. Servicio de red IoT

El servidor requiere de un servicio que permita comunicarse con la red IoT para recibir la información de los dispositivos. En concreto este servicio se encarga de tres funciones específicas, independientemente de que la red sea Zigbee o LoRaWAN:

- Estar a la escucha de conexiones por parte de la puerta de enlace de la red IoT para que envíe la información de los dispositivos.
- Filtrar y procesar la información que recibe. Comprueba si el dispositivo origen es un dispositivo de esta red y no de otra. En caso de no ser, la información se deshecha, de lo contrario se procesan los datos realizando las conversiones pertinentes para su posterior guardado.
- Guardar la información en MongoDB. Anteriormente ha sido filtrada y procesada.

En el caso de la red Zigbee, este servicio se trata de un servidor TCP al que se conecta el coordinador cada vez que recibe un paquete de un dispositivo. En concreto, el coordinador envía la dirección del dispositivo origen y los datos del paquete. En la información del paquete se encuentra la latitud y la longitud (sin ningún parámetro del juego, dado que, la red Zigbee únicamente fue utilizada en la prueba de concepto, para poder hacer la selección de protocolo de comunicaciones). El servidor, al recibir la información, convierte el formato de las coordenadas y, junto con la hora de recepción, guarda la información en MongoDB.

Por otro lado, este servicio resulta más complejo al ser utilizado con la red LoRaWAN, ya que se debe implementar el protocolo Semtech UDP Packet Forwarder y descifrar los paquetes LoRaWAN. Para recibir los paquetes del *gateway* el servicio se mantiene a la escucha de paquetes UDP en el puerto 1700. El *gateway*, una vez configurado para que use Semtech UDP Packet Forwarder y apunte al servidor, envía periódicamente paquetes de tipo PULL DATA que el servidor debe responder con su correspondiente PULL ACK para mantener viva la sesión. De esta forma se consigue que en caso de haber cortafuegos (*firewall*) se mantenga una sesión activa para que no bloquee el tráfico. Además, cuando el *gateway* recibe una trama de algún dispositivo, envía un paquete de tipo PUSH DATA con toda la información, al que el servidor le ha de contestar con un PUSH ACK. [31] [65]

Las tramas PUSH DATA contienen la información (cifrada) que ha mandado el dispositivo y parámetros de la red LoRaWAN que incluye el *gateway*. Entre esta información se encuentran los niveles de señal, frecuencia central, canal utilizado, etc. Información que puede resultar muy útil a la hora de analizar los datos obtenidos en los ensayos. La información que envía el dispositivo está cifrada y para descifrarla se utiliza la librería de NodeJS denominada **lora-packet** [68] que desempeña esa función entre otras. Para descifrar la información del dispositivo únicamente se necesitan las claves AppSKey y NwkSKey, ya que, se utiliza el método ABP para el envío de tramas (con el fin de simplificar el servidor). Estas claves han sido grabadas en los dispositivos anteriormente y, por tanto, son conocidas. [69]

4.3.2. Servicio WEB

El fin de este servicio es mostrar la información que ha almacenado el servicio de red IoT de forma ordenada. No obstante, también fueron creadas dos versiones diferentes. Por un lado, la versión empleada para la comparación de Zigbee y LoRaWAN, y, por el otro, la versión final para el campo de golf (la herramienta para el *marshal*).

En cuanto a la primera versión, el objetivo era mostrar los paquetes recibidos por los dispositivos en el mapa para poder comparar las dos redes IoT. Para mostrar el mapa del campo y marcadores se utiliza la librería Mapbox [70]. La página web de esta versión dispone de 3 funcionalidades:

- Mostrar toda la información de todos los dispositivos en el mapa.
- Mostrar únicamente el último paquete de cada dispositivo (*live tracking*).
- Filtrar por tiempo y/o por dispositivo.

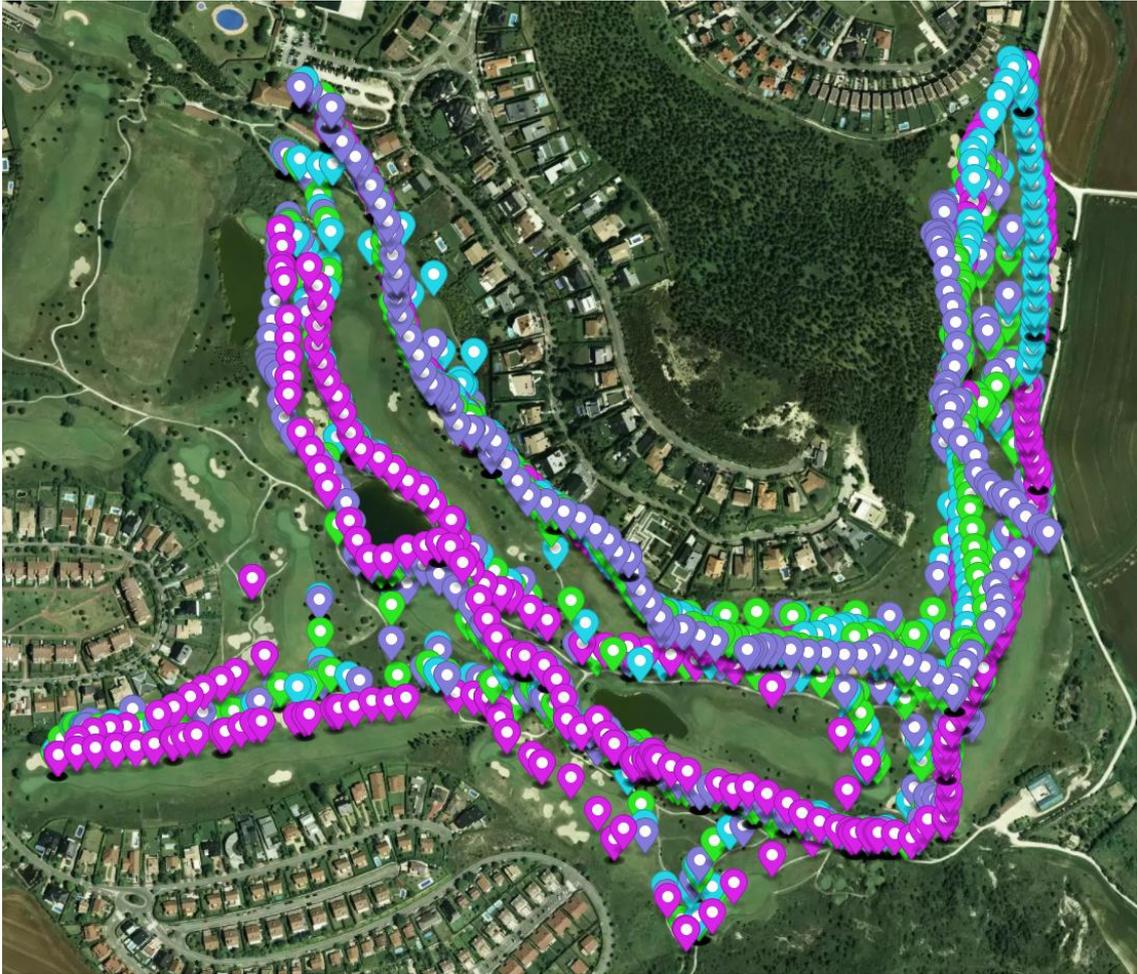


Figura 56. Ejemplo del mapa generado por la primera versión web. En la imagen se pueden apreciar marcadores de distinto color según el dispositivo.

En el caso de LoRaWAN, el servidor permite dibujar los puntos en el mapa con un color en función del nivel de señal recibido, en una escala de rojo (mínimo nivel) a verde (máximo nivel). También, se puede filtrar por el *gateway* que ha entrado el paquete. Estas dos posibilidades nos dan una herramienta muy útil a la hora de analizar coberturas. No obstante, en Zigbee no se dispone de esta información por lo que únicamente se puede saber si llegan o no.

Por el otro lado, para cumplir con las necesidades del campo de golf, una plataforma web donde el marshal pueda realizar el seguimiento del juego es necesaria. Para ello, otra versión totalmente enfocada en el producto final fue desarrollada. El desarrollo de este servicio web no parte de cero, se basa en un trabajo previo realizado por Gorka Estévez (trabajador de Tafco) para su trabajo de fin de grado de ingeniería informática [71]. El trabajo realizado por Gorka consta de una aplicación web en la que implementa un diseño web elegante con *login* y una estructura de usuarios y de campos de golf general. También incluye visualización de mapas y pintado de polígonos de los hoyos de un campo, aunque en este caso utilizando la librería Leaflet [72]. Sin embargo, tomando esta web como base, fueron añadidas las funcionalidades necesarias para completar el proyecto T-Golf. En concreto, adaptar la base de datos utilizada a la de los datos reales de los dispositivos, así como implementar la lógica de seguimiento de

juego. La herramienta de seguimiento de juego muestra un mapa del campo de golf y marcadores indicando la ubicación de cada dispositivo (o al menos la posición del último paquete recibido). También, se muestra una tabla de tiempos en la que se indica los tiempos de cada hoyo jugado por cada dispositivo. De esta forma, queda registrado el caso en el que un grupo se haya demorado más de lo estipulado en cierto hoyo. Con el mapa y la tabla de tiempos, el *marshal* es capaz de ver el ritmo de los jugadores, ver si algún grupo está formando atasco, o simplemente han tenido un percance (por ejemplo, una pérdida de bola puntual) pero continúan a buen ritmo.

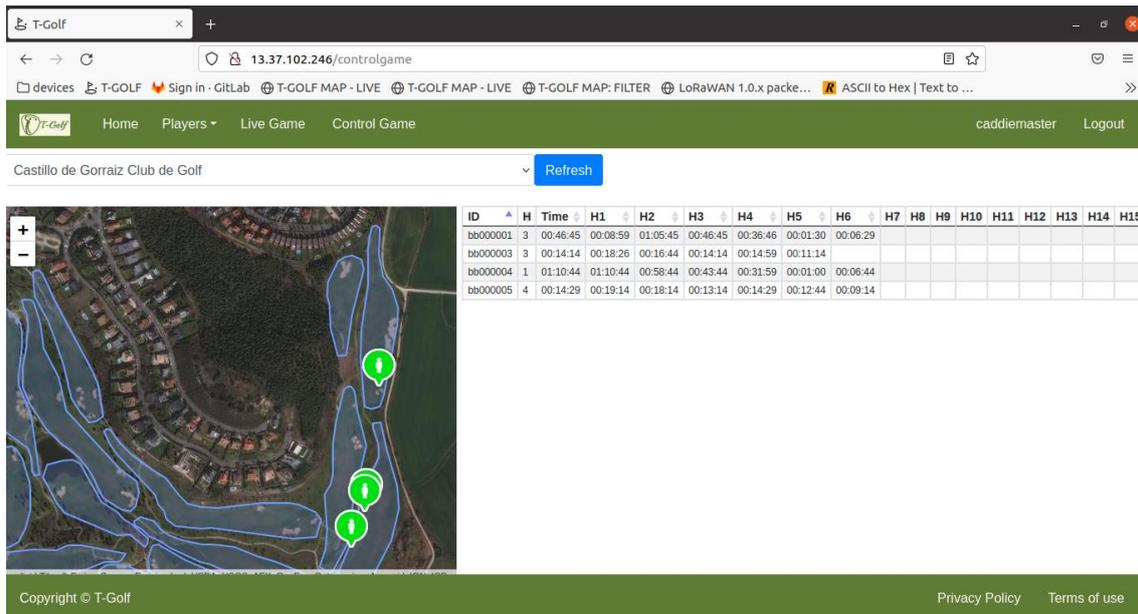


Figura 57. Captura de pantalla de la web para el seguimiento del juego. A la izquierda se muestra el mapa del campo de golf con los polígonos de cada hoyo y los marcadores dónde se sitúan los dispositivos. A la derecha se muestra la tabla de tiempos por hoyo de cada dispositivo.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el desarrollo del sistema completo es primordial probar el sistema en un terreno real para validar el funcionamiento, encontrar puntos de fallo y mejoras que necesite el sistema. Por ello, y gracias a la relación establecida entre la empresa Tafco y el Club de Golf Castillo de Gorraiz, se han realizado diferentes pruebas en el campo de golf de Gorraiz. Este campo este situado en Navarra, a 10 minutos de Iruña-Pamplona y tiene una extensión de alrededor de 60 hectáreas. Este terreno de juego es válido para hacer las pruebas, dado que podría decirse que es un campo estándar de 18 hoyos, aunque con sus particularidades. En este sentido, cabe puntualizar que, en cada campo, debido a las características específicas del terreno, se debe hacer un despliegue u otro. El factor determinante será la cobertura, que dependerá de donde se puedan colocar las antenas y los *gateways*, y si tienen visión directa a los hoyos o se ve obstaculizada por variaciones terrenales.

A continuación, se muestra una imagen del campo de golf de Gorraiz donde se hicieron las pruebas. La casa club, dispone de electricidad y conexión a internet, por lo que fue usada como el punto de control, desde donde fueron dirigidas las pruebas. Además, desde la casa club se tiene visión de una gran parte del campo, dado que se encuentra en una zona elevada respecto a los hoyos y, por tanto, es una ubicación interesante para colocar la antena principal. No obstante, existe una zona elevada y frondosa a la derecha (zona amarilla de la Figura 58), que resulta el mayor reto en cuanto a cobertura para cubrir los hoyos 4 y 5. En las pruebas realizadas fue un factor determinante tal y como se explica en los siguientes subapartados.



Figura 58. Foto aérea del Club de Golf Castillo de Gorraiz. Se indica la posición la de la casa club y los hoyos numerados.

Entre las validaciones que fueron realizadas se encuentran dos de índole diferente: Por un lado, las realizadas con los dispositivos integrados con Zigbee y LoRaWAN, y, por otro lado, las pruebas realizadas con los prototipos fabricados:

5.1. Prueba con dispositivos integrados

Primeramente, se realizó la validación conceptual del sistema utilizando los dispositivos integrados montados con módulos comerciales (como se ha explicado anteriormente). En este experimento inicial, se probaron dos redes diferentes, aunque ambas pruebas conceptualmente fueron iguales. Las pruebas consistieron en el despliegue de la infraestructura necesaria para cada red y en su puesta en marcha. Una vez en funcionamiento, diferentes dispositivos integrados fueron repartidos entre los trabajadores de Tafco y UPNA, con el fin de caminar a lo largo del campo de golf (simulando el camino que recorre un golfista) y comprobar que es posible hacer el seguimiento de los dispositivos incluso en zonas sin visión directa y alejadas, donde la cobertura pueda estar limitada.



Figura 59. A la izquierda, un par de dispositivos integrados en un *green*. A la derecha, trabajador de Tafco portando un dispositivo mientras camina.

5.1.1. Prueba de la red de dispositivos Zigbee (2.4 GHz)

En cuanto a la red Zigbee, el coordinador fue colocado en la casa club del campo (ZC, Figura 60), donde también fue colocado el ordenador con el servidor local, siendo ese el punto de control de la prueba como se ha mencionado anteriormente. Además, dos repetidores (ZR1 y ZR2, Figura 60) fueron colocados para extender la cobertura al campo completo, ya que, únicamente con el coordinador no fue suficiente.

En la siguiente imagen se muestra el resultado de la prueba. Los marcadores naranjas representan las tramas enviadas por los dispositivos y recibidas por el servidor. En total son 2.386 paquetes, que fueron enviados cada cinco segundos. La densidad de los marcadores indica la buena cobertura en el campo, validando el despliegue de la red Zigbee. El área delimitada en rojo indica el alcance aproximado del coordinador, el área azul el alcance del repetidor 1 y el lila el alcance del repetidor 2. Tal y como se señala anteriormente, el repetidor 2 es necesario principalmente para cubrir los hoyos 4 y 5 (parte superior derecha de la Figura 60), ya que, se encuentran tras una zona elevada y frondosa.

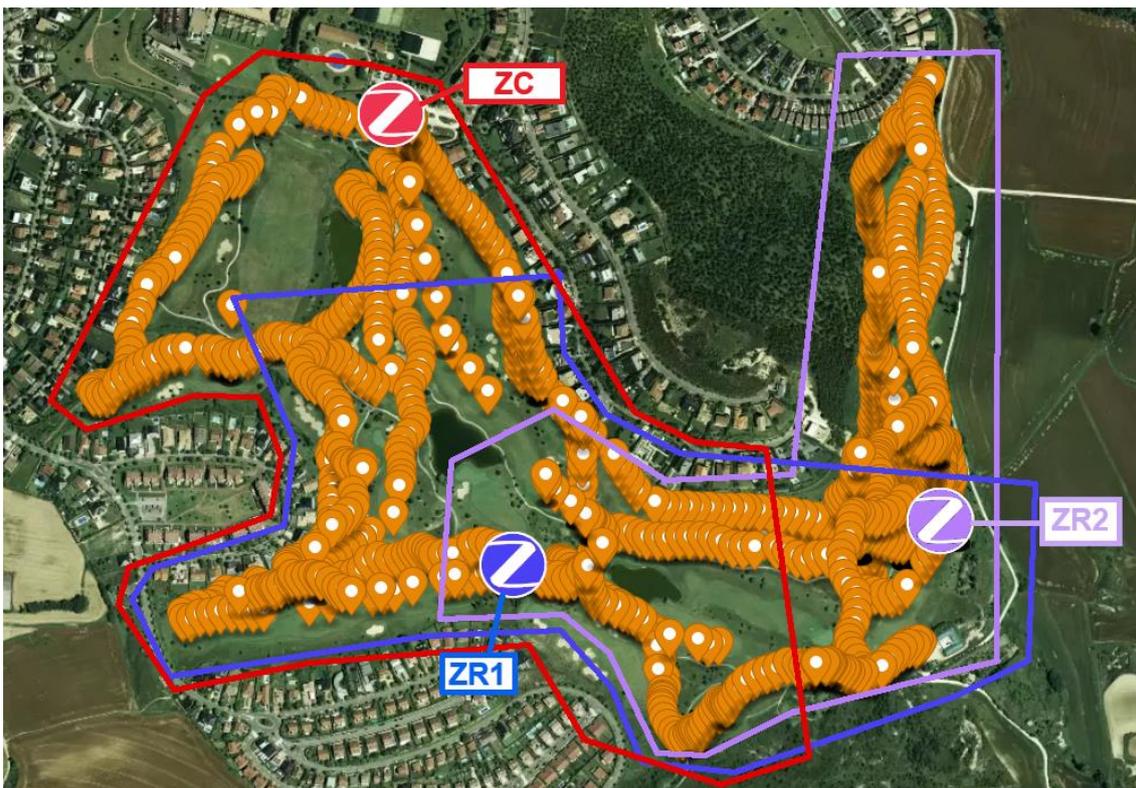


Figura 60. Mapa resultante del despliegue Zigbee.

5.1.2. Prueba de la red de dispositivos LoRaWAN (868 MHz)

En lo referente al despliegue de la red LoRaWAN, únicamente un *gateway* fue colocado. Este equipo también fue situado en la casa club, al igual que el ZC. En la siguiente imagen se muestra los resultados obtenidos en la prueba, donde cada marcador indica un paquete enviado por el dispositivo y recibido por el *gateway*. Además, cada marcador es de un color diferente según el nivel de señal RSSI recibido. El color es una escala de verde a rojo, donde verde representa el mayor nivel de señal (-20 dBm) y rojo el más bajo (-120 dBm), tal y como se indica en la leyenda de la Figura 61. Como se puede apreciar, se obtiene cobertura en todo el campo con un sólo *gateway*, a pesar de que en la zona oculta (hoyos 4 y 5) tras la zona elevada y frondosa, el nivel de señal se encuentra al límite del umbral de detección. También, se aprecia la pérdida de paquetes en la zona de baja cobertura. En este caso, los dispositivos fueron configurados para enviar tramas con una periodicidad de 30 segundos, por eso se aprecia una densidad menor de marcadores.

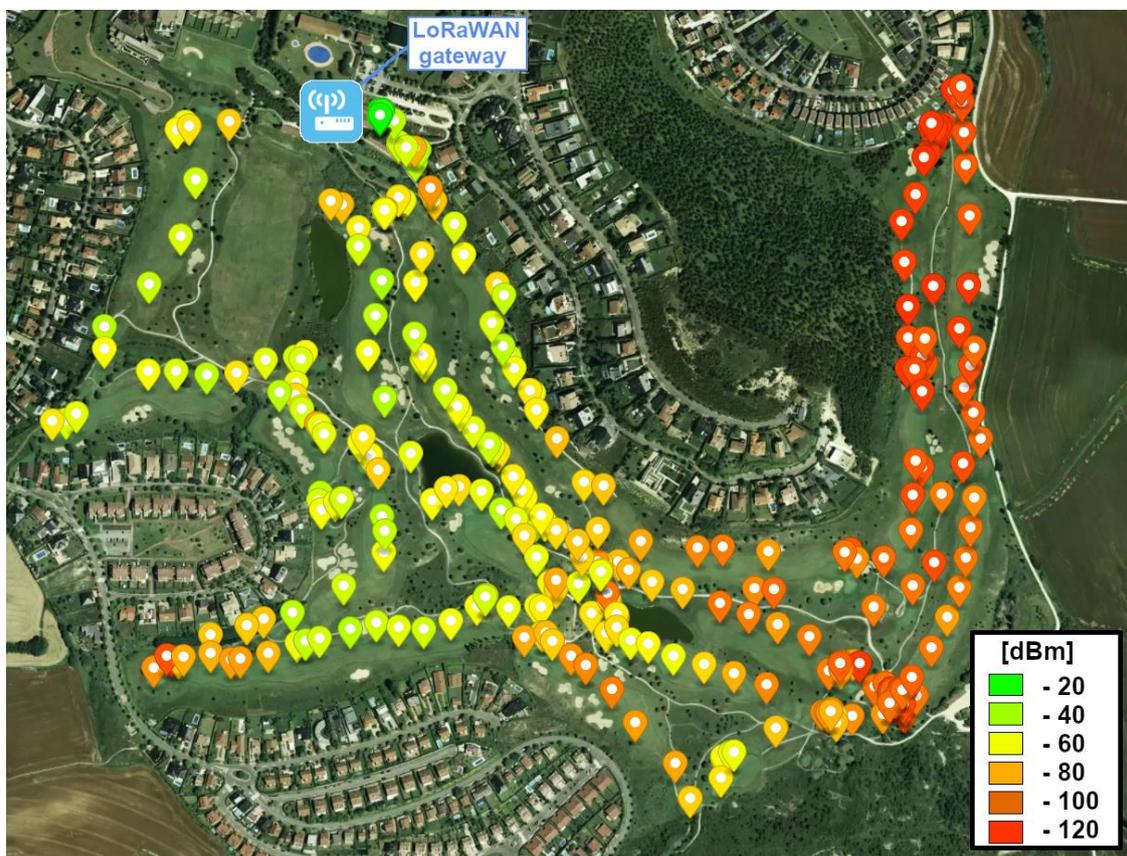


Figura 61. Mapa resultante del despliegue LoRaWAN.

5.1.3. Comparación de las redes desplegadas

Después de desplegar y ver el comportamiento real de las dos tecnologías de comunicación en el campo de golf, en este subapartado se realiza la comparación de ambas y, por consiguiente, la elección realizada para el sistema.

Aunque es cierto que ambas redes fueron desplegadas con éxito, LoRaWAN es la tecnología más apropiada para el escenario en cuestión. Una de las principales ventajas es la cobertura que puede proporcionar un sólo *gateway* LoRaWAN en comparación con el coordinador y los dos repetidores necesarios en Zigbee para cubrir la misma área. Como ya se ha comentado, existen numerosos inconvenientes en desplegar equipos en el medio del terreno de juego, por eso es importante tener el mínimo número de equipos repetidores. No obstante, teniendo en cuenta los resultados de la prueba de la red LoRaWAN en Gorraiz (Figura 61), resulta necesario añadir otro *gateway* que pueda abarcar mejor la zona de los hoyos 4 y 5 (tal y como se muestra el siguiente apartado).

Además, LoRaWAN permite obtener mucha información sobre la red, los envíos y los dispositivos, permitiendo extraer información útil para los despliegues. A diferencia de Zigbee, que de por sí no implementa la distribución de información de la red. Para este proyecto, resulta imprescindible teniendo en cuenta que hay que hacer un despliegue específico para cada campo de golf.

Por otro lado, respecto a las características generales de las dos redes IoT, LoRaWAN es más eficiente energéticamente por lo que la batería del dispositivo dura más. En cuanto al coste económico, los dispositivos LoRaWAN son de bajo coste frente al medio coste de los dispositivos Zigbee.

Por las razones mencionadas en este apartado, LoRaWAN fue seleccionado para continuar con el desarrollo del proyecto. Una vez hecha la selección, ya se pudo proceder al diseño del dispositivo User-ED con un módulo de comunicaciones LoRa. Posteriormente, fue realizado un nuevo despliegue de LoRaWAN para probar el sistema con los prototipos fabricados, como se explica en el siguiente apartado.

5.2. Prueba con prototipos fabricados

Finalmente, una prueba de validación del sistema completo de control de juego fue realizada. En esta prueba, los prototipos fabricados y la versión final del servidor web (con el control de juego implementado: seguimiento en mapa, tiempos, etc.) fueron utilizados. En concreto, la prueba se llevó a cabo con 4 dispositivos simultáneamente, cada uno simulando el comportamiento de un jugador.



Figura 62. Un par de imágenes de los prototipos en el campo de Gorraiz.

Una vez más, el ensayo fue realizado en el campo de golf de Gorraiz. En este caso, en vista de los resultados anteriores, dos *gateways* fueron desplegados con el fin de asegurar la cobertura en el campo completo. Esto fue posible porque en esta fase del proyecto el servidor web ya se había desplegado en la nube, por lo que fue posible colocar un *gateway* TEKTELIC en una zona remota del campo de golf y enviar los datos usando una tarjeta SIM de telefonía móvil. En las siguientes imágenes se muestran los mapas de cobertura al igual que en la prueba anterior, aunque esta vez con 3 variantes: El mapa de cobertura del *gateway* colocado en la casa club, el del otro *gateway* colocado en el hoyo 6 y el resultante con ambos.

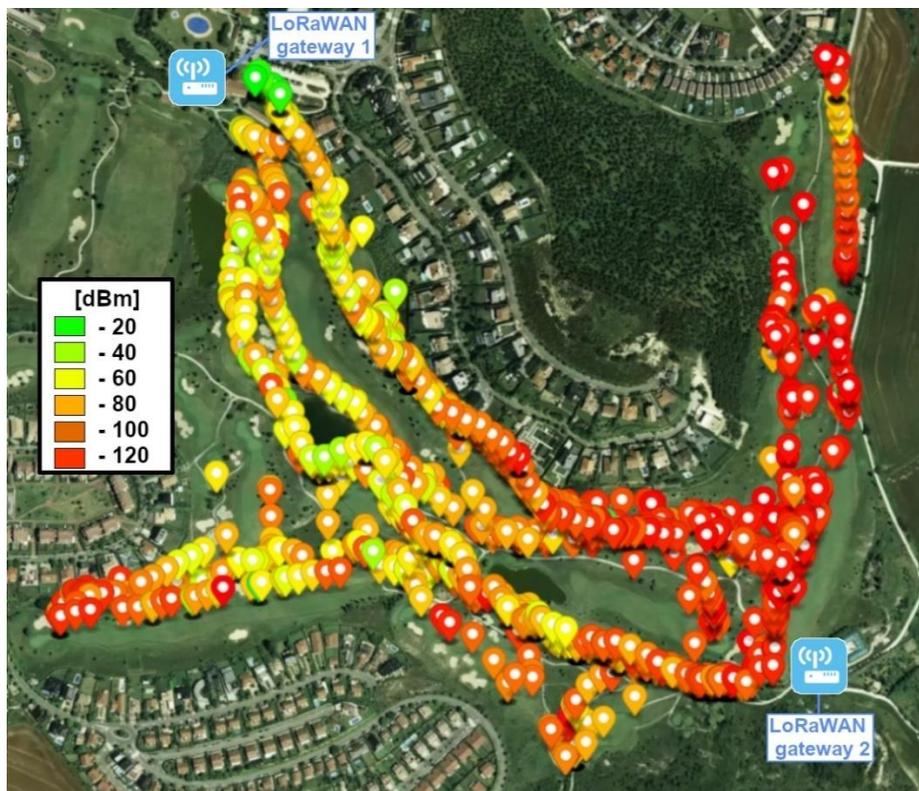


Figura 63. Mapa de cobertura del *gateway* 1 situado en la casa club.

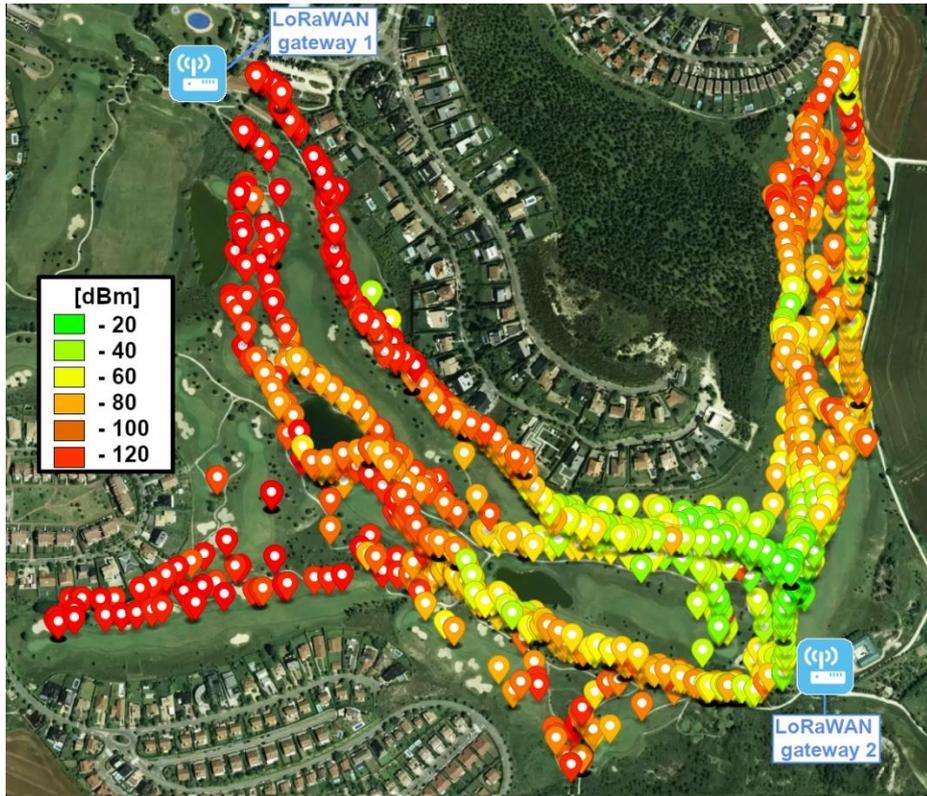


Figura 64. Mapa de cobertura del gateway 2 situado en el lateral del hoyo 6.

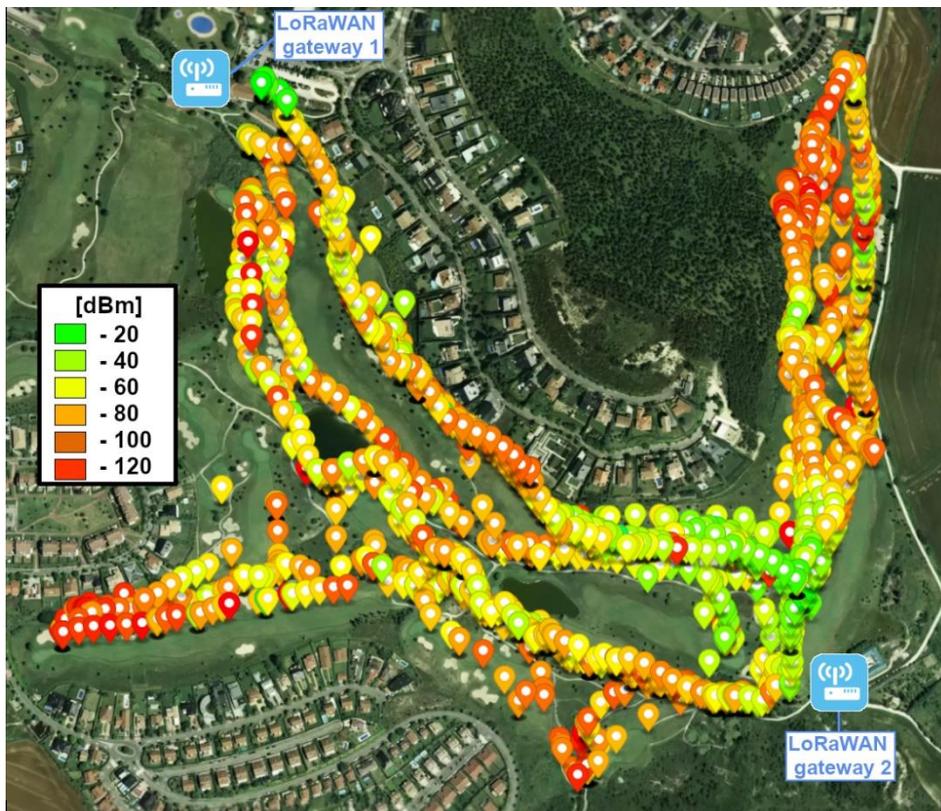


Figura 65. Mapa de cobertura de ambos gateways.

Al analizar los datos de cobertura, se puede observar la mejora que supone añadir otro gateway en un punto estratégico para cubrir la zona de peor cobertura (hoyos 4 y 5). De esta forma, no se tienen pérdidas significantes de paquetes y se cubre el campo de forma óptima.

A continuación, se muestra el mapa de los paquetes recibidos diferenciados por dispositivo:

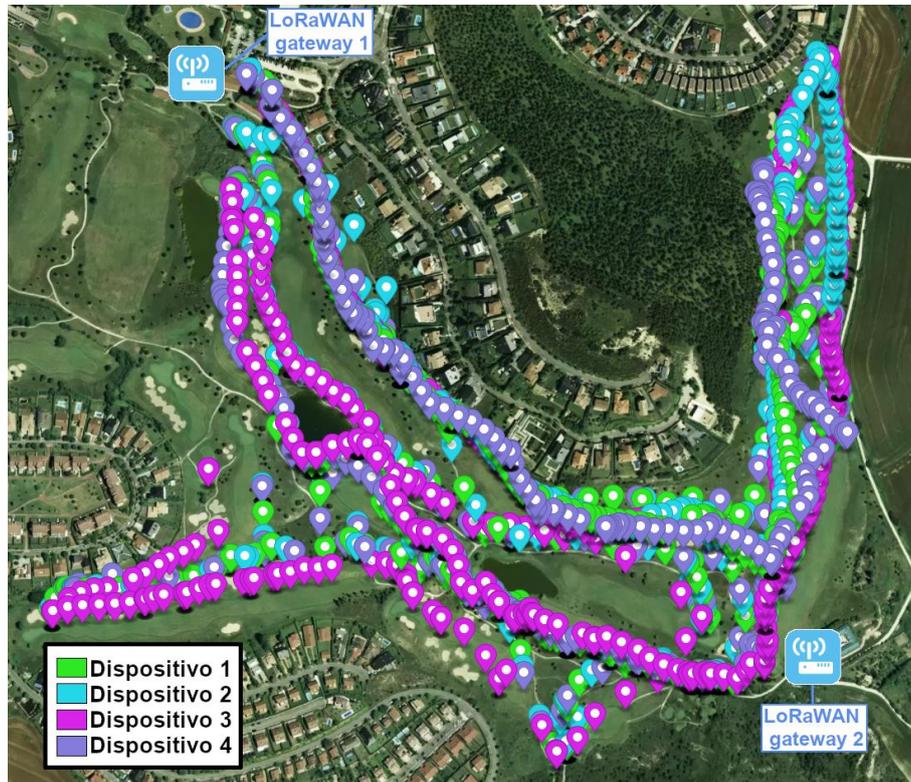


Figura 66. Mapa con marcadores de cada trama recibida de cada dispositivo.

En cuanto a la herramienta web, para el seguimiento del juego se logró visualizar la ubicación en mapa de los jugadores con una tasa de refresco de 30 segundos. Por tanto, la web permite realizar el seguimiento y ver el ritmo de cada jugador de forma satisfactoria. Además del mapa, la tabla de tiempos fue validada en esta prueba. Como se muestra en las siguientes imágenes de las capturas de pantalla tomadas durante el transcurso de la prueba, se aprecia el tiempo total y el tiempo de cada hoyo por cada uno de los dispositivos. Estos valores se rellenan a medida que los jugadores terminan los hoyos. Al ser una prueba, los tiempos son muy bajos en comparación con los tiempos reales de un juego de golf, pero son válidos para realizar la comprobación del sistema.

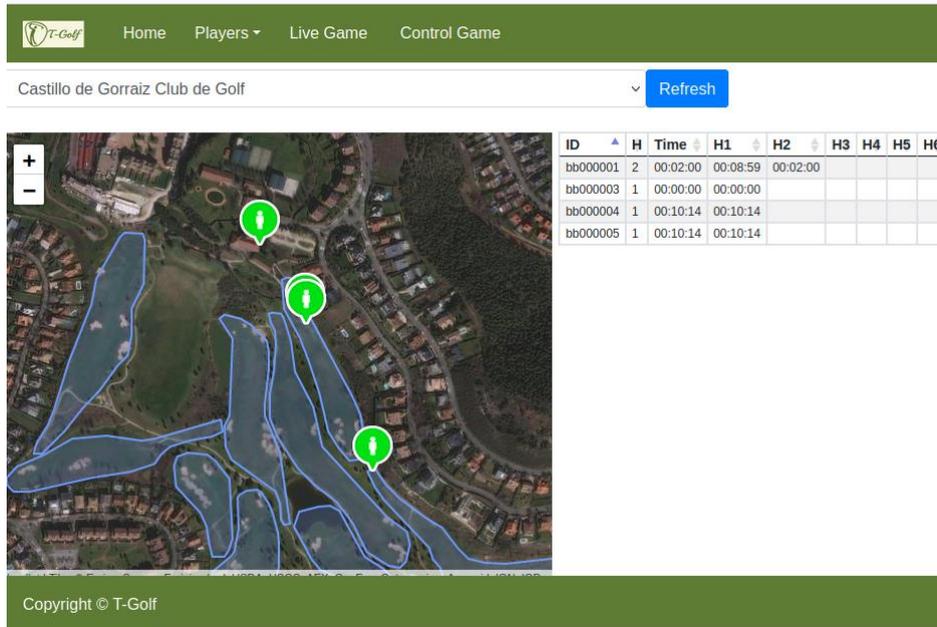


Figura 67. Captura de pantalla de la web de seguimiento del juego. El dispositivo bb000001 se encuentra en el hoyo 2, el bb000003 todavía no ha iniciado y los siguientes están en el hoyo 1.

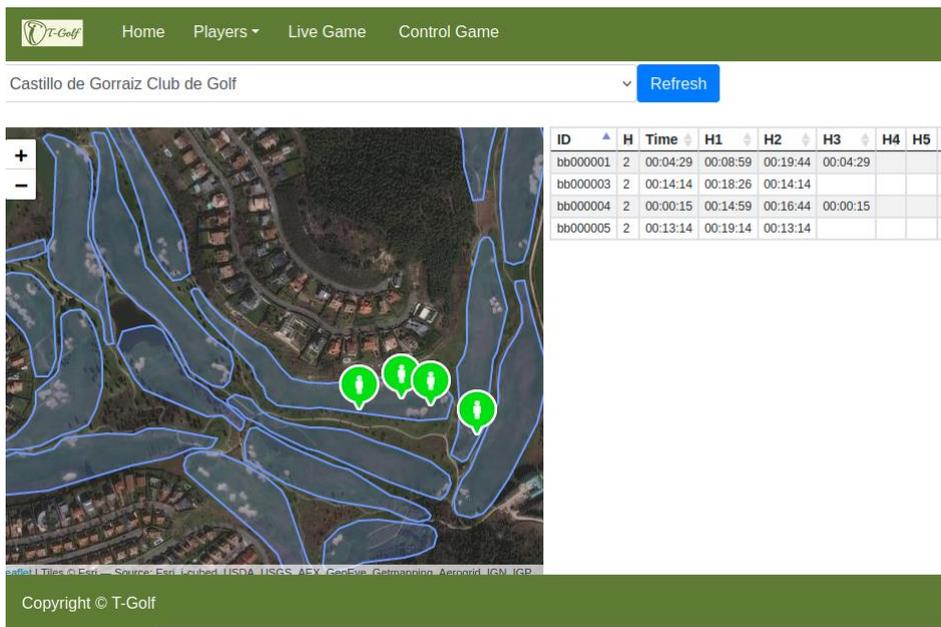


Figura 68. Captura de pantalla de la web de seguimiento del juego. Han avanzado y dos están en el hoyo 2 y los otros en el 3.

[T-Golf](#)
[Home](#)
[Players](#)
[Live Game](#)
[Control Game](#)
caddiemaster [Logout](#)

Castillo de Gorraiz Club de Golf [Refresh](#)



ID	H	Time	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14
bb000001	7	00:13:44	00:08:59	01:05:45	00:46:45	00:36:46	00:01:30	00:13:59	00:13:44							
bb000003	3	00:14:14	00:18:26	00:16:44	00:14:14	00:14:59	00:11:14									
bb000004	1	01:10:44	01:10:44	00:58:44	00:43:44	00:31:59	00:01:00	00:15:14	00:12:44							
bb000005	4	00:14:29	00:19:14	00:18:14	00:13:14	00:14:29	00:12:44	00:13:29	00:16:44							

Copyright © T-Golf [Privacy Policy](#) [Terms of use](#)

Figura 69. Captura de pantalla de la web de seguimiento del juego. Un dispositivo se encuentra en el hoyo 5 y los otros tres en el hoyo 7. Se aprecia en el mapa uno detrás del otro.

6. CONCLUSIONES

Finalmente, tras el desarrollo del trabajo, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Se ha logrado el despliegue de dos redes de IoT (Zigbee y LoRaWAN) en un campo de golf de forma satisfactoria, lo que ha permitido compararlas y seleccionar LoRaWAN para su uso en el sistema de control del juego. Para ello, se han montado dispositivos finales para ambas redes haciendo uso de placas de desarrollo para las pruebas iniciales, permitiendo hacerlo sin largos plazos ni grandes costes de fabricación. A pesar de seleccionar LoRaWAN, se ha demostrado el potencial de Zigbee también para aplicaciones exteriores.

Además, se han diseñado y fabricado exitosamente dispositivos User-ED para el control de juego. Para ello se ha fabricado una tarjeta PCB que incluye un microcontrolador que se encarga de gestionar todos los procesos, con un módulo de comunicaciones LoRaWAN y un módulo GNSS para obtener la ubicación. También incluye una batería que se carga inalámbricamente. Por otro lado, para interactuar con el usuario incluye botones y una pantalla MIP para exteriores. Estos dispositivos han sido los prototipos usados para las primeras pruebas del control de juego en el campo de golf de Gorraiz, demostrando su validez en un campo real.

Por último, se ha desarrollado y desplegado en la nube un servidor siguiendo la estructura MEAN. Este servidor consta de un servicio que se encarga de recibir la información de la red LoRaWAN y un servicio web que gestiona toda la información y se encarga de mostrar la información adecuada al marshal. Este portal web muestra en tiempo real una tabla de tiempos de juego de cada jugador (dispositivo) y la posición en un mapa, siendo esclarecedor para el marshal. Además, este portal web está accesible desde cualquier lugar permitiendo así llevar el control del juego desde cualquier sitio con acceso a internet.

Como conclusión, se puede decir que se ha llevado a cabo satisfactoriamente la implementación del sistema de comunicaciones LoRaWAN basado en el diseño y desarrollo de dispositivos inalámbricos conectados a la nube para el seguimiento y la gestión eficiente de partidos de golf.

7. LÍNEAS FUTURAS

Este trabajo es un primer desarrollo de un sistema de seguimiento y control de juego, por ello, necesita un mayor desarrollo para poder ser un sistema que pueda comercializarse. A continuación, se exponen algunas de las posibles mejoras a desarrollar en un futuro:

En cuanto al User-ED, una de las modificaciones más evidentes sería la de diseñar la tarjeta PCB principal con la carga inalámbrica funcional en la misma tarjeta, sin PCB auxiliar. También, sería conveniente reducir el tamaño del dispositivo, esto sería posible cambiando los botones y realizando un diseño PCB más compacto. Por otro lado, el prototipo fabricado no dispone de protección externa contra las inclemencias climáticas, como puede ser la lluvia. Al tratarse de equipos pensados para funcionar al aire libre deberían ser resistentes al agua.

Por otro lado, se plantea realizar otra variante de dispositivo final, que no contenga pantalla y sea más compacto. Este dispositivo no necesitará interacción del jugador, aunque se pierde la capacidad de guardar la puntuación. Ambos dispositivos podrían ser compatibles y ser comercializados como dos opciones diferentes.

Además, el tener una red propia de LoRaWAN en un campo de golf brinda la posibilidad de desarrollar otro tipo de dispositivos que hagan uso de esa misma red. Alguno de los usos que pueden ser interesantes son para el control y gestión de flotas (*buggys*, cortacésped, etc.) o para la monitorización ambiental (estación meteorológica, control del estado del césped, etc.).

En cuanto al servidor, es necesario modificar el diseño para que resulte más agradable de cara al usuario final. También, se ha de cambiar el diseño para que resulte más sencillo e intuitivo el seguimiento del juego (por ejemplo, la tabla de tiempos resulta muy extensa al ser 18 hoyos). Además, sería interesante incluir un apartado para que los jugadores puedan ver sus resultados.

8. REFERENCIAS

- [1] I. Picallo, E. Aguirre, P. Lopez-Iturri, J. Guembe, E. Olariaga, H. Klaina, J. A. Marcotegui y F. Falcone, «Design, Assessment and Deployment of an Efficient Golf Game Dynamics Management System Based on Flexible Wireless Technologies,» *Sensors*, 2023.
- [2] ESTATISTA, «Nº Campos de golf en españa,» [En línea]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/670013/numero-de-campos-de-golf-por-region-espana/>.
- [3] ESTATISTA, «Ranking de países con más campos de golf en el mundo en 2020,» [En línea]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/1039703/paises-con-mas-campos-de-golf-en-el-mundo/>.
- [4] REAL FEDERACIÓN ESPAÑOLA DE GOLF, 11 Enero 2023. [En línea]. Available: <https://www.rfegolf.es/Noticias/NewsDetails.aspx?NewsId=13165#:~:text=El%20golf%20espa%C3%B1ol%20consolida%20su,incremento%20anual%20consecutivo%20de%20federados&text=El%20golf%20espa%C3%B1ol%20concluy%C3%B3%20el,fecha%20de%2031%20de%20diciembre.> [Último acceso: 2022].
- [5] REAL FEDERACIÓN ESPAÑOLA DE GOLF, 30 Enero 2023. [En línea]. Available: <https://www.rfegolf.es/Noticias/NewsDetails.aspx?NewsId=13198>. [Último acceso: 2022].
- [6] AECG, RFEG e IE University, « El golf como catalizador de la actividad económica en España,» 2020.
- [7] Lightspeed, «Página comercial de la empresa Lightspeed,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.lightspeedhq.com/golf/tee-sheet/>.
- [8] ForeUP, «Página comercial de la empresa foreUP,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.foreupgolf.com/>.
- [9] T. S. Inc., «Página web comercial de la empresa TeeQuest Solutions Inc,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.teequestsolutions.com/>.
- [10] Club Caddie Holdings, Inc., «Página comercial,» 2023. [En línea]. Available: <https://clubcaddie.com>.
- [11] SotaPar., «Aplicaciones móviles para jugar mejor a golf,» [En línea]. Available: <https://sotapar.com/aplicaciones-moviles-para-jugar-mejor-a-golf/>.
- [12] TAGMARSHAL USA, «Tagmarshal optimizes on-course operations.,» [En línea]. Available: <https://www.tagmarshal.com/how-it-works/>.
- [13] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger y E. Wasle, GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more, Austria: SpringerWienNewYork, 2008.

- [14] Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica, «Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics,» [En línea]. Available: <https://www.gps.gov/>.
- [15] Gobierno de México, «Hacia el Espacio: Estructura de las Señales del GPS,» Abril 2022. [En línea]. Available: <https://haciaelespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=350>.
- [16] Punto Flotante, «Funcionamiento del sistema de posicionamiento global GPS.,» [En línea]. Available: <https://www.puntoflotante.net/TUTORIAL-SISTEMA-DE-POSICIONAMIENTO-GLOBAL-GPS.htm>.
- [17] F. J. Guembe Lara, «Sistema de Adquisición de datos espaciales con terminal Android y volcado en nube simulada para la Agricultura de Precisión,» Universidad de Pinar del Río, Pinar del Río (Cuba), 2018.
- [18] E. D. Kaplan y C. Hegarty, *Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications*, Third Edition, USA: Artech House, 2017.
- [19] Gobierno de México, «Hacia el Espacio: El Sistema GLONASS,» Junio 2016. [En línea]. Available: <https://haciaelespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=201>.
- [20] EUSPA (European Union Agency for Space Programme), «Centro de información de GALILEO,» [En línea]. Available: <https://www.gsc-europa.eu/>.
- [21] M. S. A. Korade, D. V. Kotak y M. A. Durafe, «A Review Paper on Internet of Things(IoT) and its Applications,» *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* , vol. 06, nº 06, p. 9, 2019.
- [22] A. S. Gillis, «internet of things (IoT),» Te, 2023. [En línea]. Available: <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/Internet-of-Things-IoT>.
- [23] M. Somisetty, «Big Data Analytics in 5G (IEEE),» 2018. [En línea]. Available: <https://futurenetworks.ieee.org/images/files/pdf/applications/Data-Analytics-in-5G-Applications030518.pdf>.
- [24] Chakray, «10 problemas de seguridad en el Internet de las cosas (IoT),» [En línea]. Available: <https://www.chakray.com/es/10-problemas-seguridad-internet-las-cosas/>.
- [25] UIT, «Página web de la UIT. ¿Quiénes somos?,» [En línea]. Available: <https://www.itu.int/es/about/Pages/default.aspx>.
- [26] Digi International, «Demystifying 802.15.4 and ZigBee,» 2007.
- [27] P. Dhillon y D. H. Sadawarti, «A Review Paper on Zigbee (IEEE 802.15.4) Standar,» *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2014.
- [28] Connectivity Standards Alliance, «Connectivity Standards Alliance Official Web Page,» [En línea]. Available: <https://csa-iot.org/>. [Último acceso: 2023].

- [29] Muthu Ramya.C, Shanmugaraj.M y Prabakaran.R, «STUDY ON ZIGBEE TECHNOLOGY,» 2011.
- [30] N. Ashok Somani y Y. Patel, «zigbee: A LOW POWER WIRELESS TECHNOLOGY FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS,» *International Journal of Control Theory and Computer Modeling*, 2012.
- [31] Mobilefish, «LoRaWAN Development webpage,» [En línea]. Available: https://www.mobilefish.com/developer/lorawan/lorawan_quickguide_tutorial.html.
- [32] The Things Network, «LoRaWAN documentation page,» The Things Network, [En línea]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/>.
- [33] E. Solera, «Modulación LoRa: Long Range Modulation,» 27 Agosto 2018. [En línea]. Available: <https://medium.com/pruebas-de-laboratorio-de-la-modulaci%C3%B3n-lora/modulaci%C3%B3n-lora-4ad74cabd59e>.
- [34] LoRa Alliance, «LoRa Alliance oficial web page,» [En línea]. Available: <https://lora-alliance.org/>.
- [35] The Things Network, «LoRaWAN: Frequency Plans,» [En línea]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/frequency-plans/>. [Último acceso: 2023].
- [36] LoRa Alliance, « LoRaWAN Regional Parameters RP002-1.0.4,» 2022.
- [37] E. Ellesworth Burns, *The Story of Great Inventions*, 1910.
- [38] F. N. Ibrahim, N. A. M. Jamail y N. Othman, Development of wireless electricity transmission through resonant coupling, 4th IET Clean Energy and Technology Conference, 2016.
- [39] A. Laha, A. Kalathy, M. Pahlevani y P. Jain, «A Comprehensive Review on Wireless Power Transfer Systems for Charging Portable Electronics,» *Eng (MDPI)*, p. 35, 2023.
- [40] vmware, «Servidor de nube,» [En línea]. Available: <https://www.vmware.com/es/topics/glossary/content/cloud-server.html>. [Último acceso: 2023].
- [41] IBM, «¿Qué es la pila MEAN?,» [En línea]. Available: <https://www.ibm.com/es-es/topics/mean-stack>. [Último acceso: 2023].
- [42] MongoDB, «MongoDB Web Page,» [En línea]. Available: <https://www.mongodb.com/>. [Último acceso: 2023].
- [43] Express.js, «Express JS Web Page,» [En línea]. Available: <https://expressjs.com/>. [Último acceso: 2023].
- [44] Angular.JS, «Angular.JS Web Page,» [En línea]. Available: <https://angular.io/>. [Último acceso: 2023].
- [45] Node.JS, «Node.JS Web Page,» [En línea]. Available: <https://nodejs.org/es>. [Último acceso: 2023].

- [46] S. Microelectronics, «STM32L073RZ product page,» [En línea]. Available: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32l073rz.html>.
- [47] S. Microelectronics, «NUCLEO-L073RZ product page,» [En línea]. Available: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-l073rz.html>.
- [48] S. Microelectronics, «X-NUCLEO-GNSS1A1 product page,» [En línea]. Available: <https://www.st.com/en/ecosystems/x-nucleo-gnss1a1.html>.
- [49] S. Microelectronics, «Teseo-LIV3F product page,» [En línea]. Available: <https://www.st.com/en/positioning/teseoliv3f.html>.
- [50] USI, «WM-SG-SM-42 product page,» [En línea]. Available: <https://www.usiglobal.com/en/products?id=wifi-module-lpwa-wm-sg-sm-42>.
- [51] USI, «USI_I-NUCLEO-LRWAN1 github page,» [En línea]. Available: https://github.com/USIWP1Module/USI_I-NUCLEO-LRWAN1.
- [52] D. I. Inc., «Digi XBee 3 PRO, 2.4 Ghz Zigbee 3.0, U.FL Ant, TH MT,» [En línea]. Available: <https://es.digi.com/products/models/xb3-24z8ut>.
- [53] D. I. Inc., «Plataforma de configuración de próxima generación para soluciones XBee/RF,» [En línea]. Available: <https://es.digi.com/products/embedded-systems/digi-xbee/digi-xbee-tools/xctu>.
- [54] QUECTEL, «GNSS L86 Product page,» [En línea]. Available: <https://www.quectel.com/product/gnss-l86>.
- [55] Murata, «CMWX1ZZABZ product page,» [En línea]. Available: <https://www.murata.com/en-global/products/connectivitymodule/lpwa/overview/lineup/type-abz>.
- [56] Abracon, «ACAG1204-868-T. 868 MHz Ceramic Chip Antenna. Datasheet,» [En línea]. Available: <https://abracon.com/datasheets/ACAG1204-868-T.pdf>.
- [57] ZonaCasio, «¿Es mejor el LCD TN de toda la vida, o los nuevos displays MIP en pixel de G-Shock?,» 2022. [En línea]. Available: <http://zonacasio.blogspot.com/2022/01/es-mejor-el-lcd-tn-de-toda-la-vida-o.html>.
- [58] DATA MODUL, «LPM027M128C Specification Document,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.data-modul.com/sites/default/files/products/LPM027M128C-specification-12022032.pdf>.
- [59] Onsemi, «Battery Fuel Gauge IC (LC709203F) Datasheet,» [En línea]. Available: <https://www.onsemi.com/download/application-notes/pdf/andlc709203f-d.pdf>.
- [60] SeedStudio, «Lipo Rider Plus Wiki page,» [En línea]. Available: <https://wiki.seeedstudio.com/Lipo-Rider-Plus/>.
- [61] Texas Instruments, «BQ51013B Highly Integrated Wireless Receiver Qi Datasheet,» [En línea]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq51013b.pdf>.

- [62] Würth Elektronik, «760308103215 WE-WPCC Wireless Power Transfer Receiver Coil Datasheet,» [En línea]. Available: <https://www.wurth-electronic.com/components/products/datasheet/760308103215.pdf>.
- [63] taoglas, «OMB.242.08F21 Datasheet: Barracuda - Omni-Directional Outdoor Antenna,» [En línea]. Available: https://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/918229/TAOGLAS/OMB.242.08F21/+71J_4AVRvxhLDU+TyptCEDzwlTHh+/datasheet.pdf.
- [64] DIGI, «DIGI CONNECTPORT X4 FAMILY DATASHEET,» [En línea]. Available: https://www.digi.com/resources/library/datasheets/ds_connectportx4?view=fullscreen.
- [65] Semtech, «Lora-net/Packet_forwarder Git repository,» [En línea]. Available: https://github.com/Lora-net/packet_forwarder.
- [66] TEKTELIC Communications Inc., «T0005130 KONA MACRO GATEWAY (EU/LTE) Datasheet,» [En línea]. Available: https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Tektelic%20PDFs/Kona_Macro_12-11-19.pdf.
- [67] Taoglas Limited, «OMB.868.B12F21 Barracuda 868MHz 12dBi Omnidirectional Outdoor Antenna Datasheet,» [En línea]. Available: <https://cdn.taoglas.com/datasheets/OMB.868.B12F21.pdf>.
- [68] A. Kirby, «lora-packet library for Node.js (Repository site),» [En línea]. Available: <https://github.com/anthonykirby/lora-packet#readme>.
- [69] F. X. V. Lazzo, «Desarrollo de un manual de prácticas para el uso de equipos LoRaWAN en redes de sensores inalámbricos,» UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA, Cuenca (Ecuador), 2020.
- [70] Mapbox, «Maps and location for developers. Oficial website of Mapbox.,» [En línea]. Available: <https://www.mapbox.com/>.
- [71] G. E. González, *Aplicación T-Golf*, Universitat Oberta de Catalunya, 2020.
- [72] LeafletJS, «Leaflet: An open-source JavaScript library for mobile-friendly interactive maps.,» [En línea]. Available: <https://leafletjs.com/>.
- [73] onsemi, «LC709203F Datasheet,» [En línea]. Available: <https://cdn-learn.adafruit.com/assets/assets/000/094/597/original/LC709203F-D.PDF?1599248750>.

9. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema general del proyecto.....	8
Figura 2: Estaciones terrestres del sistema GPS [14].	12
Figura 3: Trilateración GPS.....	13
Figura 4. Ejemplo de señales <i>upchirp</i> (izquierda) y <i>downchirp</i> (derecha). En la parte superior se muestran las gráficas de amplitud de la señal respecto al tiempo, y, debajo, la frecuencia respecto al tiempo.	19
Figura 5. Ejemplo conceptual de señal LoRa (frecuencia frente al tiempo).	20
Figura 6. Gráfica señales con SF diferente. Se trata de una gráfica conceptual donde no se han tenido en cuenta valores concretos.	21
Figura 7. Capas comunicación LoRa/LoRaWAN.....	22
Figura 8. Esquema de red LoRaWAN.....	23
Figura 9. Esquema proceso <i>JOIN</i> para activación OTAA y cifrado en LoRaWAN 1.0.x.	25
Figura 10. Esquema conceptual del fundamento WPT.	27
Figura 11. Demostración de una bombilla incandescente alimentada inalámbricamente por inducción electromagnética en 1910. [37].....	27
Figura 12. Ejemplo de un esquemático.	31
Figura 13. Ejemplo diseño PCB.	32
Figura 14. Imagen del modelo comercial NUCLEO-L073RZ.....	36
Figura 15. Vista superior de X-NUCLEO-GNSS1A1 y antena GNSS.....	36
Figura 16. Placa I-NUCLEO-LRWAN1 y antena 868 MHz.	37
Figura 17. Montaje para las comunicaciones Zigbee del integrado.	38
Figura 18. PCB para alimentación con batería de Tafco Metawireless 38	
Figura 19. Dispositivos integrados: A la izquierda dispositivo Zigbee y a la derecha dispositivo LoRaWAN.	39
Figura 20. Esquema general de las partes del prototipo y sus conexiones.	40
Figura 21. Vista 3D del diseño PCB para la antena cerámica. La superficie verde ligeramente más oscura indica el área sin cobre y los círculos de color ocre muestran las vías.	43
Figura 22. Capa inferior con sus componentes y conectores.	44
Figura 23. Capa superior con el dibujo de referencia para adherir la pantalla.	44
Figura 24. Montaje de placa auxiliar WPT sobre tarjeta PCB User-ED.	46
Figura 25. Imagen superior de placa TGED y placa auxiliar WPT sobre ella.	47
Figura 26. Bobina 760308103215 [62].	47
Figura 27. Tarjeta PCB auxiliar para la pantalla (TGDISP).....	47
Figura 28. Pantalla LPM027M128C [58].	48
Figura 29. Batería Li-Po.....	48
Figura 30. Pieza inferior.....	48
Figura 31. Pieza separadora de bobina y batería.....	49
Figura 32. Piezas separadoras de la batería y la tarjeta TGED.....	49
Figura 33. Pieza para soportar TGDISP y pantalla.	49
Figura 34. Pieza superior.	50
Figura 35. Resultado final del montaje del dispositivo User-ED.	50
Figura 36. Pantalla logo Tafco.	51
Figura 37. Pantalla cargando.	51
Figura 38. Pantalla buscando gps.....	51
Figura 39. Pantalla inicio.....	51

Figura 40. Pantalla confirmación inicio.....	51
Figura 41. Pantalla de guardado de datos.	51
Figura 42. Pantalla selección de <i>tee</i>	51
Figura 43. Pantalla <i>green</i>	52
Figura 44. Pantalla kilometraje y tiempo.	52
Figura 45. Pantalla revisión de puntuaciones.....	52
Figura 46. Pantalla inserción de golpes.	52
Figura 47. Pantalla fin de hoyo.	52
Figura 48. Esquema de la red Zigbee (2.4 GHz) desplegada en el proyecto.	53
Figura 49. Fotos del montaje de un enrutador Zigbee, protegido por plástico para la lluvia, dado que el dispositivo no tiene ninguna protección.	54
Figura 50. Equipo Digi ConnectPort X4H con cables ethernet (azul) y alimentación (negro).....	55
Figura 51. Dos fotos con diferente perspectiva del montaje del coordinador Zigbee...	56
Figura 52. Esquema de la red LoRaWAN (868MHz) desplegada en el proyecto.	57
Figura 53. Foto del <i>gateway</i> RG186 de Laird utilizado en las pruebas.....	58
Figura 54. Dos fotos con diferentes perspectivas del <i>gateway</i> TEKTELIC Kona Macro.	58
Figura 55. Foto del montaje en el campo de golf del <i>gateway</i> LoRaWAN (TEKTELIC Kona Macro), alimentado por batería portátil y reposando sobre escalera. También se muestra la antena de largo alcance (OMB.868.B12F21) colocada con un trípode.	59
Figura 56. Ejemplo del mapa generado por la primera versión web. En la imagen se pueden apreciar marcadores de distinto color según el dispositivo.....	62
Figura 57. Captura de pantalla de la web para el seguimiento del juego. A la izquierda se muestra el mapa del campo de golf con los polígonos de cada hoyo y los marcadores dónde se sitúan los dispositivos. A la derecha se muestra la tabla de tiempos por hoyo de cada dispositivo.	63
Figura 58. Foto aérea del Club de Golf Castillo de Gorraiz. Se indica la posición la de la casa club y los hoyos numerados.	64
Figura 59. A la izquierda, un par de dispositivos integrados en un <i>green</i> . A la derecha, trabajador de Tafco portando un dispositivo mientras camina.....	65
Figura 60. Mapa resultante del despliegue Zigbee.....	66
Figura 61. Mapa resultante del despliegue LoRaWAN.....	67
Figura 62. Un par de imágenes de los prototipos en el campo de Gorraiz.	69
Figura 63. Mapa de cobertura del <i>gateway</i> 1 situado en la casa club.	69
Figura 64. Mapa de cobertura del <i>gateway</i> 2 situado en el lateral del hoyo 6.	70
Figura 65. Mapa de cobertura de ambos <i>gateways</i>	70
Figura 66. Mapa con marcadores de cada trama recibida de cada dispositivo.	71
Figura 67. Captura de pantalla de la web de seguimiento del juego. El dispositivo bb000001 se encuentra en el hoyo 2, el bb000003 todavía no ha iniciado y los siguientes están en el hoyo 1.....	72
Figura 68. Captura de pantalla de la web de seguimiento del juego. Han avanzado y dos están en el hoyo 2 y los otros en el 3.	72
Figura 69. Captura de pantalla de la web de seguimiento del juego. Un dispositivo se encuentra en el hoyo 5 y los otros tres en el hoyo 7. Se aprecia en el mapa uno detrás del otro.....	73

10. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa características principales sistemas GNSS. [13] [14] [20].....	14
Tabla 2. Comparación tecnologías IoT.	16
Tabla 3. Plan frecuencial LoRaWAN EU868.	22
Tabla 4. Comparación microcontroladores.....	41

11. ACRÓNIMOS

ABP	<i>Activation By Personalization</i>
AEGG	<i>Asociación Española de Campos de Golf</i>
CHIRP	<i>Compressed High Intensity Radar Pulse</i>
COVID-19	<i>COronaVirus Disease - 2019</i>
CR	<i>Code Rate</i>
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
DC	<i>Duty Cycle</i>
DR	<i>Data Rate</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FPC	<i>Flexible Printed Circuit</i>
GLONASS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HSPA+	<i>Evolved High Speed Packet Access</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IRNSS	<i>Indian Regional Navigation Satellite System</i>
ISM	<i>Industrial Scientific and Medical</i>
LNA	<i>Low-Noise Amplifier</i>
LoRa	<i>Long Range</i>
LPWAN	<i>Low-Power Wide Area Network</i>
LR-WPAN	<i>Low Rate Wireless Personal Area Network</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MCU	<i>MicroController Unit</i>
MIC	<i>Message Integrity Code</i>
MIP	<i>Memory-in-Pixel</i>
NavIC	<i>Navigation with Indian Constellation</i>
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i>
OTAA	<i>Over-The-Air-Activation</i>

PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PMA	<i>Power Matters Alliance</i>
PPS	<i>Precise Positioning Service</i>
PRN	<i>Pseudo-Random Noise</i>
QZSS	<i>Quasi-Zenith Satellite System</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RFEG	Real Federación Española de Golf
RSOC	<i>Relative State Of Charge</i>
SBAS	<i>Satellite-Based Augmentation System</i>
SF	<i>Spreading Factor</i>
SMA	<i>SubMiniature versión A</i>
SMD	<i>Surface Mounted Device</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SPS	<i>Standard Positioning Service</i>
SSM	<i>Spread Spectrum Modulation</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
ToA	<i>Time on Air</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver / Transmitter</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
VSWR	<i>Voltage Standing Wave Ratio</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>
WPC	<i>Wireless Power Consortium</i>
WPT	<i>Wireless Power Transfer</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>
ZC	<i>Zigbee Coordinator</i>
ZED	<i>Zigbee EndDevice</i>
ZR	<i>Zigbee Router</i>